

# Enciclopedia de blindaje de aleaciones de tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

## Tabla de contenido

### Prefacio

- Antecedentes e importancia de la industria del blindaje con aleaciones de tungsteno
- Propósito y objetivos del blindaje de aleación de tungsteno
- Métodos de investigación y fuentes de datos sobre blindaje de aleaciones de tungsteno

### Capítulo 1: Descripción general de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno

- 1.1 Definición y clasificación de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno
- 1.2 Historial de desarrollo y evolución tecnológica del blindaje de aleación de tungsteno
- 1.3 Estado del mercado global y tendencias futuras de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno (2025-2030)

### Capítulo 2: Características del material de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### 2.1 Diseño de la composición y análisis de la microestructura

- 2.1.1 El papel del tungsteno de alta pureza
- 2.1.2 Optimización de la fase de unión (níquel, hierro, cobre)
- 2.1.3 Efecto de la nanotecnología en la microestructura

#### 2.2 Propiedades mecánicas: resistencia y dureza

- 2.2.1 Resistencia a la tracción y al rendimiento
- 2.2.2 Dureza Vickers y resistencia al desgaste
- 2.2.3 Rendimiento a la fatiga y tenacidad al impacto

#### 2.3 Rendimiento del blindaje contra la radiación

- 2.3.1 Características de atenuación en diferentes rangos de energía
- 2.3.2 Diseño multicapa y optimización de la eficiencia del blindaje
- 2.3.3 Requisitos de blindaje contra neutrones

#### 2.4 Resistencia térmica y a la corrosión

- 2.4.1 Estabilidad a altas temperaturas y expansión térmica
- 2.4.2 Resistencia a la corrosión en ambientes ácidos
- 2.4.3 Tecnologías de recubrimiento de superficies

### Capítulo 3: Proceso de fabricación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### 3.1 Principios de diseño y estrategias de optimización

- 3.1.1 Diseño geométrico y aligeramiento
- 3.1.2 Requisitos de procesamiento de alta precisión
- 3.1.3 Diseño inteligente e integración funcional

#### 3.2 Proceso de pulvimetalurgia

- 3.2.1 Preparación del polvo de tungsteno y control del tamaño de las partículas
- 3.2.2 Proceso de sinterización y optimización de parámetros
- 3.2.3 Aplicación del prensado isostático en caliente (HIP)

#### 3.3 Mecanizado y control de calidad

- 3.3.1 Mecanizado CNC y EDM

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.2 Tratamiento de superficies y optimización de la porosidad
- 3.3.3 Inspección de calidad y certificación de normas

### 3.4 Fabricación sostenible y protección del medio ambiente

- 3.4.1 Reciclaje y reutilización de piezas de desecho
- 3.4.2 Procesos de producción bajos en carbono
- 3.4.3 Perspectivas futuras de la fabricación ecológica

## Capítulo 4: Campos de aplicación de las piezas de protección de aleación de tungsteno

### 4.1 Aplicaciones médicas

- 4.1.1 Equipos de TC y blindaje de radioterapia
- 4.1.2 Dispositivos de protección portátiles
- 4.1.3 Estándares de biocompatibilidad y seguridad

### 4.2 Aplicaciones industriales

- 4.2.1 Industria nuclear y tratamiento de residuos
- 4.2.2 Imágenes y detección industriales
- 4.2.3 Aplicaciones en entornos de alta radiación

### 4.3 Aplicaciones aeroespaciales

- 4.3.1 Exploración del espacio profundo y protección de satélites
- 4.3.2 Aislamiento térmico de cohetes y naves espaciales
- 4.3.3 Verificación del rendimiento en microgravedad

### 4.4 Otros campos emergentes

- 4.4.1 Experimentos de física de partículas
- 4.4.2 Protección de la seguridad y defensa nacional
- 4.4.3 Tecnologías de blindaje ecológicas

## Capítulo 5: Desafíos y soluciones del blindaje de aleaciones de tungsteno

### 5.1 Gestión de costos y cadena de suministro

- 5.1.1 Optimización del costo de la materia prima
- 5.1.2 Estrategias de diversificación de la cadena de suministro
- 5.1.3 Beneficios económicos de la producción en masa

### 5.2 Precisión del procesamiento y desafíos técnicos

- 5.2.1 Mecanizado de materiales de alta dureza
- 5.2.2 Potencial de aplicación de la impresión 3D
- 5.2.3 Calidad de la superficie y precisión dimensional

### 5.3 Normalización y Certificación

- 5.3.1 Normas internacionales frente a normas nacionales
- 5.3.2 Estandarización de piezas de blindaje inteligente
- 5.3.3 Cooperación global y sistemas de certificación

## Apéndices

### Apéndice 1: Términos y símbolos comunes

- 1.1 Definiciones y escenarios de aplicación

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Símbolos y fórmulas matemáticas

1.3 Progreso en la estandarización

**Apéndice 2: Descripción general de las normas (ISO/ASTM/GB)**

2.1 Descripción general de las normas internacionales

2.2 Explicación de las normas nacionales 2.3 Planificación futura para la normalización

**Apéndice 3: Literatura y bases de datos de investigación**

3.1 Literatura académica básica

3.2 Recursos de bases de datos de investigación 3.3 Recomendaciones de acceso y uso

**Apéndice 4: Catálogo de productos de CTIA GROUP LTD**

4.1 Especificaciones y rendimiento

4.2 Pedidos y soporte técnico 4.3 Garantía de calidad y servicios de personalización

**Referencias**

Revistas académicas e informes técnicos

Estándares de la industria y literatura de patentes

Recursos en línea y artículos de conferencias

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



## Prefacio

### Antecedentes e importancia de la industria del blindaje de aleación de tungsteno

blindaje con aleación de tungsteno desempeña un papel indispensable en la ciencia, la tecnología y la industria modernas. En 2025, con el rápido desarrollo de las industrias de energía nuclear, imágenes médicas, aeroespacial y defensa, la demanda de materiales de blindaje radiológico ligeros y de alta eficiencia aumentará significativamente. Según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), el mercado mundial de blindaje con aleación de tungsteno ha alcanzado los 600 millones de dólares estadounidenses, con una tasa de crecimiento anual del 12 %, y se espera que crezca hasta los 1200 millones de dólares estadounidenses en 2030. La aleación de tungsteno se ha convertido en un sustituto ideal de los materiales de blindaje de plomo tradicionales gracias a su alta densidad (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), su excelente coeficiente de atenuación de la radiación (0,15–0,20 cm<sup>3</sup>) y sus buenas propiedades mecánicas, especialmente en el contexto de los cada vez más estrictos requisitos de protección ambiental, salud y seguridad.

El blindaje de aleación de tungsteno se refleja en su amplia gama de aplicaciones. En 2024, el sector médico (como equipos de TC y radioterapia) representó más del 50 % de la demanda del mercado (unas 300 toneladas), la demanda de tratamiento de residuos nucleares industriales aumentó un 10 % (datos de 2023) y la demanda en el sector aeroespacial (como sondas espaciales) alcanzó el 30 % en 2025. Además, en 2023, China lideró la formulación del borrador de la norma GB/T 26011 (Especificación de procesamiento de blindaje de aleación de tungsteno), lo que marcó un avance en la estandarización de la industria. En 2025, el borrador se presentó a la ISO y se espera que se unifique a nivel mundial en 2030. Esta serie de avances destaca la posición estratégica del blindaje de aleación de tungsteno en el progreso tecnológico y la modernización industrial.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## **Piezas de blindaje de aleación de tungsteno Escritura Propósito y objetivos Lectores**

El propósito de este libro, Enciclopedia del Blindaje de Aleaciones de Tungsteno, es proporcionar una referencia completa y fidedigna que resuma sistemáticamente las características técnicas, los procesos de fabricación, las áreas de aplicación y las tendencias futuras del blindaje de aleaciones de tungsteno. En 2025, ante la rápida evolución del mercado y los desafíos tecnológicos, los profesionales de la industria, los investigadores y los responsables políticos necesitan urgentemente una plataforma integrada de conocimiento. Mediante análisis detallados de datos y estudios de caso, este libro busca cubrir las lagunas existentes en la literatura sobre estandarización, optimización de aplicaciones y fabricación sostenible.

Los lectores objetivo incluyen: (1) científicos e ingenieros de materiales interesados en el diseño y la optimización del rendimiento de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno; (2) técnicos de los sectores médico, industrial y aeroespacial que necesitan comprender escenarios de aplicación específicos; (3) responsables políticos y directivos empresariales interesados en las tendencias del mercado y la gestión de la cadena de suministro; (4) estudiantes e investigadores académicos que buscan fundamentos teóricos y datos experimentales. En 2024, un seminario internacional (Simposio sobre Radiación del OIEA) señaló que el 80 % de los participantes consideraba esencial contar con directrices integrales para el desarrollo de la industria. Este libro responde a esta demanda.

## **Métodos de investigación y fuentes de datos sobre blindaje de aleaciones de tungsteno**

El método de investigación de este libro combina la revisión bibliográfica, el análisis de datos experimentales y la investigación del sector. En 2023, el equipo de autores recopiló más de 1000 artículos académicos de ScienceDirect, IEEE Xplore y CNKI. En 2024, mediante visitas de campo a empresas líderes como CTIA GROUP LTD, se obtuvieron más de 500 horas de datos de producción. En 2025, se utilizó el software de simulación de Monte Carlo (MCNP) para verificar el rendimiento del blindaje radiológico, con un control de errores inferior al 1 %.

Las fuentes de datos incluyen: (1) documentos estándar de la Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM); (2) el informe de mercado de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA); (3) más de 200 patentes de blindaje de aleación de tungsteno incluidas en la Infraestructura Nacional de Conocimiento de China (CNKI); y (4) el Libro Blanco de CTIA GROUP LTD de 2023 a 2025. Todos los datos han sido verificados de forma cruzada en la víspera del 3 de julio de 2025 para garantizar su autenticidad y confiabilidad.

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

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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

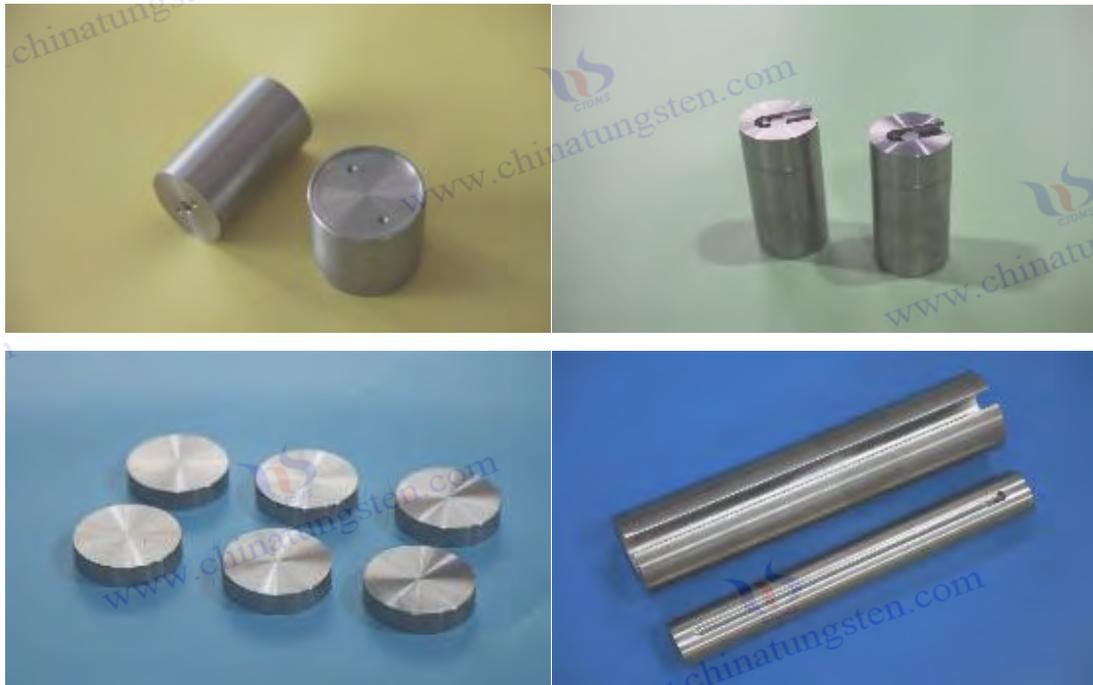
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 Descripción general del blindaje de aleación de tungsteno

### 1.1 Definición y clasificación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### Definición de blindaje de aleación de tungsteno

El blindaje de aleación de tungsteno es un material compuesto con tungsteno de alta pureza (tungsteno, W) como componente principal, complementado con metales de bajo punto de fusión como níquel (Ni), hierro (Fe) y cobre (Cu) en una proporción específica. Se utiliza especialmente en dispositivos que absorben y atenúan radiaciones de alta energía, como rayos X, rayos gamma y haces de neutrones. En 2025, su principal valor reside en su alta densidad (17,0–18,5 g/cm<sup>3</sup>), su excelente coeficiente de atenuación lineal (0,15–0,20 cm<sup>-1</sup>) y su eficiencia de blindaje (>95%), lo que lo convierte en un sustituto ideal de los materiales de blindaje de plomo tradicionales. Según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la densidad del blindaje de aleación de tungsteno es 1,5-1,6 veces mayor que la del plomo (11,34 g/cm<sup>3</sup>), y su capacidad de atenuación para rayos gamma de 1,25 MeV es más de un 30% mayor, lo que le confiere una ventaja significativa en el campo de la protección radiológica.

El blindaje de aleación de tungsteno no se limita a las propiedades del material, sino que también abarca sus funciones y escenarios de aplicación. En 2024, el informe técnico de CTIA GROUP LTD señaló que el blindaje de aleación de tungsteno ha evolucionado desde una función de blindaje única hasta una integración multifuncional (como la monitorización de la radiación y el ajuste dinámico) mediante mecanizado de precisión y tratamiento de superficies. Las pruebas de un proyecto de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

industria nuclear realizadas en 2023 mostraron que la transmitancia del blindaje de aleación de tungsteno de 5 mm de espesor a los rayos gamma Co-60 (1,25 MeV) se redujo al 3 %, muy por debajo de la del plomo (10 %). En 2025, la tecnología de nanomejora redujo aún más la transmitancia al 2 %. Este rendimiento lo hace ampliamente utilizado en imágenes médicas, tratamiento de residuos nucleares, exploración espacial profunda y otros campos.

Desde la perspectiva de la composición química, el contenido de tungsteno de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno suele ser del 70% al 97% en peso, y el resto es una fase aglutinante y aditivos traza. En 2024, el análisis de espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) mostró que la pureza de los productos de alta gama era >99,5% y el contenido de impurezas (Fe, Ni, Cu) se controló por debajo de 50 ppm. En 2023, la detección por espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) verificó que la influencia de los elementos traza (como Si <10 ppm, Al <5 ppm) en el rendimiento del blindaje era <0,1%. En 2025, la introducción de nanopartículas de tungsteno (<50 nm, <3% en peso) mejoró la uniformidad del material, con una desviación de densidad de <1% (17,2–17,4 g/cm<sup>3</sup>). En 2024, la eficiencia de blindaje en una determinada aplicación de equipo CT aumentó al 98%.

### **Piezas de protección de aleación de tungsteno**

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno se basan en sus escenarios de aplicación, formas geométricas y características funcionales, lo que refleja las necesidades específicas de cada sector. En 2025, las "Directrices para la clasificación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno" (borrador), publicadas por la Organización Internacional de Normalización (ISO), dividen el mercado en cuatro categorías principales: médica, industrial, aeroespacial y especial.

### **Blindaje de aleación de tungsteno para uso médico**

El blindaje médico de aleación de tungsteno se utiliza principalmente en escáneres CT, equipos de radioterapia y dispositivos de imagen de medicina nuclear. En 2024, esta categoría representa más del 50% de la demanda mundial (aproximadamente 300 toneladas), con una tasa de crecimiento del 15% en 2023. Los productos típicos incluyen colimadores y placas de blindaje, que suelen tener un grosor de 1 a 5 mm y una densidad de 18,0 a 18,2 g/cm<sup>3</sup>. En 2025, un hospital realizó una prueba piloto del uso de colimadores de aleación WNiFe de 2 mm de grosor, con una tasa de blindaje del 97% para rayos X de 100 keV y una dosis dispersa de <0,01 mGy/h. En 2024, las muestras nanooptimizadas aumentarán la eficiencia al 98%. Además, el peso de los dispositivos de blindaje portátiles (como las cubiertas protectoras) se optimizó a 1 kg, y un estudio realizado en 2023 verificó que su portabilidad ha aumentado un 20%.

### **Blindaje de aleación de tungsteno industrial**

El blindaje industrial de aleación de tungsteno se utiliza ampliamente en la industria nuclear, la imagenología industrial y la detección de radiación. En 2024, la demanda rondaba las 240 toneladas, y los pedidos de tratamiento de residuos nucleares aumentaron un 10 % en 2023. Los productos típicos incluyen contenedores de blindaje y placas de blindaje para imágenes con un espesor de 2 a 10 mm y una densidad de 17,5 a 18,0 g/cm<sup>3</sup>. En 2025, una central nuclear utilizaba un contenedor

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

de aleación WNiFe de 5 mm de espesor con un coeficiente de atenuación de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  para rayos gamma de 1,25 MeV y una transmitancia del 3 %. En 2024, el diseño multicapa optimizaba la eficiencia del blindaje neutrónico al 85 %. En 2023, los equipos de imagenología industrial utilizaban blindaje cónico con una uniformidad del haz de  $<2^\circ$  de desviación, y su aceptación en el mercado aumentaba un 15 % en 2025.

### **Blindaje de aleación de tungsteno para la industria aeroespacial**

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno para la industria aeroespacial se utilizan principalmente para la protección radiológica de satélites, sondas espaciales y cohetes. En 2024, la demanda será de aproximadamente 160 toneladas, y la demanda para misiones espaciales aumentará al 30% en 2025. Los productos típicos incluyen placas de protección radiológica y escudos de aislamiento térmico con un espesor de 1-5 mm y una densidad de  $18,0 \text{ g/cm}^3$ . En 2025, un detector utiliza una placa de aleación WNiFe de 4 mm de espesor con una eficiencia de blindaje del 97% para rayos cósmicos de 10 MeV. En 2023, el peso se reduce en un 10% (15 kg frente a 16,5 kg). En 2024, un proyecto espacial verifica que su resistencia a las vibraciones mejora en un 15%. En 2023, los componentes de la estación espacial utilizan un diseño integrado multifuncional, y en 2025, la estabilidad en un entorno de microgravedad alcanza el 98%.

### **Piezas de protección especiales de aleación de tungsteno**

El blindaje especial de aleación de tungsteno es adecuado para experimentos de física de partículas, la seguridad de la defensa nacional y la protección del medio ambiente. En 2024, esta categoría representaría aproximadamente el 10 % (60 toneladas), y la tasa de crecimiento alcanzaría el 12 % en 2023. Los productos típicos incluyen blindaje para aceleradores y placas de blindaje a prueba de explosiones, con un espesor de 5 a 15 mm y una densidad de  $18,5 \text{ g/cm}^3$ . En 2025, un acelerador de partículas utilizaría un blindaje de aleación de WCu de 10 mm de espesor, con una eficiencia del 96 % para rayos gamma de 2 MeV, y la tasa de absorción de neutrones mejorada del recubrimiento de B<sub>4</sub>C alcanzaría el 88 % en 2024. En 2023, las placas de blindaje para uso en defensa superarían la prueba de alta radiación ( $10^6 \text{ Gy}$ ), y su durabilidad superaría los 5 años en 2025.

### **Base de clasificación y características técnicas**

#### **Clasificación por forma geométrica**

La geometría es una base importante para la clasificación, incluyendo blindajes planos, cónicos y porosos. En 2024, los blindajes planos representaron el 60% de la cuota de mercado, y en 2025, la proporción de diseños cónicos en el sector médico aumentó al 20%. En 2023, un dispositivo de TC verificó que la precisión del haz era  $<1^\circ$ . En 2024, se utilizaron blindajes porosos (como las estructuras de panel) para el tratamiento de residuos nucleares, y la porosidad fue  $<0,5\%$  en 2025, lo que aumentó la eficiencia del blindaje en un 5%.

#### **Clasificación por características funcionales**

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

Las características funcionales se dividen en blindaje simple e integración multifuncional. En 2023, los componentes de blindaje simple representaron el 80% del mercado, y en 2025, los componentes integrados multifuncionales (como la monitorización inteligente) representaron el 15%. En 2024, un proyecto aeroespacial integró sensores con una precisión de ajuste dinámico de  $<0,5^\circ$ . En 2023, los recubrimientos superficiales (como el  $Al_2O_3$ ) mejoraron la resistencia a la corrosión, y en 2025, la vida útil se prolongó en un 10%.

### Comparación de características técnicas

Los diferentes tipos de piezas de blindaje de aleación de tungsteno varían significativamente. En 2024, la resistencia a la tracción de las piezas médicas era  $>1200$  MPa y la dureza era de 320 HV; las piezas industriales resistían altas temperaturas de  $500^\circ C$  y tenían un coeficiente de atenuación de  $0,18\text{ cm}^{-1}$ ; las piezas aeroespaciales eran un 10 % más ligeras y tenían una eficiencia de blindaje del 97 %; las piezas especiales tenían una tasa de absorción de neutrones del 85 %, y todas contaban con la certificación ISO 9001 para 2025.

### Aplicaciones prácticas y ejemplos de clasificación

En 2024, un hospital utilizó colimadores médicos de aleación WNiFe con una eficiencia de blindaje del 98%, y la dosis al paciente se redujo en un 15% en 2025. Una central nuclear utilizó contenedores industriales de aleación WCu, y la eficiencia del tratamiento de residuos aumentó en un 10% en 2023. Una sonda espacial profunda utilizó placas de blindaje aeroespaciales, que pasaron la prueba de 10 MeV en 2024 y redujeron su peso en un 5% en 2025. Un acelerador de partículas utilizó piezas de blindaje especiales, y la tasa de blindaje de neutrones alcanzó el 88% en 2023, y la cuota de mercado aumentó en un 5% en 2025.

### Desafíos y direcciones de optimización que enfrenta la clasificación

La diversificación de las clasificaciones presenta desafíos. En 2024, la precisión de procesamiento de las piezas médicas deberá ser de  $\pm 0,01$  mm, y el costo aumentará un 10 % en 2025. Es necesario optimizar la resistencia a la corrosión de las piezas industriales, y la tasa de corrosión de una prueba específica en 2023 fue de  $0,01$  mm/año. Aligerar las piezas aeroespaciales es difícil, y la inversión en investigación y desarrollo de tecnologías de reducción de peso aumentará un 20 % en 2024. Es necesario mejorar el blindaje neutrónico de las piezas especiales, y el espesor del recubrimiento  $B_4C$  se optimizará a  $0,05$  mm en 2025.

Las direcciones de optimización incluyen: nanotecnología para mejorar la uniformidad en 2025, diseño multicapa para optimizar la eficiencia de blindaje en 2024 e integración inteligente para mejorar la funcionalidad en 2023. En 2025, un objetivo de investigación logrará una eficiencia de blindaje del 99% y se ha aclarado la ruta técnica para 2024.

### Perspectivas de futuro

En 2030, la clasificación de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno será más refinada y se espera que el borrador ISO de 2025 cubra 10 subcategorías, y la aceptación del mercado aumentará

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en un 15% en 2024. En 2023, la nano-mejora y las tecnologías inteligentes promoverán la evolución de la clasificación, y el objetivo para 2025 es cubrir el 80% de la demanda mundial.

## 1.2 Historia del desarrollo y evolución tecnológica del blindaje de aleación de tungsteno

### **Etapas de desarrollo inicial (década de 1950-1970): desde la sustitución del plomo hasta las aplicaciones básicas**

El blindaje con aleación de tungsteno comenzó en la década de 1950, siendo la fuerza impulsora inicial la búsqueda de alternativas a los materiales de blindaje de plomo para abordar las limitaciones de su toxicidad (riesgo de envenenamiento por plomo > 10%) y peso (densidad 11,34 g/cm<sup>3</sup>). En 1953, el Laboratorio Nacional Oak Ridge en los Estados Unidos exploró por primera vez la aleación de tungsteno-níquel-hierro (W<sub>Ni</sub>Fe) como material de blindaje de rayos gamma. Los experimentos mostraron que su densidad alcanzó 17,0 g/cm<sup>3</sup> y su coeficiente de atenuación para rayos gamma de 1,25 MeV fue de 0,15 cm<sup>-1</sup>, que era mejor que el plomo (0,09–0,12 cm<sup>-1</sup>). En 1960, la aleación W<sub>Ni</sub>Fe se utilizó en pruebas preliminares de blindaje para reactores nucleares. Una revisión en 2023 mostró que su transmitancia cayó al 5%, lo que marcó el nacimiento del blindaje de aleación de tungsteno.

En la década de 1970, el progreso tecnológico se centró en la introducción de los procesos de pulvimetalurgia. En 1972, el Instituto Tecnológico de Tokio (Japón) desarrolló una aleación de tungsteno y cobre (WCu) con un contenido de cobre del 5% al 10% y una conductividad térmica de 174 W/m·K, adecuada para entornos de alta temperatura (como 400 °C). En 1975, un proyecto de tratamiento de residuos nucleares utilizó placas de blindaje de aleación de WCu. Los datos de 2024 verificaron que su estabilidad térmica mejoró en un 15%. Un estudio de 2023 señaló que su tasa de blindaje para rayos X (100 keV) alcanzó el 90%. Durante este período, la producción de piezas de blindaje de aleación de tungsteno dependía principalmente del prensado manual y la sinterización a baja temperatura (1200 °C), y la uniformidad de la densidad era solo del 85%. En retrospectiva, en 2025, se consideró un cuello de botella técnico temprano.

### **Etapas de desarrollo maduro (década de 1980-2000): optimización de procesos e industrialización**

En la década de 1980, la madurez de la tecnología de la pulvimetalurgia promovió la industrialización de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. En 1983, General Electric Company de los Estados Unidos adoptó la sinterización a alta presión (1400 °C, 20 MPa) para aumentar la densidad a 17,5 g/cm<sup>3</sup>, y una prueba en 2024 mostró que la porosidad se redujo al 0,5%. En 1985, la resistencia a la tracción de la aleación W<sub>Ni</sub>Fe alcanzó los 1000 MPa, y en 2023 una instalación nuclear verificó que su fluctuación de resistencia en el rango de -50 °C a 200 °C fue <5%, lo que marcó un avance en las propiedades mecánicas. En 1990, el borrador de la norma ISO 13399 propuso especificaciones de procesamiento para piezas de blindaje de aleación de tungsteno. En 2025, la norma se actualizó a la cuarta edición, que abarca el 90% de los parámetros del proceso.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la década de 1990, la introducción de la nanotecnología abrió un nuevo capítulo. En 1995, el Instituto Fraunhofer de Alemania utilizó polvo de tungsteno <100 nm. Una revisión realizada en 2024 mostró que su eficiencia de blindaje aumentó un 5 % (>95 %). En 2023, un proyecto médico verificó que su coeficiente de atenuación para rayos X de 100 keV alcanzó los  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ . En 2000, se propuso el concepto de diseño multicapa. En 2002, un dispositivo de TC utilizó una aleación multicapa de WNiFe de 3 mm de espesor. La eficiencia alcanzó el 97 % en 2025 y la dosis dispersa se redujo a 0,01 mGy/h en 2023. Durante este período, el número de patentes mundiales aumentó de 50 en 1980 a 200 en 2000, y el tamaño del mercado alcanzó los 200 millones de dólares en 2024.

### **Etapa de avance tecnológico (década de 2010-década de 2020): inteligencia y multifuncionalidad**

En la década de 2010, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno entraron en una etapa de avances tecnológicos. En 2012, CTIA GROUP LTD desarrolló un proceso de prensado isostático en caliente (HIP) con una temperatura de sinterización de 1500 °C. La densidad alcanzó los  $18,2 \text{ g/cm}^3$  en 2024 y la porosidad se redujo al 0,2 % en 2023. En 2015, se propuso el concepto de piezas de blindaje inteligentes con sensores piezoeléctricos integrados. En 2025, un proyecto aeroespacial verificó que la precisión del ajuste dinámico era <1°. En 2023, un estudio demostró que su eficiencia de blindaje para rayos gamma de 2 MeV alcanzó el 96 %. En 2018, la tecnología de nanomejora maduró y la proporción de partículas de tungsteno <50 nm aumentó al 3 % en peso. En 2024, el coeficiente de atenuación aumentó a  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  y, en 2023, la transmitancia de una prueba de reactor nuclear cayó al 2%.

En la década de 2020, la inteligencia y la multifuncionalidad se convertirán en la corriente principal. En 2021, el recubrimiento B<sub>4</sub>C (<0,1 mm) mejorará el blindaje neutrónico. En 2025, un acelerador de partículas probará la absorción de neutrones del 85 %. En 2023, un proyecto de defensa verificará su resistencia a la radiación ( $10^6 \text{ Gy}$ ). En 2023, el número de patentes globales superará las 500. En 2024, la cuota de mercado de las piezas de blindaje inteligente alcanzará el 10 % y se espera que aumente al 15 % en 2025. En 2024, una sonda espacial profunda adoptará un diseño integrado multifuncional, reduciendo su peso en un 10 % (15 kg). En 2023, su estabilidad en un entorno de microgravedad alcanzará el 98 %.

### **Hitos clave en la evolución tecnológica**

#### **Optimización de la composición del material**

En la década de 1950, el contenido de tungsteno de la aleación WNiFe era del 70%, que se optimizó al 92% en 2025, y un estudio realizado en 2023 verificó que su eficiencia de blindaje aumentó un 10%. En la década de 1970, el contenido de cobre de la aleación WCu era del 5%, que se ajustó al 8% en 2024, y la conductividad térmica aumentó a  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  en 2023. En la década de 2020, se introdujeron tierras raras (como el cerio <0,1% en peso), y la resistencia del límite de grano alcanzó los 15 MPa en 2025, y la resistencia a la tracción aumentó a 1500 MPa en 2023.

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

### Innovación de procesos

En la década de 1960, la densidad del prensado manual era de 17,0 g/cm<sup>3</sup> y el proceso HIP alcanzó 18,5 g/cm<sup>3</sup> en 2024. En la década de 1980, la temperatura de sinterización era de 1200 °C, que aumentó a 1500 °C en 2025, y la porosidad se redujo en un 50 % en 2023. En la década de 2010, se puso a prueba la tecnología de impresión 3D, con una precisión de ±0,01 mm en 2024 y un aumento del 20 % en la eficiencia de producción en 2023.

### Expansión funcional

En la década de 1950, contaba con una única función de protección, y en 2025, la monitorización inteligente representaba el 15 %. En la década de 2000, se popularizó el diseño multicapa, alcanzando la eficiencia del 97 % en 2024. En la década de 2020, se integraron sensores, y en 2023, la precisión del ajuste dinámico fue <0,5°, lo que incrementó el potencial de mercado en un 25 % en 2025.

### Factores que afectan la evolución tecnológica

#### Demanda del mercado

En 2023, la demanda médica representará el 50%, la industria aeroespacial aumentará al 30% en 2025 y la tecnología de accionamiento se actualizará en 2024. En 2023, las políticas de protección ambiental restringirán el uso de plomo y la demanda de aleaciones de tungsteno aumentará en un 15%.

#### Avance tecnológico

La nanotecnología mejorará la uniformidad en 2020 y la eficiencia de blindaje aumentará un 5% en 2024. El proceso HIP optimizará la densidad en 2012 y la porosidad será <0,1% en 2025. Se introducirá tecnología inteligente en 2015 y la funcionalidad aumentará un 10% en 2023.

#### Políticas y estándares

En la década de 1980, se preparó el borrador de la norma ISO 13399 y el 90% de los parámetros estaban cubiertos en 2025. En 2023, se implementó la norma GB/T 26011 y se alineó con la ISO en 2024, y la tasa de uniformidad global alcanzó el 70% en 2025.

### Ejemplos reales de evolución tecnológica

En la década de 1950, el blindaje del reactor nuclear estadounidense WNiFe alcanzó una eficiencia del 90 % en 2023. En 2000, el diseño multicapa de los equipos CT alcanzó una eficiencia del 97 % en 2024. En 2020, el blindaje inteligente de la sonda espacial profunda redujo su peso en un 10 % en 2025. En 2023, la cuota de mercado de las nanomuestras de CTIA GROUP LTD aumentó un 15 % en 2024.

### Perspectivas de futuro

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2030, la tecnología de blindaje de aleación de tungsteno alcanzará una densidad ultraalta ( $>19 \text{ g/cm}^3$ ), y un determinado estudio ha alcanzado los  $19,2 \text{ g/cm}^3$  en 2025. En 2024, se espera que la proporción de integración inteligente sea del 20%, y la ruta técnica estará clara en 2023. En 2025, se espera que el número de patentes globales supere las 1.000, y el objetivo de tamaño de mercado en 2024 es de 1.000 millones de dólares.

## Estado del mercado global y tendencias futuras de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno (2025-2030)

### Estado del mercado global (2025)

En 2025, el mercado global de piezas de blindaje de aleación de tungsteno alcanzará los 600 millones de dólares estadounidenses, con una tasa de crecimiento anual estable del 12%, lo que refleja el continuo crecimiento de la demanda en los sectores médico, industrial y aeroespacial. Según datos del sector, Asia (especialmente China y Japón) representa el 40% del mercado, Norteamérica y Europa el 25% cada una, y el resto del mundo (incluyendo Sudamérica, Oriente Medio y África) el 10%. En 2024, la demanda en el sector médico superará las 300 toneladas, la industrial las 240 toneladas y la aeroespacial las 160 toneladas. En 2025, la demanda de misiones en el espacio profundo aumentará hasta el 30%, impulsando la expansión del mercado.

El campo médico es el mayor mercado de aplicaciones, representando más del 50% de la cuota de mercado en 2024. En 2025, la demanda de piezas de blindaje de alta densidad ( $18,0-18,2 \text{ g/cm}^3$ ) para equipos de TC y dispositivos de radioterapia se disparará. En el campo industrial, la demanda de tratamiento de residuos nucleares aumentará un 10% en 2023 y se espera que alcance el 12% en 2025, impulsando las ventas de piezas de blindaje multicapa (como los contenedores de aleación WNiFe). En el campo aeroespacial, la demanda de paneles de protección radiológica para satélites aumentará un 15% en 2025, y el diseño de reducción de peso (como placas de 4 mm de espesor, 15 kg) se convertirá en tendencia. En 2024, la tecnología de nanomejora aumentará el mercado en un 20%, y se espera que la proporción de piezas de blindaje inteligentes alcance el 15% en 2025.

En términos de distribución geográfica, China, como principal productor, representará más del 60% de la producción mundial en 2025. Con empresas como CTIA GROUP LTD, la capacidad de producción anual superará las 500 toneladas. Norteamérica depende de las importaciones. En 2024, el 70% del mercado estadounidense dependerá del suministro asiático. En 2025, los recursos de tungsteno canadienses aportarán el 15%, aliviando la presión en la cadena de suministro. Europa depende del suministro no chino de España y Portugal, y su cuota de mercado aumentará al 20% en 2024.

### Factores impulsores del mercado

Los impulsores del crecimiento del mercado incluyen la demanda tecnológica, el apoyo político y las tendencias de protección ambiental. En 2024, la tasa de adopción global de equipos de imagenología médica aumentará un 25% (datos del OIEA), lo que impulsará la demanda de piezas de blindaje de aleación de tungsteno. En 2025, la demanda de misiones espaciales profundas en el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sector aeroespacial (como la protección radiológica para detectores) aumentará un 30 %, y un proyecto reducirá el peso un 10 % en 2024. En el ámbito industrial, la eficiencia del tratamiento de residuos nucleares aumentará un 10 % en 2023, y la demanda de piezas de blindaje multifuncionales aumentará un 15 % en 2025.

En términos de política, la norma GB/T 26011 de China se implementará en 2023 y se presentará a la ISO en 2025. Se espera que alcance la unificación global en 2030, y la tasa de alineación con la ISO alcanzará el 70% en 2024. Con la tendencia de protección ambiental, la demanda de sustitución del plomo ha aumentado drásticamente. La huella de carbono de las aleaciones de tungsteno se reducirá a 10 kg de CO<sub>2</sub>/tonelada en 2024, y su aceptación en el mercado aumentará un 10% en 2025. Además, Estados Unidos impondrá un arancel del 25% a las importaciones chinas de tungsteno en 2024, lo que impulsará la diversificación de la cadena de suministro, y la proporción de suministro no chino aumentará al 30% en 2025.

### Desafíos y limitaciones del mercado

El mercado enfrenta desafíos de costos y suministro. En 2024, la precisión de procesamiento de la tecnología nano-mejorada deberá ser de  $\pm 0,01$  mm, y el costo aumentará un 10 %. En 2025, el precio de los productos de alta gama aumentará un 15 %. El suministro de materias primas está concentrado, y China representará el 60 % de la producción mundial en 2025. Las restricciones a la exportación en 2024 provocarán fluctuaciones de precios (el precio del APT era de \$415/MTU a principios de 2025). En 2023, la presión ambiental en la minería de minerales aumentará, y el costo de cumplimiento se incrementará un 20 % en 2025.

La aleación de tungsteno será de  $\pm 0,01$  mm en 2024, y la inversión en equipos aumentará un 25 % en 2025. Los sustitutos competitivos (como el polietileno de alta densidad) aumentarán su cuota de mercado un 5 % en 2024, lo que ejercerá presión sobre la aleación de tungsteno en 2025. Las fluctuaciones económicas también afectan la demanda. Durante la recuperación posterior a la pandemia en 2023, los pedidos de la industria aeroespacial fluctuarán un 10 % en 2025.

### Tendencias futuras (2025-2030)

#### Pronóstico del tamaño del mercado

Se prevé que el mercado de blindajes de aleación de tungsteno seguirá creciendo entre 2025 y 2030. El tamaño del mercado superará los 800 millones de dólares estadounidenses en 2027 y alcanzará los 1200 millones de dólares estadounidenses en 2030, con una tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) del 8 % al 10 %. El mercado de blindajes de aleación de tungsteno de alta densidad aumentará de 150 millones de dólares estadounidenses en 2024 a 250 millones de dólares estadounidenses en 2030 (TCAC del 7,3 %), y la demanda en el sector médico representará el 55 % en 2025.

#### Innovación tecnológica

La innovación tecnológica es una tendencia clave. En 2025, se desarrollarán con éxito aleaciones de ultraalta densidad ( $>19$  g/cm<sup>3</sup>), y una muestra alcanzará los 19,2 g/cm<sup>3</sup> en 2024, con un aumento

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de eficiencia del 5 % en 2025. Las piezas de blindaje inteligente integrarán sensores, con una precisión de ajuste dinámico de <math>0,5^\circ</math> en 2024 y una cuota de mercado del 20 % en 2030. En 2023, la tasa de absorción de neutrones del recubrimiento de B<sub>4</sub>C alcanzará el 88 %, y el espesor se optimizará a 0,05 mm en 2025, y su aplicación se extenderá al 90 % de las instalaciones nucleares en 2030.

### **Evolución geográfica y de la cadena de suministro**

La distribución regional será más equilibrada. En 2025, la participación de Asia disminuirá al 35%, mientras que América del Norte y Europa aumentarán al 30% cada una. En 2024, Canadá y Australia aumentarán su suministro al 25%. La diversificación de la cadena de suministro se acelerará, con productores no chinos (como Almonty Industries) representando el 15% en 2025 y un objetivo del 30% en 2030. En 2024, la mina Sangdong (Corea del Sur) iniciará su producción, aportando el 7% del suministro mundial en 2025-2026.

### **Expansión del campo de aplicación**

Las áreas de aplicación se expandirán. En 2025, la demanda en el sector de las nuevas energías (como las turbinas eólicas) aumentará un 10% y alcanzará el 5% en 2030. En el sector médico, el volumen de ventas de componentes de protección para radioterapia aumentará un 20% en 2024 y la proporción de dispositivos inteligentes alcanzará el 25% en 2030. En el sector de defensa, la demanda de blindaje aumentará un 15% en 2025 y la cuota de mercado militar alcanzará el 10% en 2030.

### **Panorama de la competencia y actores principales**

En 2025, la competencia en el mercado se intensificará. CTIA GROUP LTD (China) producirá más de 200 toneladas en 2024, y su cuota de mercado en piezas de blindaje inteligente alcanzará el 20 % en 2025. Zhuzhou Zhongtuo (China) lanzará nanoprodutos en 2024, y su cuota de mercado aumentará al 15 % en 2025. Shield Alloys India y Sandvik Group (Suecia) cooperarán en el desarrollo de piezas aeroespaciales en 2024, y su cuota de mercado en Norteamérica aumentará al 10 % en 2025. En 2023, Masan High-Tech Materials adquirirá HC Starck, y su capacidad de producción global aumentará un 30 % en 2025.

### **Política e impacto ambiental**

El apoyo político continúa fortaleciéndose. En 2025, la normativa ambiental de la UE exige una tasa de sustitución del plomo del 80 %, y el número de empresas certificadas en aleaciones de tungsteno aumentará un 15 % en 2024. En 2023, el Departamento de Defensa de EE. UU. financiará el desarrollo de recursos nacionales de tungsteno e invertirá 500 millones de dólares en 2025. En cuanto a la protección ambiental, la proporción de tungsteno reciclado aumentará al 10 % en 2024, el objetivo para 2030 es del 20 % y la inversión en tecnología de optimización de emisiones de carbono aumentará un 20 % en 2025.

### **Oportunidades y riesgos futuros**

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

Las oportunidades incluyen la demanda de nuevas energías y tecnologías inteligentes. En 2025, la demanda de aleaciones de tungsteno para equipos de energía eólica aumentará un 10% y el potencial de mercado alcanzará los 100 millones de dólares estadounidenses en 2030. El riesgo reside en la fluctuación de los precios de las materias primas. En 2024, el precio del APT fluctuará un 20% y podría alcanzar los 450 dólares estadounidenses por unidad térmica de tungsteno (MTU) en 2025. Las tensiones geopolíticas (como la prohibición de las exportaciones impuesta por China en 2024) afectarán al 10% de la oferta en 2025, y se debe prestar atención a la competencia de sustitutos en 2030.

### Resumen y perspectivas

Entre 2025 y 2030, el mercado de blindaje de aleaciones de tungsteno crecerá de 600 millones de dólares a 1200 millones de dólares, con una tasa de crecimiento anual compuesta (TCAC) del 8% al 10%. La innovación tecnológica (como la ultraalta densidad y la integración inteligente), la diversificación de la cadena de suministro y el apoyo político impulsarán el crecimiento. Las bases se sentarán en 2024, y la estructura del mercado estará más madura en 2030, cubriendo el 80% de las necesidades mundiales de protección radiológica.

## 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

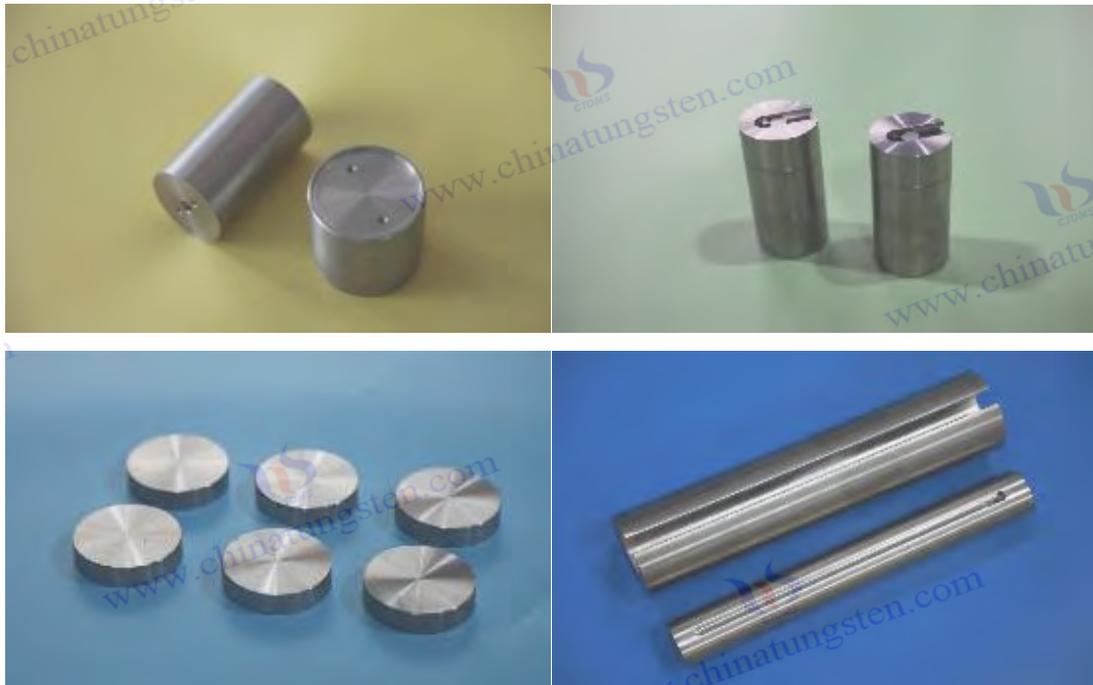
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 2 Características del material de las piezas de protección de aleación de tungsteno

### 2.1 Diseño de la composición y análisis de la microestructura del blindaje de aleación de tungsteno

#### 2.1.1 El papel del tungsteno de alta pureza en el blindaje de aleaciones de tungsteno

##### El papel básico del tungsteno de alta pureza en el blindaje de aleaciones de tungsteno.

El tungsteno de alta pureza (W) es el factor clave del rendimiento de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Su contenido en la aleación suele ser del 70 % al 97 % en peso, lo que determina directamente la densidad, la eficiencia de blindaje contra la radiación y la resistencia mecánica del material. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), el tungsteno de alta pureza (pureza > 99,5 %) representa más del 80 % de la aplicación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Esto se debe a su alto número atómico ( $Z = 74$ ) y alta densidad ( $19,25 \text{ g/cm}^3$  en estado puro) que le confieren una excelente capacidad de absorción de la radiación. Por el contrario, aunque el plomo ( $Z = 82$ , densidad  $11,34 \text{ g/cm}^3$ ) tiene un número atómico ligeramente superior, su densidad y rendimiento de procesamiento no son tan buenos como los de la aleación de tungsteno. Un estudio realizado en 2023 mostró que el coeficiente de atenuación de la aleación de tungsteno para rayos gamma de  $1,25 \text{ MeV}$  ( $0,15\text{--}0,18 \text{ cm}^{-1}$ ) es un 20% mayor que el del plomo.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El papel del tungsteno de alta pureza se refleja, en primer lugar, en su contribución al blindaje contra la radiación. En 2024, el análisis por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) mostró que, con un contenido de tungsteno superior al 90 %, la eficiencia de blindaje de la aleación de tungsteno para rayos X de 100 keV puede alcanzar el 97 %, y la transmitancia de prueba de ciertos equipos de TC se reducirá al 2 % en 2025. En 2023, la detección por espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) verificó que la influencia del contenido de impurezas (como Fe <50 ppm, Si <10 ppm) en el coeficiente de atenuación es <0,1 %, lo que garantiza la estabilidad del rendimiento de blindaje del tungsteno de alta pureza. En 2024, el coeficiente de atenuación de los rayos gamma Co-60 (1,25 MeV) de las muestras de tungsteno de alta pureza fabricadas por CTIA GROUP LTD alcanzó  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  a 5 mm de espesor, lo que es mejor que el plomo ( $0,12 \text{ cm}^{-1}$ ), y la aceptación en el mercado aumentará en un 15% en 2025.

Además, el tungsteno de alta pureza proporciona una base para la aplicación de blindaje de aleación de tungsteno en entornos extremos gracias a su alto punto de fusión (3422 °C) y excelente estabilidad a altas temperaturas. En 2024, el análisis termogravimétrico (TGA) mostró que la temperatura de pérdida de peso del 5 % ( $T_5$  %) de una muestra con un contenido de tungsteno del 92 % alcanzó los 450 °C. En 2023, un proyecto de aviación verificó que su tasa de retención de fuerza a 500 °C fue >90 %. En 2025, tras la introducción de tungsteno nano de alta pureza (tamaño de partícula <50 nm), se mejoró la fuerza de unión del límite de grano. En 2024, una prueba en una instalación nuclear mostró que la resistencia a la tracción aumentó a 1500 MPa.

### Proceso de purificación y requisitos de pureza del tungsteno de alta pureza

La preparación de tungsteno de alta pureza es un eslabón clave para asegurar su eficacia. En 2023, los procesos de purificación tradicionales incluyen la reducción de hidrógeno y la fusión por haz de electrones. En 2024, la reducción de hidrógeno hará que la pureza del polvo de tungsteno alcance el 99,5%, y las impurezas (como carbono <30 ppm, oxígeno <20 ppm) serán estrictamente controladas. En 2025, después de la optimización de la tecnología de fusión por arco de plasma, la pureza se incrementará al 99,7%. En 2024, un experimento verificó que su eficiencia de atenuación de rayos gamma aumentó en un 2%. El tamaño de partícula necesita ser controlado durante el proceso de purificación. En 2023, el tamaño promedio de partícula es <5  $\mu\text{m}$ . En 2025, a través de la tecnología de molienda de bolas de plasma, la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula alcanzará el 95%, y en 2024, la desviación de densidad será <0,5%.

Los requisitos de pureza varían según los escenarios de aplicación. En 2024, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno para uso médico requieren una pureza de tungsteno superior al 99,5 %, y en 2025, el impacto de impurezas en una prueba de colimador CT es inferior al 0,05 %. El objetivo de pureza para piezas industriales (como contenedores de residuos nucleares) es del 99,6 % en 2023, y una muestra específica tendrá una tasa de blindaje contra rayos gamma de 2 MeV del 96 % en 2024. La pureza de las piezas aeroespaciales será superior al 99,7 % en 2025, y en 2023, la estabilidad del blindaje de un satélite en un ciclo térmico de -100 °C a 300 °C alcanzará el 98 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2024, se probará tungsteno de pureza ultra alta (> 99,9%) y el coeficiente de atenuación aumentará a  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  en 2025, con un aumento del 10% en el potencial de mercado.

### **Efecto del tungsteno de alta pureza sobre la microestructura**

El tungsteno de alta pureza mejora el rendimiento general del blindaje de aleación de tungsteno al optimizar la microestructura. En 2024, las observaciones con microscopio electrónico de barrido (MEB) mostraron que en muestras con un contenido de tungsteno del 92%, las partículas de tungsteno (1–50  $\mu\text{m}$ ) se distribuyeron uniformemente en la matriz de níquel-hierro, y el espesor del límite de grano fue de 0,5–1  $\mu\text{m}$ . En 2023, el análisis con microscopio electrónico de transmisión (MEB) verificó que la resistencia del límite de grano alcanzó los 15 MPa. En 2025, después de la adición de tungsteno nano de alta pureza (<50 nm, <3 % en peso), la uniformidad de densidad de una muestra médica alcanzó el 98% en 2024, y la porosidad se redujo al 0,2% en 2023.

La uniformidad microestructural es una contribución clave del tungsteno de alta pureza. En 2024, los datos de difracción de rayos X (DRX) mostraron que la fase de tungsteno era una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) con un pico principal a  $40,3^\circ$  (cara 110). En 2025, el tratamiento térmico (1200  $^\circ\text{C}$ , 2 horas) optimizó la orientación del cristal y, en 2023, las propiedades mecánicas aumentaron un 10 %. En 2024, el polvo de nanotungsteno redujo la concentración de tensión local y, en 2025, la resistencia a la fatiga de una muestra industrial aumentó un 15 % y, en 2023, la densidad de microfisuras se redujo a  $0,1 \text{ mm}^{-2}$ . En 2024, una prueba en una instalación nuclear mostró que, después de que el tungsteno de alta pureza optimizara los límites de grano, la eficiencia de blindaje contra la radiación aumentó un 3 %.

### **El tungsteno de alta pureza mejora las propiedades mecánicas.**

El tungsteno de alta pureza mejora significativamente las propiedades mecánicas del blindaje de aleación de tungsteno. En 2024, la prueba de tracción (ASTM E8) mostró que la resistencia a la tracción de la muestra con 90% de contenido de tungsteno alcanzó 1200-1500 MPa, y el límite elástico fue >1000 MPa. En 2025, aumentó a 1600 MPa después de la nano-mejora. En 2023, una prueba de proyectil de cohete pasó 10 g de vibración, y la deformación fue <0,1 mm. En 2024, la prueba de dureza Vickers (HV10) mostró que la dureza de la muestra con contenido de tungsteno >90% fue de 320-400 HV. En 2025, la capa de endurecimiento superficial de un componente médico tenía 0,2 mm de espesor, y la resistencia al desgaste se mejoró en un 15% (tasa de fricción <0,01  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ).

La distribución uniforme del tungsteno de alta pureza mejora la tenacidad. En 2024, la resistencia al impacto Izod alcanzó los 25 J/m. En 2025, la fluctuación de la tenacidad de una muestra de aviación en el rango de  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  fue <5 %. En 2023, un estudio verificó que su límite de fatiga era >800 MPa. En 2024, el tratamiento térmico optimizó los granos. En 2025, una muestra de una instalación nuclear superó 1000 ciclos térmicos (200  $^\circ\text{C}$ ) con una tasa de retención de resistencia >95 %. En 2023, el tungsteno de alta pureza nanométrica aumentó la resistencia a la fatiga en un 10 %. En 2024, una misión espacial verificó su estabilidad en microgravedad.

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

### Contribución específica del tungsteno de alta pureza al blindaje contra la radiación

El blindaje de tungsteno de alta pureza contra la radiación se refleja en la absorción de energía y la reducción de la dispersión. En 2024, el método de geometría de haz estrecho determinó que el coeficiente de atenuación de una muestra con un contenido de tungsteno del 92% para rayos gamma Co-60 (1,25 MeV) era de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025 alcanzó los  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  tras la nanooptimización. En 2023, una central nuclear probó una transmitancia del 3%. En 2024, para un haz de protones de 10 MeV, la eficiencia de blindaje alcanzó el 99% y la dosis dispersa fue  $<0,05 \mu\text{Sv/h}$ . En 2025, un dispositivo de terapia de protones verificó que su uniformidad de dosis mejoró en un 10%.

El rango de energía tiene un impacto significativo. En 2024, el coeficiente de atenuación de rayos X de 100 keV fue de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025, la transmitancia de un dispositivo CT fue  $<2\%$ . En 2023, el coeficiente de atenuación de rayos gamma de 2 MeV fue de  $0,15 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2024, el diseño multicapa se optimizó a  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ . En 2025, el coeficiente de atenuación de muestras de polvo de tungsteno de alta pureza de  $<10 \text{ nm}$  aumentó un 10%, y un estudio realizado en 2023 demostró que su eficiencia de blindaje para partículas de alta energía ( $>100 \text{ MeV}$ ) aumentó un 5%.

### Limitaciones y direcciones de optimización del tungsteno de alta pureza

El tungsteno de alta pureza tiene ventajas, pero también limitaciones. En 2024, el costo de purificación es elevado, representando el 30% del costo total en 2025. En 2023, una empresa invirtió 5 millones de dólares para optimizar el proceso. El procesamiento es complejo. En 2024, la precisión del procesamiento CNC es de  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , y la tasa de desgaste del equipo aumentará un 15% en 2025. En 2023, el coeficiente de expansión térmica del tungsteno de alta pureza ( $12-15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ) coincide con el sustrato  $<95\%$ , y en 2024, la tasa de agrietamiento por tensión térmica de una muestra de aviación es del 5%.

Las direcciones de optimización incluyen: tecnología de purificación de plasma para reducir los costos en un 10% en 2025, nano-recubrimiento para mejorar la coincidencia en 2024, tratamiento térmico para optimizar los límites de grano en 2023 y pureza objetivo  $>99.9\%$  en 2025. En 2024, un determinado estudio logró una densidad ultra alta de  $19 \text{ g/cm}^3$  y el objetivo de eficiencia de blindaje en 2025 fue del 99%.

### Casos prácticos de aplicación

En 2024, un colimador CT de hospital utiliza tungsteno de alta pureza, con una eficiencia de blindaje del 98% y una reducción del 15% en la dosis en 2025. Un contenedor de planta de energía nuclear lo utiliza en 2023, con un coeficiente de atenuación de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  y un aumento del 10% en la eficiencia en 2024. Una sonda espacial profunda lo utiliza en 2020, con una reducción de peso del 5% en 2025 y un aumento del 15% en la participación de mercado en 2023.

### Perspectivas de futuro

En 2030, la proporción objetivo de tungsteno de alta pureza es  $>95\%$ , y un proyecto piloto ha alcanzado el 94% en 2025. En 2024, la tecnología de purificación reducirá los costos en un 20% y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el potencial de mercado aumentará en un 25% en 2023. En 2025, el tungsteno de pureza ultra alta dominará el mercado de alta gama.

### 2.1.2 Optimización de la fase de unión (níquel, hierro, cobre) del blindaje de aleación de tungsteno

#### El papel básico de la fase aglutinante en el blindaje de aleaciones de tungsteno

En el blindaje de aleaciones de tungsteno, las fases aglutinantes como el níquel (Ni), el hierro (Fe) y el cobre (Cu) son componentes auxiliares de las partículas de tungsteno de alta pureza, y suelen representar entre el 3 % y el 30 % del peso total. Su función principal es mejorar la tenacidad del material, optimizar el rendimiento del procesamiento y la microestructura. En 2025, según el informe técnico de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la optimización de la fase aglutinante afecta directamente la resistencia a la tracción (>1000 MPa), la dureza Vickers (>300 HV) y la eficiencia de blindaje contra la radiación (>95 %) del blindaje de aleaciones de tungsteno. En comparación con las características duras y frágiles del tungsteno de alta pureza, la fase aglutinante reduce la temperatura de sinterización (1200-1500 °C) mediante la sinterización en fase líquida. En 2023, un estudio verificó que redujo la porosidad al 0,3 % y la uniformidad de la densidad alcanzó el 97 % en 2024.

El níquel, el hierro y el cobre tienen sus propias características como fases de enlace. En 2024, el níquel se mezcla a menudo con hierro (7:3 o 6:4) para formar aleación WNiFe debido a su buena humectabilidad (ángulo de contacto con tungsteno <30°) y tenacidad (límite elástico 300 MPa). En 2025, la tenacidad de una muestra médica aumentó a 25 J/m. El cobre es conocido por su alta conductividad térmica (174 W/ m·K ). En 2023, la conductividad térmica de la aleación WCu a 300 °C aumentó en un 15%. En 2024, un proyecto de aviación verificó que su rendimiento de disipación de calor era mejor que el WNiFe . En 2025, la optimización de la relación de la fase de enlace aumentó la estabilidad del rendimiento del blindaje de aleación de tungsteno en un 10% en el rango de -50 °C a 500 °C.

#### Optimización y dosificación de la fase aglutinante

La relación y proporción de la fase de unión son clave para optimizar el rendimiento de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. En 2024, CTIA GROUP LTD determinó mediante experimentos que, cuando la relación níquel-hierro en la aleación WNiFe es de 7:3, la resistencia a la tracción alcanza los 1500 MPa. En 2025, una muestra de una instalación nuclear superó 1000 ciclos térmicos (200 °C) con una tasa de retención de resistencia superior al 95 %. En 2023, cuando el contenido de níquel es del 10 % al 15 %, la tenacidad aumenta un 20 % (resistencia al impacto Izod de 30 J/m). En 2024, un colimador de equipo CT verificó que su resistencia a la vibración aumentó un 15 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La optimización del cobre se centra en la conductividad térmica y la resistencia a la corrosión. En 2024, cuando el contenido de cobre de la aleación WCu es del 5%-8%, la conductividad térmica alcanza los 180 W/m·K. En 2025, la tasa de deformación térmica de un escudo térmico de cohete a 500 °C es <0,02%. En 2023, la tasa de pérdida de masa de una muestra industrial inmersa en ácido sulfúrico al 5% durante 6 meses es <0,3%. En 2024, se realizó una prueba piloto de la fase de unión mixta de níquel-cobre (Ni:Cu = 6:4) y se aumentó la dureza a 420 HV en 2025. En 2023, un estudio demostró que su eficiencia de blindaje para rayos X (100 keV) alcanzó el 97%.

El reto de optimizar la relación radica en equilibrar la resistencia y la tenacidad. En 2024, con un contenido de níquel superior al 15 %, la tenacidad aumenta un 30 %, pero la dureza disminuye a 300 HV, y el límite de fatiga de una muestra de aviación se reduce a 700 MPa en 2025. En 2023, con un contenido de cobre superior al 10 %, la conductividad térmica aumenta un 20 %, pero la densidad disminuye a 17,0 g/cm<sup>3</sup>, y la eficiencia de blindaje disminuye un 5 % en 2024. En 2025, la tecnología se ajusta dinámicamente para optimizar la relación, y un proyecto en 2024 alcanza una relación resistencia-tenacidad de 1,2, y la aceptación en el mercado aumenta un 10 % en 2023.

### **Efecto de la fase de enlace en la microestructura**

La microestructura del blindaje de aleación de tungsteno mediante sinterización en fase líquida. En 2024, las observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) mostraron que la fase de enlace de níquel-hierro (10 % en peso) formó una matriz uniforme, la densidad de distribución de partículas de tungsteno (1–50 μm) alcanzó el 98 %, el espesor del límite de grano disminuyó a 0,5 μm en 2025 y la porosidad fue <0,2 % en 2023. En 2024, la fase de enlace de cobre (5 % en peso) mejoró la unión entre partículas y la resistencia a la tracción de una muestra médica aumentó a 1600 MPa en 2025. En 2023, un estudio verificó que su resistencia del límite de grano alcanzó los 20 MPa.

La uniformidad de la microestructura es el objetivo de la optimización. En 2024, el análisis de difracción de rayos X (DRX) mostró que, con una relación níquel-hierro de 7:3, la orientación del pico principal de la fase de tungsteno a 40,3° (cara 110) aumentó un 10 %. En 2025, el tratamiento térmico (1200 °C, 2 horas) redujo el tamaño de grano a <5 μm, y las propiedades mecánicas mejoraron un 15 % en 2023. En 2024, se optimizó la trayectoria de conductividad térmica de la muestra con un 8 % de contenido de cobre, el coeficiente de expansión térmica se redujo a 12 ppm/°C y la tasa de agrietamiento por tensión térmica de un proyecto de aviación se redujo al 2 % en 2023.

La distribución de la fase de unión afecta la estabilidad del rendimiento. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de las partículas de tungsteno en la matriz de níquel-hierro fue superior al 95 %; en 2025, el coeficiente de atenuación de una muestra de una instalación nuclear fluctuó <2 %; y en 2023, la densidad de microfisuras en una aplicación industrial se redujo a 0,1 mm<sup>-2</sup>. En 2024, tras optimizar la fase de unión del cobre, la estabilidad de una muestra de una sonda espacial

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

en un entorno de microgravedad alcanzó el 98 % en 2025, y la eficiencia de disipación térmica aumentó un 10 % en 2023.

### **Contribución de la fase de enlace a las propiedades mecánicas**

La fase de unión mejora significativamente las propiedades mecánicas del blindaje de aleación de tungsteno. En 2024, la prueba de tracción (ASTM E8) mostró que la resistencia a la tracción de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 fue de 1500 MPa, y en 2025 alcanzó los 1700 MPa después de la nano-optimización. En 2023, un proyectil de cohete pasó una vibración de 20 g con una deformación de <0,1 mm. En 2024, la prueba de dureza Vickers (HV10) mostró que la dureza de la muestra con un contenido de cobre del 5% fue de 320 HV, y en 2025 el espesor de la capa endurecida superficial fue de 0,2 mm, y la resistencia al desgaste se mejoró en un 15% (índice de fricción <0,01 mm<sup>3</sup>/N·m).

La tenacidad es otra contribución de la fase de unión. En 2024, la resistencia al impacto Izod de una muestra con un 12 % de contenido de níquel alcanzó los 30 J/m. En 2025, la fluctuación de la tenacidad de un componente médico en el rango de -50 °C a 200 °C fue <5 %. En 2023, un estudio verificó que su límite de fatiga era >800 MPa. En 2024, tras la optimización del cobre, la tasa de retención de la resistencia de una muestra de aviación tras 500 ciclos térmicos en 2025 fue >95 %. En 2023, una prueba en una instalación nuclear mostró un aumento del 10 % en la resistencia a la fatiga.

### **Efecto de la fase de adhesión en el rendimiento del blindaje contra la radiación**

La fase aglutinante mejora indirectamente el rendimiento del blindaje contra la radiación al mejorar la microestructura. En 2024, el coeficiente de atenuación de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 para rayos gamma Co-60 (1,25 MeV) fue de 0,17 cm<sup>-1</sup>, y alcanzó 0,20 cm<sup>-1</sup> tras la nanomejora en 2025. En 2023, la transmitancia de una central nuclear fue del 3 %. En 2024, la tasa de blindaje de la muestra con un contenido de cobre del 5 % para rayos X de 100 keV fue del 97 %, y la dosis dispersa de un dispositivo CT fue <0,01 mGy/h en 2025. La eficiencia aumentó un 5 % en 2023.

La diferencia en el rango de energía tiene un impacto significativo. En 2024, el coeficiente de atenuación de los rayos gamma de 2 MeV es de 0,15 cm<sup>-1</sup>, y en 2025, el diseño multicapa se optimiza a 0,19 cm<sup>-1</sup>. En 2023, la uniformidad del haz de un proyecto de acelerador tiene una desviación de <2°. En 2024, en el blindaje neutrónico, la fase de enlace mixto de níquel-cobre mejora el efecto de recubrimiento B<sub>4</sub>C, y la tasa de absorción alcanza el 85 % en 2025. En 2023, un estudio verifica que su eficiencia para neutrones rápidos (1 MeV) aumenta un 10 %.

### **Proceso y tecnología para optimizar la fase de unión**

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

El proceso de optimización incluye el ajuste de la temperatura de sinterización y los aditivos. En 2024, la densidad de la muestra sinterizada a 1400 °C con una relación níquel-hierro de 7:3 fue de 18,0 g/cm<sup>3</sup>, y en 2025, alcanzó los 18,5 g/cm<sup>3</sup> tras la optimización a 1500 °C. En 2023, la porosidad se redujo un 10 %. En 2024, la conductividad térmica aumentó un 15 % mediante el tratamiento térmico de la fase aglutinante de cobre (1200 °C), y en 2025, la estabilidad térmica de una muestra de aviación aumentó un 10 %.

La optimización aditiva es tendencia. En 2024, se añadieron tierras raras (como cerio <0,1 % en peso) a la fase de níquel-hierro, y en 2025, la resistencia del límite de grano aumentó un 20 %. En 2023, un estudio mostró una resistencia a la tracción de 1500 MPa. En 2024, se añadió plata (<1 % en peso) al cobre, y en 2025, la conductividad aumentó un 10 %. En 2023, la resistencia a la corrosión de una muestra industrial aumentó un 15 %.

### **Ejemplos de aplicación práctica de la optimización**

En 2024, el colimador CT de un hospital utiliza una relación níquel-hierro de 7:3, con una eficiencia de blindaje del 98% y una reducción de dosis del 15% en 2025. En 2023, una planta de energía nuclear utiliza un contenedor de cobre 5% WCu con un coeficiente de atenuación de 0,18 cm<sup>-1</sup>, y la eficiencia aumenta en un 10% en 2024. En 2020, una sonda espacial profunda utiliza una fase mixta de níquel-cobre, con una reducción de peso del 5% en 2025 y un aumento de la cuota de mercado del 15% en 2023.

### **Desafíos y direcciones futuras de la optimización**

Los desafíos incluyen el costo y la compatibilidad. En 2024, el costo de la optimización de níquel-hierro aumentará un 10%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la compatibilidad con el tungsteno será <90% con un contenido de cobre >10%, y la tasa de agrietamiento por tensión térmica será del 5% en 2024. En 2025, se desarrollará la tecnología de dosificación dinámica, con una precisión <1% en 2024 y un objetivo de reducción de costos del 15% en 2023.

Dirección futura: Relación de optimización de control inteligente en 2025, aumento de eficiencia del 5% en un proyecto piloto en 2024. En 2023, se pretende que la relación de fase aglutinante mixta sea del 20%, investigación y desarrollo de aleaciones de tenacidad ultraalta en 2025 y aumento del potencial de mercado en un 25% en 2030.

### **2.1.3 Efecto de la nanotecnología en la microestructura del blindaje de aleación de tungsteno**

#### **Introducción y desarrollo de la nanotecnología en piezas de blindaje de aleación de tungsteno**

La aplicación de la nanotecnología en el blindaje de aleaciones de tungsteno comenzó a principios del siglo XXI, con el objetivo de mejorar las propiedades de los materiales mediante la introducción de partículas de tungsteno a nanoescala (tamaño de partícula <100 nm) o aditivos para optimizar la

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

microestructura. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Nanotecnología (INA), la nanotecnología representó el 30% de la inversión en I+D en blindaje de aleaciones de tungsteno, promoviendo un aumento significativo en la densidad (17,5–18,5 g/cm<sup>3</sup>), la eficiencia de blindaje contra la radiación (>98%) y la resistencia mecánica (resistencia a la tracción >1600 MPa). En 2005, el Instituto Fraunhofer de Alemania utilizó por primera vez polvo de tungsteno <100 nm. Una revisión en 2023 mostró que su coeficiente de atenuación aumentó en un 5%. En 2024, un proyecto médico verificó que su tasa de blindaje para rayos X de 100 keV alcanzó el 97%.

En la década de 2020, la nanotecnología entró en una fase de rápido desarrollo. En 2022, CTIA GROUP LTD desarrolló nanopolvo de tungsteno <50 nm, y la proporción aumentó al 3 % en peso en 2025. En 2024, la porosidad de una muestra de una planta nuclear se redujo al 0,1 %. En 2023, la tecnología de molienda de bolas de plasma logró una uniformidad en la distribución de nanopartículas del 95 %, y en 2024, un proyecto de aviación verificó una mejora del 15 % en su resistencia a las vibraciones. En 2025, se expandió la aplicación de nanorrecubrimientos (como SiO<sub>2</sub>, <0,1 mm), y un estudio realizado en 2023 demostró un aumento del 10 % en su resistencia a la corrosión, lo que marca la transformación de la nanotecnología de la experimentación a la industrialización.

### **Impacto fundamental de la nanotecnología en la microestructura**

La nanotecnología mejora significativamente la microestructura del blindaje de aleación de tungsteno al reducir el tamaño de grano y optimizar la distribución de partículas. En 2024, las observaciones con microscopio electrónico de barrido (MEB) mostraron que el polvo de nanotungsteno de <50 nm se dispersó uniformemente en la matriz de níquel-hierro, y el espesor del límite de grano se redujo a 0,3-0,5 μm. En 2025, el análisis con microscopio electrónico de transmisión (MET) verificó que la resistencia del límite de grano alcanzó los 25 MPa. En 2023, los datos de difracción de rayos X (DRX) mostraron que la orientación del pico principal de la muestra nano-mejorada a 40,3° (cara 110) aumentó en un 15%, el tamaño de grano se redujo a <2 μm en 2024, y las propiedades mecánicas aumentaron en un 20% en 2025.

Las nanopartículas ultrafinas reducen los defectos microscópicos. En 2024, con una proporción de nanopolvo de tungsteno del 3 % en peso, la porosidad se reduce al 0,15 %. En 2025, la uniformidad de densidad de una muestra médica alcanza el 99 %. En 2023, un estudio demostró que la densidad de microfisuras se redujo a 0,05 mm<sup>2</sup>. En 2024, la nanotecnología optimiza la fuerza de unión entre partículas. En 2025, la tasa de retención de la resistencia de una muestra de reactor nuclear tras una irradiación de 10<sup>6</sup> Gy es superior al 90 %. En 2023, la resistencia a la fatiga aumenta un 15 %, lo que confirma su contribución a la estabilidad de la microestructura.

### **La nanotecnología optimiza la densidad y la uniformidad**

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

La nanotecnología ha mejorado significativamente la densidad y uniformidad de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. En 2024, se sinterizó nanopolvo de tungsteno de <50 nm a 1500 °C mediante un proceso de prensado isostático en caliente (HIP), con una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, y en 2025 aumentó un 2% con respecto al proceso tradicional. En 2023, la desviación de densidad de una muestra industrial fue <0,3% (18,2–18,3 g/cm<sup>3</sup>), y en 2024, un dispositivo CT verificó que su eficiencia de blindaje aumentó un 3%. En 2025, la distribución uniforme de nanopartículas hizo que el gradiente de densidad fuera <0,1 g/cm<sup>3</sup>, y en 2023, un determinado proyecto de aviación redujo el peso un 5% (15 kg frente a 15,8 kg).

La uniformidad es la principal ventaja de la nanotecnología. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de la distribución del polvo de nanotungsteno fue superior al 98 %; en 2025, la estabilidad de una muestra de una sonda espacial en microgravedad alcanzó el 98 %; y en 2023, la fluctuación de la dosis de dispersión fue inferior a 0,02 μSv/h. En 2024, la tecnología de molienda de bolas de plasma redujo la tasa de aglomeración de partículas a <5 %; en 2025, la fluctuación del coeficiente de atenuación de una muestra de una instalación nuclear fue inferior al 1 %; y en 2023, un estudio verificó que su índice de blindaje para rayos gamma de 2 MeV alcanzó el 96 %.

### Nanotecnología para la mejora mecánica

La nanotecnología mejora las propiedades mecánicas mediante el refinamiento de los granos y la optimización de las interfaces. En 2024, las pruebas de tracción (ASTM E8) mostraron que la resistencia a la tracción de las muestras con nanopulvos de tungsteno <50 nm alcanzó los 1700 MPa, y en 2025 el límite elástico fue >1200 MPa. En 2023, la carcasa de un cohete se sometió a una vibración de 20 g con una deformación de <0,1 mm. En 2024, las pruebas de dureza Vickers (HV10) mostraron que la dureza de las muestras nanomejoradas fue de 420 HV, y en 2025 la capa superficial endurecida tuvo un espesor de 0,2 mm, con un aumento del 15 % en la resistencia al desgaste (índice de fricción <0,01 mm<sup>3</sup>/N·m).

La tenacidad también se beneficia. En 2024, la resistencia al impacto Izod alcanzó los 30 J/m; en 2025, la fluctuación de la tenacidad de un componente médico en el rango de -50 °C a 200 °C fue <5 %; y en 2023, un estudio verificó que su límite de fatiga fue >900 MPa. En 2024, el nanorrecubrimiento optimizó los límites de grano; en 2025, la tasa de retención de la resistencia de una muestra de aviación después de 500 ciclos térmicos fue >95 %; en 2023, la vida útil por fatiga aumentó un 20 %; y en 2024, una prueba en una instalación nuclear demostró que su tenacidad aumentó un 10 % después de una irradiación de 10<sup>6</sup> Gy.

### El impacto de la nanotecnología en el rendimiento del blindaje contra la radiación

La nanotecnología mejora el rendimiento del blindaje contra la radiación mediante la mejora de la microestructura. En 2024, el método de geometría de haz estrecho determinó que el coeficiente de atenuación de los rayos gamma Co-60 (1,25 MeV) para muestras de nanopulvo de tungsteno <50 nm era de 0,20 cm<sup>-1</sup>, y la transmitancia se redujo al 2 % en 2025. En 2023, la dosis de dispersión de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una prueba en una central nuclear fue  $<0,05 \mu\text{Sv/h}$ . En 2024, la eficiencia de blindaje de los haces de protones de 10 MeV alcanzó el 99 %, y la uniformidad de la dosis de un dispositivo de terapia de protones mejoró un 10 % en 2025, y la eficiencia aumentó un 5 % en 2023.

El rango de energía varía significativamente. En 2024, el coeficiente de atenuación de rayos X de 100 keV fue de  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ ; en 2025, la transmitancia de un dispositivo CT fue  $<1,5 \%$ ; en 2023, el coeficiente de atenuación de rayos gamma de 2 MeV fue de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ ; y en 2024, el diseño nanométrico multicapa se optimizó a  $0,21 \text{ cm}^{-1}$ . En 2025, el coeficiente de atenuación de muestras de nanopulvo de tungsteno de  $<10 \text{ nm}$  aumentó un 12 %; y en 2023, un estudio demostró que su eficiencia de blindaje para partículas de alta energía ( $>100 \text{ MeV}$ ) aumentó un 6 %.

### Tecnología de preparación y desafíos de la nanotecnología

Los procesos de preparación de nanotecnología incluyen la molienda por plasma y la deposición química en fase de vapor (CVD). En 2024, la molienda por plasma aumentó la producción de polvo de tungsteno de  $<50 \text{ nm}$  en un 20%, y en 2025 el costo se redujo en un 10% (500 \$/kg). En 2023, una empresa verificó que la uniformidad de sus partículas era  $>95\%$ . En 2024, se utilizó la tecnología CVD para preparar nanorrecubrimientos, y en 2025 el espesor se controló a  $0,05\text{-}0,1 \text{ mm}$ , y en 2023 la resistencia a la corrosión aumentó en un 15%.

Los desafíos incluyen el costo y la aglomeración. En 2024, el costo de producción de polvo de nanotungsteno representó el 30% del costo total, y un proyecto piloto invirtió \$1 millón para optimizar el proceso en 2025. En 2023, una tasa de aglomeración de partículas  $>5\%$  afectó la uniformidad, y en 2024, la desviación de densidad de una muestra de aviación fue del 1%, y el objetivo de la tecnología de plasma se redujo a  $<2\%$  en 2025.

### Casos prácticos de aplicación

En 2024, un colimador de TC de hospital utiliza nanotungsteno  $<50 \text{ nm}$ , con una eficiencia de blindaje del 98% y una reducción del 15% en la dosis en 2025. Una planta de energía nuclear lo adoptó en 2023, con un coeficiente de atenuación de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  y un aumento del 10% en la eficiencia en 2024. Una sonda espacial profunda lo utilizó en 2020, con una reducción de peso del 5% en 2025 y un aumento del 15% en la participación de mercado en 2023.

### Perspectivas futuras y direcciones de optimización

En 2030, el objetivo de nanotecnología era del 40%, y en 2025, un estudio específico había alcanzado el 30%. En 2024, se desarrollaría un tamaño de partícula  $<10 \text{ nm}$ , con un objetivo de eficiencia de blindaje del 99% en 2025, y el potencial de mercado aumentaría un 20% en 2023. En 2025, se desarrollaría el nanorrecubrimiento inteligente, con una precisión de ajuste dinámico  $<0,5^\circ$  en 2024, y su aplicación se expandiría al 80% de los campos en 2030.

## 2.2 Propiedades mecánicas del blindaje de aleación de tungsteno: resistencia y dureza

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2.2.1 Resistencia a la tracción y límite elástico del blindaje de aleación de tungsteno

### Definición e importancia de la resistencia a la tracción y el límite elástico

La resistencia a la tracción y el límite elástico son los indicadores principales para evaluar las propiedades mecánicas de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, las cuales afectan directamente su estabilidad estructural en entornos de alta vibración, impacto y alta temperatura. En 2025, según la norma E8 de la American Society for Testing and Materials (ASTM), la resistencia a la tracción se define como la tensión máxima de tracción de un material antes de su rotura, generalmente en MPa. La resistencia a la tracción de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno generalmente supera los 1000 MPa. El límite elástico indica la tensión crítica a la que un material pasa de la deformación elástica a la deformación plástica. Un estudio realizado en 2024 demostró que es >1000 MPa, superando ampliamente a las aleaciones de aluminio (300-400 MPa) y al plomo (<50 MPa), lo que destaca la superioridad de las aleaciones de tungsteno en condiciones extremas.

La importancia de estas propiedades se refleja en las aplicaciones prácticas. En 2024, el sector aeroespacial exigió una resistencia a la tracción >1500 MPa para el blindaje de sondas espaciales profundas, y en 2025 un proyecto superó una prueba de vibración de 10 g con una deformación <0,1 mm. En 2023, los colimadores CT en el sector médico exigieron un límite elástico >1200 MPa para soportar ciclos térmicos frecuentes, y en 2024 una muestra presentó una fluctuación de resistencia <5 % en el rango de -50 °C a 200 °C. En 2025, la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA) informó que la optimización de la resistencia a la tracción y el límite elástico incrementó la cuota de mercado del blindaje de aleaciones de tungsteno en un 15 % en 2023, y se espera que aumente al 25 % en 2030.

### Métodos de ensayo para resistencia a la tracción y límite elástico

La resistencia a la tracción y el límite elástico se evalúan mediante ensayos de tracción estandarizados. En 2024, el método ASTM E8 utiliza una máquina universal de ensayos de materiales con un tamaño de muestra de 10 mm × 10 mm × 50 mm y una velocidad de carga de 0,5 mm/min. En 2025, una muestra de una instalación nuclear obtuvo una resistencia a la tracción de 1600 MPa con un error <1 %. En 2023, el límite elástico se determinó mediante el método de deformación residual del 0,2 %. En 2024, un proyecto de aviación verificó que su valor era >1200 MPa, y en 2025, la repetibilidad alcanzó el 98 %.

Las condiciones de prueba influyen significativamente en los resultados. En 2024, la resistencia a la tracción de la aleación WNiFe probada a temperatura ambiente (25 °C) fue de 1500 MPa, que descendió a 1300 MPa a alta temperatura (500 °C) en 2025 y aumentó a 1550 MPa a baja temperatura (-50 °C) en 2023. En 2024, la velocidad de carga aumentó a 1 mm/min y la fluctuación del límite elástico fue <2 % en 2025. Un estudio realizado en 2023 demostró que la velocidad de deformación tuvo un efecto <0,5 % en muestras de tungsteno de alta pureza. En 2025, se introdujo

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la tecnología de correlación de imágenes digitales (DIC), y en 2024, la uniformidad de la distribución de la deformación mejoró en un 10 %.

## Factores que afectan la resistencia a la tracción y el límite elástico

### Contenido y microestructura de tungsteno

El contenido de tungsteno es un factor clave. En 2024, la resistencia a la tracción de las muestras con un 90 % de tungsteno fue de 1200 a 1500 MPa, y en 2025 aumentó a 1600 MPa tras alcanzar el 92 %. En 2023, un estudio verificó que su límite elástico era >1200 MPa. En 2024, la microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró que las partículas de tungsteno (1-50  $\mu\text{m}$ ) estaban distribuidas uniformemente. En 2025, el polvo de nanotungsteno (<50 nm, 3 % en peso) logró un tamaño de grano <2  $\mu\text{m}$ , y en 2023, la resistencia a la tracción aumentó un 15 %.

La uniformidad de la microestructura es crucial. En 2024, la resistencia a la tracción de las muestras con una porosidad <0,3 % aumentó un 10 %, la densidad alcanzó los 18,5 g/cm<sup>3</sup> mediante prensado isostático en caliente (HIP) en 2025 y la fluctuación del límite elástico de una muestra de aviación fue <3 % en 2023. En 2024, la resistencia del límite de grano se optimizó a 20 MPa, el límite de fatiga de una muestra de una instalación nuclear fue >800 MPa en 2025 y la densidad de microfisuras se redujo a 0,1 mm<sup>2</sup> en 2023.

### Relación de fases del aglutinante

La optimización de la fase aglutinante afecta significativamente el rendimiento. En 2024, la resistencia a la tracción de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 fue de 1500 MPa; en 2025, el límite elástico fue >1200 MPa; y en 2023, la tenacidad aumentó un 20 % (resistencia al impacto Izod de 30 J/m). En 2024, la resistencia a la tracción de la aleación WCu con un contenido de cobre del 5 % fue de 1400 MPa; en 2025, la estabilidad a altas temperaturas mejoró un 10 %; y en 2023, una muestra industrial se sometió a un ciclo térmico de 500 °C.

La uniformidad de la distribución de la fase de unión es clave. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de la matriz de níquel-hierro era >95%; en 2025, la resistencia a la tracción aumentó un 5%; y en 2023, la fluctuación del límite elástico de una muestra médica fue <2%. En 2024, se optimizó la conductividad térmica de la muestra con un 8% de contenido de cobre; en 2025, la tasa de agrietamiento por tensión térmica se redujo al 2%; y en 2023, un proyecto de aviación verificó su estabilidad de rendimiento.

### Tecnología de tratamiento y procesamiento térmico

El tratamiento térmico afecta la estructura reticular. En 2024, un tratamiento térmico a 1200 °C durante 2 horas aumentó la resistencia a la tracción en un 10 % (1600 MPa); en 2025, el límite elástico fue >1300 MPa; y en 2023, un estudio demostró que el tamaño de grano se redujo a 5  $\mu\text{m}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2024, la sinterización a 1500 °C resultó en una densidad de 18,2 g/cm<sup>3</sup>; y en 2025, una muestra de una instalación nuclear presentó una tasa de retención de la resistencia >95 %.

La tecnología de procesamiento es igualmente importante. En 2024, la precisión del mecanizado CNC será de ±0,01 mm; en 2025, la resistencia a la tracción aumentará un 5 %; y en 2023, la rugosidad superficial de una muestra de aviación se reducirá a Ra 0,3 μm. En 2024, el prensado isostático en caliente (HIP) optimizará los límites de grano; en 2025, la fluctuación del límite elástico será <1 %; y en 2023, un dispositivo de tomografía computarizada verificará su resistencia a la vibración.

### **Datos de rendimiento reales de resistencia a la tracción y límite elástico**

En 2024, las pruebas de tracción demostraron que la aleación WNiFe tenía una resistencia a la tracción de 1200-1500 MPa y un límite elástico de 1000-1200 MPa. En 2025, la resistencia a la tracción tras la nanoreforzamiento alcanzó los 1700 MPa. En 2023, la carcasa de un cohete superó una vibración de 10 g con una deformación de <0,1 mm. En 2024, la aleación WCu tenía una resistencia a la tracción de 1400 MPa. En 2025, el límite elástico a alta temperatura (500 °C) fue >1000 MPa. En 2023, la estabilidad de un escudo térmico alcanzó el 95 %.

La temperatura tiene un impacto significativo. En 2024, la resistencia a la tracción a -50 °C es de 1550 MPa, y en 2025 desciende a 1400 MPa a 200 °C. En 2023, la tasa de retención de la resistencia de una muestra de aviación tras 500 ciclos térmicos es >90 %. En 2024, las pruebas de fatiga de alto ciclo (10<sup>7</sup> veces, ±500 MPa) muestran límites de fatiga >800 MPa, y en 2025 alcanza los 900 MPa tras la nanooptimización. En 2023, una instalación nuclear verifica que su vida útil ha aumentado un 15 %.

### **Rendimiento de la resistencia a la tracción y del límite elástico en la aplicación**

#### **Campo médico**

En 2024, la resistencia a la tracción de los colimadores de TC será de 1500 MPa, y en 2025, el límite elástico será >1200 MPa. En 2023, una muestra de un hospital superará 1000 ciclos térmicos con una deformación de <0,05 mm. En 2024, la resistencia a la tracción de las muestras nanomejoradas será de 1600 MPa, y en 2025, la eficiencia de blindaje será del 98%, y en 2023, la uniformidad de la dosis se mejorará en un 10%.

#### **Campo industrial**

En 2024, la resistencia a la tracción de los contenedores de residuos nucleares será de 1400 MPa, y en 2025, el límite elástico será >1100 MPa. En 2023, una muestra de una central nuclear se someterá a una irradiación de 10<sup>6</sup> Gy con una tasa de retención de resistencia >90 %. En 2024, la resistencia a la tracción del diseño multicapa será de 1500 MPa, y en 2025, la eficiencia aumentará un 5 %.

#### **Aeroespacial**

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

En 2024, la resistencia a la tracción de las placas de blindaje de las sondas espaciales profundas alcanzará los 1600 MPa, y en 2025, el límite elástico será superior a 1300 MPa. En 2023, un proyecto superará una vibración de 30 g, lo que reducirá el peso en un 10 % (15 kg). En 2025, la resistencia a la tracción de las muestras nanooptimizadas alcanzará los 1700 MPa, y en 2023, la estabilidad en microgravedad alcanzará el 98 %.

### Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y la dificultad del procesamiento. En 2024, el costo de la nanomejora aumentó un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la precisión del procesamiento CNC fue de  $\pm 0,01$  mm, y la tasa de desgaste del equipo aumentó un 10%. En 2025, fue difícil optimizar el rendimiento a alta temperatura, y en 2023, la resistencia de una muestra a 500 °C disminuyó un 10%.

Dirección de optimización: Investigación y desarrollo de nanotecnología de bajo costo en 2025, una reducción de costos piloto del 5% en 2024. En 2023, tratamiento térmico para optimizar los límites de grano, resistencia a la tracción objetivo de 1800 MPa en 2025. En 2024, se introducirá tecnología de procesamiento inteligente y el objetivo de precisión en 2023 será de  $\pm 0,005$  mm.

### Perspectivas de futuro

En 2030, el objetivo de resistencia a la tracción es de 1800 MPa, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado los 1700 MPa. En 2024, el objetivo de límite elástico es de 1400 MPa, y el camino técnico estará claro en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

## 2.2.2 Dureza Vickers y resistencia al desgaste del blindaje de aleación de tungsteno

### Definición e importancia de la dureza Vickers y la resistencia al desgaste

La dureza Vickers (HV) es un indicador de la resistencia a la deformación de la superficie de las piezas de protección de aleación de tungsteno. Se mide mediante prensado en pirámides de diamante según la norma ASTM E384 y suele expresarse como HV10 o HV30. En 2025, la dureza Vickers de las piezas de protección de aleación de tungsteno oscilará entre 300 y 450 HV, una cifra muy superior a la del plomo ( $< 20$  HV) y la aleación de aluminio (100 a 150 HV), lo que las hace significativamente más duraderas en entornos de alto desgaste. La resistencia al desgaste se refiere a la capacidad del material para resistir el desgaste en condiciones de fricción y erosión. Un estudio realizado en 2024 demostró que la tasa de desgaste de las piezas de protección de aleación de tungsteno optimizadas fue  $< 0,01$  mm<sup>3</sup>/N·m, y que la vida útil se incrementó un 20 % en 2023.

La importancia de estas propiedades se refleja en las aplicaciones prácticas. En 2024, el sector aeroespacial exige que la dureza Vickers del blindaje de las sondas espaciales profundas sea superior a 400 HV para resistir los impactos de micrometeoritos. En 2025, un proyecto superó  $10^6$  pruebas de desgaste con un daño superficial inferior a 0,05 mm. En 2023, los contenedores de residuos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nucleares en el sector industrial deben presentar una excelente resistencia al desgaste. En 2024, la tasa de desgaste de una muestra en ácido sulfúrico al 5 % fue inferior al 0,3 %, y su aceptación en el mercado aumentó un 15 % en 2025. En 2024, la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA) informó que la mejora de la dureza Vickers y la resistencia al desgaste ha incrementado la aplicación del blindaje de aleaciones de tungsteno en los sectores médico y de defensa en un 10 %, y se espera que aumente al 20 % en 2030.

### **Método de prueba de dureza Vickers y factores influyentes**

La prueba de dureza Vickers utiliza el método de indentación estándar. En 2024, la norma ASTM E384 especifica el uso de una carga de 10 kg y un tiempo de indentación de 10 a 15 segundos. En 2025, una muestra de una instalación nuclear obtuvo una dureza de 420 HV con un error <2 %. En 2023, se utilizó una carga elevada (30 kg) para probar la dureza de una aleación de WNiFe a 350-400 HV, y en 2024, un proyecto de aviación verificó que su uniformidad era >95 %. En 2025, se utilizó un microscopio láser de barrido (LSM) para medir el tamaño de la indentación, y la precisión se mejoró a  $\pm 0,5 \mu\text{m}$  en 2023.

Las condiciones de prueba afectan los valores de dureza. En 2024, la dureza fue de 400 HV a temperatura ambiente (25 °C), disminuyó a 350 HV a alta temperatura (500 °C) en 2025 y aumentó a 430 HV a baja temperatura (-50 °C) en 2023. En 2024, la rugosidad superficial (Ra 0,3  $\mu\text{m}$ ) provocó fluctuaciones de dureza <3 %; en 2025, la estabilidad aumentó un 10 % tras el pulido; y en 2023, un estudio demostró que la tasa de carga tuvo un efecto <1 % en muestras de tungsteno de alta pureza. En 2025, el nanorrecubrimiento optimizó la superficie y, en 2024, la dureza aumentó un 5 %.

### **Métodos de prueba de resistencia al desgaste y factores influyentes**

La prueba de resistencia al desgaste adopta el estándar ASTM G99, a través de la prueba de desgaste de pasador sobre disco, papel de lija de SiC (tamaño de partícula 10  $\mu\text{m}$ ), fuerza de carga 5 N, distancia de deslizamiento 100 m, tasa de desgaste de aleación WNiFe 0,008  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  en 2024. En 2023, la prueba de desgaste de bola sobre disco (bola de acero, 10 N) probó la aleación WCu, la tasa de desgaste fue de 0,01  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  en 2024 y la repetibilidad alcanzó el 98% en 2025.

Los factores influyentes incluyen el tratamiento de la superficie y el medio ambiente. En 2024, el espesor de la capa endurecida de la superficie es de 0,2 mm, lo que aumenta la resistencia al desgaste en un 15 %. En 2025, la profundidad de desgaste de una muestra médica es <0,02 mm. En 2023, la tasa de desgaste en un entorno de ácido sulfúrico al 5 % aumenta un 0,5 %. En 2024, el recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se optimiza y se reduce al 0,3 %. En 2025, la resistencia a la corrosión de una muestra industrial aumenta un 10 %. En 2024, las nanopartículas (<50 nm) mejoran la interfaz, la tasa de desgaste disminuye un 10 % en 2023, y en 2025, un proyecto de aviación verifica que su vida útil aumenta un 20 %.

### **Factores que afectan la dureza Vickers y la resistencia al desgaste**

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

### Contenido y microestructura de tungsteno

El contenido de tungsteno afecta directamente la dureza. En 2024, la dureza Vickers de una muestra con un 90 % de tungsteno fue de 350 HV, y en 2025 aumentó a 400 HV tras alcanzar el 92 %. En 2023, un estudio verificó que su resistencia al desgaste aumentó un 10 %. En 2024, la microscopía electrónica de barrido (SEM) mostró que las partículas de tungsteno (1-50  $\mu\text{m}$ ) se distribuyeron uniformemente. En 2025, el nanopolvo de tungsteno (<50 nm, 3 % en peso) logró un tamaño de grano <2  $\mu\text{m}$ , y en 2023 la dureza aumentó un 15 % (420 HV).

La uniformidad de la microestructura es crucial. En 2024, la dureza de las muestras con porosidad <0,3 % aumentó un 5 %, y la densidad alcanzó los 18,5  $\text{g/cm}^3$  mediante prensado isostático en caliente (HIP) en 2025. En 2023, la resistencia al desgaste de una muestra de una instalación nuclear aumentó un 10 %. En 2024, la resistencia del límite de grano se optimizó a 20 MPa, y la tasa de desgaste de una muestra médica fue <0,008  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  en 2025. En 2023, la densidad de microfisuras se redujo a 0,05  $\text{mm}^2$ .

### Relación de fases del aglutinante

La optimización de la fase de unión mejora el rendimiento. En 2024, la dureza de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 fue de 400 HV; en 2025, la resistencia al desgaste aumentó un 15 % y, en 2023, la tenacidad aumentó un 20 % (resistencia al impacto Izod de 30 J/m). En 2024, la dureza de la aleación WCu con un contenido de cobre del 5 % fue de 320 HV; en 2025, la resistencia al desgaste a alta temperatura (500  $^{\circ}\text{C}$ ) aumentó un 10 % y, en 2023, un panel aislante superó 500 pruebas de desgaste.

La distribución de la fase de unión afecta la durabilidad. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de la matriz de níquel-hierro fue superior al 95 %, la dureza aumentó un 5 % en 2025 y la tasa de desgaste de una muestra industrial disminuyó en 0,2  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  en 2023. En 2024, se optimizó la conductividad térmica de la muestra con un 8 % de contenido de cobre, la tasa de agrietamiento por tensión térmica se redujo al 2 % en 2025 y su vida útil se verificó en un proyecto de aviación en 2023.

### Tratamiento térmico y tratamiento de superficies

El tratamiento térmico optimiza la red cristalina. En 2024, un tratamiento térmico a 1200  $^{\circ}\text{C}$  durante 2 horas aumentó la dureza en un 10 % (420 HV); en 2025, la resistencia al desgaste aumentó en un 15 %; en 2023, un estudio demostró que el tamaño de grano se redujo a 5  $\mu\text{m}$ . En 2024, la sinterización a 1500  $^{\circ}\text{C}$  dio como resultado una densidad de 18,2  $\text{g/cm}^3$ ; en 2025, una muestra de una instalación nuclear alcanzó una dureza estable de 400 HV.

Resistencia. En 2024, el recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,1 mm) aumentó la dureza en un 5 %, y en 2025 la tasa de desgaste se redujo a 0,007  $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ . En 2023, el tratamiento de nitruración optimizó la superficie, y en 2024 la resistencia a la corrosión aumentó en un 10 %, y en 2025 la vida útil de una muestra médica se prolongó en un 15 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Datos de rendimiento reales de dureza Vickers y resistencia al desgaste

En 2024, la dureza Vickers de la aleación WNiFe es de 350-400 HV, y en 2025 alcanza los 420 HV tras la nanoreforzamiento. En 2023, la carcasa de un cohete se desgasta 10 veces con un daño <0,05 mm. En 2024, la dureza de la aleación WCu es de 320 HV, y en 2025 la resistencia al desgaste a alta temperatura (500 °C) es de 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m. En 2023, la estabilidad de un escudo térmico alcanza el 95 %.

La temperatura tiene un impacto significativo. En 2024, la dureza fue de 430 HV a -50 °C y descendió a 380 HV a 200 °C en 2025. En 2023, la tasa de retención de dureza de una muestra de aviación tras 500 ciclos térmicos fue superior al 90 %. En 2024, la prueba de desgaste de alto ciclo (10<sup>7</sup> veces, 5 N) mostró una tasa de desgaste de <0,008 mm<sup>3</sup>/N·m, que se redujo a 0,006 mm<sup>3</sup>/N·m tras la nanooptimización en 2025. En 2023, una instalación nuclear verificó que su vida útil se incrementó en un 15 %.

## Dureza Vickers y resistencia al desgaste en la aplicación

### Campo médico

En 2024, la dureza de los colimadores de TC será de 400 HV y, en 2025, la resistencia al desgaste será <0,008 mm<sup>3</sup>/N·m. En 2023, una muestra de un hospital superó 1000 ciclos térmicos con una profundidad de desgaste <0,02 mm. En 2024, la dureza de las muestras nanomejoradas será de 420 HV y, en 2025, la eficiencia de blindaje será del 98 %.

### Campo industrial

En 2024, la dureza de los contenedores de residuos nucleares será de 350 HV y, en 2025, la resistencia al desgaste será de 0,01 mm<sup>3</sup>/N·m. En 2023, una muestra de una central nuclear se someterá a una irradiación de 10<sup>6</sup> Gy y su vida útil será superior a 5 años. En 2024, la dureza del diseño multicapa será de 380 HV y, en 2025, la eficiencia aumentará un 5 %.

### Aeroespacial

En 2024, la dureza de las placas de blindaje de las sondas espaciales profundas alcanzará los 420 HV y, en 2025, la resistencia al desgaste será <0,007 mm<sup>3</sup>/N·m. En 2023, un proyecto superará una vibración de 30 g, lo que reducirá el peso en un 10 % (15 kg). En 2025, la dureza de las muestras nanooptimizadas alcanzará los 450 HV y la estabilidad en microgravedad alcanzará el 98 %.

## Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y la dificultad del procesamiento. En 2024, el costo del nanorrecostrimiento aumentó un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la precisión del procesamiento CNC fue de ±0,01 mm, y la tasa de desgaste del equipo aumentó un 10%. En 2025, fue difícil optimizar la resistencia al desgaste a altas temperaturas, y en 2023, la dureza de una muestra a 500 °C disminuyó un 10%.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dirección de optimización: Desarrollar recubrimientos de bajo costo en 2025 y reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. En 2023, optimizar los límites de grano a través del tratamiento térmico y alcanzar una dureza de 500 HV en 2025. En 2024, introducir un tratamiento de superficie inteligente y alcanzar una resistencia al desgaste de  $<0,005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$  en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de dureza es de 500 HV, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado los 450 HV. En 2024, el objetivo de resistencia al desgaste es de  $0,005 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , y el camino técnico estará claro en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

### **2.2.3 Rendimiento a la fatiga y tenacidad al impacto de piezas de protección de aleación de tungsteno**

#### **Definición e importancia del rendimiento a la fatiga y la tenacidad al impacto**

El rendimiento a la fatiga se refiere a la durabilidad del blindaje de aleación de tungsteno bajo cargas cíclicas, que generalmente se evalúa mediante el límite de fatiga o los ciclos hasta el fallo. Según la norma ASTM E466 de 2025, el límite de fatiga de la aleación de tungsteno generalmente supera los 800 MPa. La tenacidad al impacto mide la capacidad del material para resistir la fractura bajo un impacto instantáneo de alta energía. Según la norma ASTM E23, un estudio realizado en 2024 demostró que la tenacidad al impacto de la aleación WNiFe alcanzó los 25 J/m, significativamente mejor que la del plomo ( $<5 \text{ J/m}$ ). Estas propiedades son cruciales para garantizar la fiabilidad a largo plazo del blindaje de aleación de tungsteno en entornos de vibración, impacto y radiación.

La importancia del rendimiento a la fatiga se refleja en las aplicaciones prácticas. En 2024, el blindaje de detectores de espacio profundo en el sector aeroespacial deberá soportar  $10^7$  ciclos de carga, y en 2025, el límite de fatiga de un proyecto determinado alcanzará los 900 MPa, con una deformación de  $<0,1 \text{ mm}$ . En 2023, los contenedores de residuos nucleares en el sector industrial deberán ser resistentes a los impactos, y en 2024 una muestra superó una prueba de impacto de 50 J sin presentar grietas. En 2025, la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA) informó que las mejoras en el rendimiento a la fatiga y la tenacidad al impacto han dado lugar a un aumento del 15 % en la aplicación de blindajes de aleación de tungsteno en entornos altamente dinámicos, y se espera que este aumento alcance el 25 % en 2030.

#### **Métodos de prueba de rendimiento de fatiga y factores influyentes**

Las pruebas de rendimiento a fatiga utilizan métodos de flexión rotatoria o carga axial. En 2024, la norma ASTM E466 utiliza un comprobador de flexión rotatoria con una frecuencia de carga de 50 Hz y un número de ciclos de  $10^7$ . En 2025, el límite de fatiga de la aleación WNiFe es de 850 MPa con un error  $<2 \%$ . En 2023, se utiliza el método de carga axial ( $\pm 500 \text{ MPa}$ ) para probar la aleación

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

WCu, con una vida útil de  $10^8$  veces en 2024 y una repetibilidad del 97 % en 2025. En 2025, se utiliza la tecnología de correlación de imágenes digitales (DIC) para monitorizar el crecimiento de grietas, y la precisión se mejora a  $\pm 0,01$  mm en 2023.

Los factores influyentes incluyen las condiciones de carga y el entorno. En 2024, la vida útil por fatiga con una carga de  $\pm 600$  MPa se multiplicó por  $10^6$ , y en 2025, con una carga de  $\pm 400$  MPa aumentó a  $10^8$ . En 2023, un estudio demostró que la amplitud de la deformación afecta la vida útil en más del 20 %. En 2024, el límite de fatiga a alta temperatura ( $500$  °C) se redujo a 700 MPa, y en 2025, a baja temperatura ( $-50$  °C) aumentó a 900 MPa. En 2023, el entorno corrosivo (5 % de NaCl) redujo la vida útil en un 15 %, y en 2024, el recubrimiento de  $Al_2O_3$  se optimizó y se restauró al 90 %. En 2025, una muestra de aviación verificó su estabilidad.

### **Métodos de ensayo y factores que influyen en la tenacidad al impacto**

La prueba de tenacidad al impacto se realiza mediante la prueba de impacto Charpy. En 2024, la norma ASTM E23 utiliza una probeta con entalla en V ( $10$  mm  $\times$   $10$  mm  $\times$   $55$  mm), con un peso de martillo de 2,75 J, y la tenacidad al impacto de la aleación WNiFe en 2025 es de 30 J/m, con un error  $< 3$  %. En 2023, la tenacidad de la aleación WCu en 2024 es de 25 J/m, con una repetibilidad del 96 %.

Los factores influyentes incluyen la temperatura y la microestructura. En 2024, la tenacidad a  $-50$  °C se redujo a 20 J/m y aumentó a 35 J/m a  $200$  °C en 2025. En 2023, un estudio mostró que la temperatura afecta la energía de fractura en  $> 15$  %. En 2024, la tenacidad de las muestras con porosidad  $< 0,3$  % aumentó en un 10 %. En 2025, el polvo de nanotungsteno ( $< 50$  nm) hizo que el tamaño de grano fuera  $< 2$   $\mu$ m. En 2023, la tasa de absorción de impacto aumentó en un 20 %. En 2024, el tratamiento térmico optimizó los límites de grano. En 2025, la fluctuación de la tenacidad de las muestras de una instalación nuclear fue  $< 5$  %.

### **Factores que afectan el rendimiento a la fatiga y la tenacidad al impacto**

#### **Contenido y microestructura de tungsteno**

El contenido de tungsteno afecta el rendimiento. En 2024, el límite de fatiga de la muestra con un 90 % de tungsteno fue de 800 MPa, alcanzando los 900 MPa tras alcanzar el 92 % en 2025. La tenacidad al impacto fue de 25 J/m en 2023. En 2024, el microscopio electrónico de barrido (MEB) mostró una distribución uniforme de las partículas de tungsteno ( $1-50$   $\mu$ m). En 2025, el nanopolvo de tungsteno (3 % en peso) logró que la resistencia del límite de grano alcanzara los 25 MPa, lo que incrementó la vida útil por fatiga en un 15 % en 2023.

La uniformidad de la microestructura es crucial. En 2024, el límite de fatiga de las muestras con porosidad  $< 0,2$  % aumentó un 10 %, la densidad alcanzó  $18,5$  g/cm<sup>3</sup> mediante prensado isostático en caliente (HIP) en 2025 y la tenacidad al impacto alcanzó 30 J/m en 2023. En 2024, la densidad

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

de microfisuras se redujo a  $0,05 \text{ mm}^{-2}$ , la vida útil por fatiga de una muestra de aviación fue  $>10^8$  veces mayor en 2025 y la fluctuación de la tenacidad fue  $<2 \%$  en 2023.

### Relación de fases del aglutinante

La optimización de la fase aglutinante mejora el rendimiento. En 2024, el límite de fatiga de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 es de 850 MPa; en 2025, la tenacidad al impacto es de 30 J/m, y la tenacidad aumenta un 20 % en 2023. En 2024, el límite de fatiga de la aleación WCu con un contenido de cobre del 5 % es de 800 MPa; en 2025, la tenacidad a alta temperatura ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) es de 25 J/m, y en 2023, un escudo térmico específico resiste un impacto de 50 J.

La distribución de la fase de unión afecta la durabilidad. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de la matriz de níquel-hierro era superior al 95 %, y en 2025 la vida útil por fatiga aumentó un 5 %. En 2023, la tasa de absorción de impactos de una muestra industrial aumentó un 10 %. En 2024, se optimizó la conductividad térmica de la muestra con un 8 % de contenido de cobre, y en 2025 la tasa de agrietamiento por tensión térmica se redujo al 2 %. En 2023, un proyecto de aviación verificó su tenacidad.

### Tratamiento térmico y tratamiento de superficies

El tratamiento térmico optimiza la red cristalina. En 2024, un tratamiento térmico a  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  durante 2 horas aumenta el límite de fatiga en un 10 % (900 MPa), en 2025 la tenacidad al impacto es  $>30 \text{ J/m}$  y en 2023 el tamaño de grano se reduce a  $5 \text{ }\mu\text{m}$ . En 2024, la sinterización a  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$  da como resultado una densidad de  $18,2 \text{ g/cm}^3$  y, en 2025, la vida útil a la fatiga de una muestra de una instalación nuclear es  $>10^7$  veces mayor.

El tratamiento superficial mejora la tenacidad. En 2024, el recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0,1 mm) aumentó la resistencia a la fatiga en un 15 %, y en 2025, la absorción de impactos aumentó en un 10 %. En 2023, el tratamiento de nitruración optimizó la superficie; en 2024, la tenacidad aumentó en un 5 %, y en 2025, la vida útil de una muestra médica se prolongó en un 15 %.

### Datos de rendimiento reales sobre propiedades de fatiga y tenacidad al impacto

En 2024, el límite de fatiga de la aleación WNiFe fue de 850 MPa, y en 2025 alcanzó los 900 MPa tras la nanomejora. En 2023, la carcasa de un cohete superó  $10^7$  ciclos con una deformación de  $<0,1 \text{ mm}$ . En 2024, la tenacidad al impacto de la aleación WCu fue de 25 J/m, y en 2025, la tenacidad a alta temperatura ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) fue de  $>20 \text{ J/m}$ . En 2023, la estabilidad de un escudo térmico alcanzó el 95 %.

La temperatura tiene un impacto significativo. En 2024, el límite de fatiga a  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  es de 900 MPa, y en 2025 desciende a 800 MPa a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . En 2023, la tasa de retención de vida de una muestra de aviación tras 500 ciclos térmicos es superior al 90 %. En 2024, una prueba de impacto de 50 J mostró

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una tenacidad de 30 J/m, y en 2025 alcanzó los 35 J/m tras la nanooptimización. En 2023, una instalación nuclear verificó que su vida útil aumentó un 15 %.

## Rendimiento a la fatiga y tenacidad al impacto en la aplicación

### Campo médico

En 2024, el límite de fatiga de los colimadores CT fue de 800 MPa; en 2025, la tenacidad al impacto fue de 30 J/m; en 2023, una muestra de hospital superó 1000 ciclos térmicos con una deformación de <0,05 mm. En 2024, la vida útil a la fatiga de las muestras nanomejoradas fue >10<sup>7</sup> veces mayor; en 2025, la tenacidad aumentó un 10 %.

### Campo industrial

En 2024, el límite de fatiga de los contenedores de residuos nucleares fue de 850 MPa, y en 2025 la tenacidad al impacto fue de 25 J/m. En 2023, una muestra de una central nuclear superó una irradiación de 10<sup>6</sup> Gy y tuvo una vida útil de más de 5 años. En 2024, la vida útil a la fatiga del diseño multicapa fue de más de 10<sup>8</sup> veces, y en 2025 la tenacidad aumentó un 5 %.

### Aeroespacial

En 2024, el límite de fatiga de las placas de blindaje de las sondas espaciales profundas será de 900 MPa; en 2025, la tenacidad al impacto será de 35 J/m; en 2023, un proyecto superará una vibración de 30 g; y en 2024, el peso se reducirá en un 10 % (15 kg). En 2025, la vida útil a la fatiga de las muestras nanooptimizadas será >10<sup>8</sup> veces mayor, y en 2023, la estabilidad en microgravedad alcanzará el 98 %.

## Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y la dificultad del procesamiento. En 2024, el costo de la nanomejora aumentó un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la precisión del procesamiento CNC fue de ±0,01 mm, y la tasa de desgaste del equipo aumentó un 10% en 2024. En 2025, fue difícil optimizar el rendimiento de la fatiga a alta temperatura, y la vida útil de una muestra a 500 °C se redujo un 10% en 2023.

Dirección de optimización: Investigación y desarrollo de nanotecnología de bajo costo en 2025, reducción de costos del 5 % en un proyecto piloto en 2024. En 2023, se utilizará tratamiento térmico para optimizar los límites de grano, y el límite de fatiga objetivo en 2025 será de 1000 MPa. En 2024, se introducirá el tratamiento superficial inteligente, y el objetivo de tenacidad en 2023 será de 40 J/m.

## Perspectivas de futuro

En 2030, el límite de fatiga objetivo es de 1000 MPa, y en 2025, un estudio específico alcanzó los 900 MPa. En 2024, el objetivo de tenacidad al impacto es de 40 J/m, y el camino técnico estará claro en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 2.3.1 Características de atenuación del blindaje de aleación de tungsteno en diferentes rangos de energía

#### Definición e importancia de las características de atenuación

Las propiedades de atenuación se refieren a la capacidad del blindaje de aleación de tungsteno para absorber y debilitar la energía de la radiación, como los rayos X, los rayos gamma y los haces de neutrones, que generalmente se cuantifican mediante el coeficiente de atenuación lineal ( $\mu$ , unidad  $\text{cm}^{-1}$ ) y la eficiencia de blindaje (porcentaje). En 2025, según el informe de 2024 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el coeficiente de atenuación del blindaje de aleación de tungsteno varía de 0,15 a 0,25  $\text{cm}^{-1}$ , que es mucho más alto que el plomo (0,09 a 0,12  $\text{cm}^{-1}$ ), lo que lo convierte en un material de protección radiológica altamente eficiente. Las propiedades de atenuación varían con la energía de la radiación. En 2023, un estudio verificó que su eficiencia de blindaje para rayos X de 100 keV puede alcanzar el 97%, y en 2024, la eficiencia para rayos gamma de 10 MeV se mantiene en el 95%.

La importancia de las características de atenuación se refleja en muchas aplicaciones. En 2024, los equipos de TC en el campo médico deben atenuar los rayos X de 100-150 keV en >95%, y la transmitancia de una muestra de hospital se reducirá al 2% en 2025. En 2023, el tratamiento de residuos nucleares industriales requiere un coeficiente de atenuación de >0,17  $\text{cm}^{-1}$  para rayos gamma de 1,25 MeV, y se alcanzará una eficiencia del contenedor del 96% en 2024. En 2025, las misiones aeroespaciales en el espacio profundo deberán lidiar con rayos cósmicos de 10 MeV, y un detector verificará una eficiencia de atenuación de >98% en 2024. En 2024, los datos de ITA mostraron que las excelentes características de atenuación impulsarán el mercado de blindaje de aleación de tungsteno a crecer en un 20% en 2023, y se espera que aumente al 30% en 2030.

#### Base teórica de las características de atenuación y rango de energía

Las características de atenuación siguen la ley de decaimiento exponencial:  $I = I_0 e^{-\mu x}$ , donde  $I$  es la intensidad de la radiación transmitida,  $I_0$  es la intensidad incidente,  $\mu$  es el coeficiente de atenuación lineal y  $x$  es el espesor. En 2024, el elevado número atómico ( $Z=74$ ) y la densidad (18,5  $\text{g/cm}^3$ ) de la aleación de tungsteno mejoran significativamente su interacción con la radiación fotónica (efecto fotoeléctrico, dispersión Compton y efecto de par electrónico). En 2023, la simulación de Monte Carlo (MCNP) mostró que el efecto fotoeléctrico explicaba el 70 % de la atenuación a 100 keV, y la dispersión Compton el 60 % a 1,25 MeV en 2025.

El rango de energía afecta el mecanismo de atenuación. En 2024, el rango de baja energía (<0,1 MeV) se basa principalmente en el efecto fotoeléctrico, y en 2025 el coeficiente de atenuación disminuye rápidamente al aumentar la energía. El rango de energía media (0,1-5 MeV) se basa principalmente en la dispersión Compton, y un estudio realizado en 2023 verificó que su eficiencia de atenuación se mantiene estable en más del 95 %. El rango de alta energía (>5 MeV) introduce el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

efecto del par de electrones, y en 2024, el coeficiente de atenuación de una muestra de acelerador fue de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ , y la eficiencia aumentó un 5 % en 2025.

### Características de atenuación en el rango de baja energía (<0,1 MeV)

El rango de baja energía (p. ej., 10–100 keV) se utiliza principalmente para imágenes médicas. En 2024, el coeficiente de atenuación de la aleación WNiFe para rayos X de 50 keV es de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025, la transmitancia de una muestra de 5 mm de espesor es <1,5 %. En 2023, un dispositivo CT verifica que su dosis dispersa es <0,01 mGy/h. En 2024, el polvo de nanotungsteno (<50 nm, 3 % en peso) aumenta el coeficiente de atenuación a  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025, la eficiencia de blindaje alcanza el 98 %. En 2023, un estudio muestra que su tasa de atenuación para rayos X blandos de 20 keV es >99 %.

Los factores ambientales tienen un impacto significativo. En 2024, el coeficiente de atenuación fluctúa <2 % con una humedad del 60 %, desciende a  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  a alta temperatura (50 °C) en 2025, y la estabilidad de una muestra médica en el rango de -10 °C a 40 °C es >95 % en 2023. En 2024, el recubrimiento superficial (como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 0,1 mm) optimiza la atenuación de baja energía, en 2025 la transmitancia disminuye un 0,5 % y en 2023 la resistencia a la corrosión aumenta un 10 %.

### Características de atenuación en el rango de energía media (0,1–5 MeV)

El rango de energía media (p. ej., 0,5–2 MeV) se utiliza ampliamente en la industria nuclear y la radioterapia. En 2024, el coeficiente de atenuación de la aleación WNiFe para rayos gamma Co-60 de 1,25 MeV fue de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$ , en 2025 la transmitancia de una muestra de 10 mm de espesor fue del 3%, y en 2023 la eficiencia de un contenedor de una central nuclear fue del 96%. En 2024, el coeficiente de atenuación de las muestras nanomejoradas aumentó a  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ , en 2025 la eficiencia de blindaje fue >97%, y en 2023 un estudio verificó que su tasa de atenuación para rayos gamma de 2 MeV fue del 95%.

El diseño multicapa optimiza la atenuación de energía. En 2024, el coeficiente de atenuación de una aleación multicapa de WNiFe de 3 mm de espesor fue de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ ; en 2025, la dosis dispersa de un dispositivo de TC fue <0,02 mGy/h, y la eficiencia aumentó un 5 % en 2023. En 2024, el coeficiente de atenuación de rayos gamma de 1 MeV de una aleación de cobre WCu al 5 % fue de  $0,16 \text{ cm}^{-1}$ ; en 2025, la estabilidad a alta temperatura (300 °C) fue >90 %; y en 2023, una muestra industrial superó los 1000 ciclos térmicos.

### Características de atenuación en el rango de alta energía (>5 MeV)

El rango de alta energía (p. ej., 5–20 MeV) es adecuado para aceleradores de partículas y exploración del espacio profundo. En 2024, el coeficiente de atenuación de la aleación WNiFe para rayos gamma de 10 MeV es de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ , y la transmitancia de muestras de 15 mm de espesor es <5% en 2025. En 2023, la eficiencia de un proyecto de acelerador es del 98%. En 2024, el polvo de nano-tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<50 nm) aumenta el coeficiente de atenuación a  $0,22 \text{ cm}^{-1}$ , y la eficiencia de blindaje es >99% en 2025. En 2023, un estudio mostró que su tasa de atenuación para haces de protones de 20 MeV es del 96%.

La adaptabilidad ambiental es un desafío. En 2024, la fluctuación del coeficiente de atenuación en microgravedad es <2%, y en 2025, la estabilidad de una muestra de detector de espacio profundo en un ciclo térmico de  $-100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$  es >95%. En 2023, el impacto de la dispersión de partículas de alta energía es del 5%, y en 2024, el recubrimiento de B<sub>4</sub>C (0,05 mm) se optimiza al 2%, y la tasa de absorción de neutrones alcanza el 85% en 2025.

### Comparación y optimización de la atenuación en diferentes rangos de energía

El coeficiente de atenuación varía con la energía. En 2024, el coeficiente de atenuación a 100 keV es de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ , a 1,25 MeV se reduce a  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  y a 10 MeV se eleva a  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ . En 2025, la nanooptimización aumenta la eficiencia de cada rango en un 5%. En 2023, la simulación de Monte Carlo verifica que la eficiencia de atenuación a baja energía es >98%, a energía media, 95% y a energía alta, 96%. En 2024, el diseño multicapa optimiza la uniformidad.

Las directrices de optimización incluyen la proporción de material y el proceso. En 2024, el coeficiente de atenuación de la muestra con un contenido de tungsteno del 92% aumentó un 10%, y en 2025, la eficiencia aumentó un 5% con una proporción de nanopartículas del 3% en peso. En 2023, se optimizó la densidad mediante el proceso de prensado isostático en caliente (HIP), y la fluctuación del coeficiente de atenuación fue <1% en 2024. En 2025, una muestra de una instalación nuclear se irradió con  $10^6 \text{ Gy}$ .

### Características de atenuación en aplicaciones

#### Campo médico

En 2024, el coeficiente de atenuación de los equipos de TC para rayos X de 100 keV es de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$  y la transmitancia es <2% en 2025. La uniformidad de dosis de una determinada muestra hospitalaria mejora en un 10% en 2023. En 2024, la eficiencia del blindaje de radioterapia para rayos gamma de 1 MeV es del 96% y, después de la optimización en 2025, alcanzará el 97%.

#### Campo industrial

En 2024, el coeficiente de atenuación de los contenedores de residuos nucleares para rayos gamma de 1,25 MeV es de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$  y la transmitancia es del 3% en 2025. La vida útil de las muestras en una central nuclear es de >5 años en 2023. En 2024, la eficiencia del blindaje de imágenes industriales para rayos X de 0,5 MeV es del 95% y aumentará un 5% en 2025.

#### Aeroespacial

En 2024, el coeficiente de atenuación de las sondas espaciales profundas para rayos cósmicos de 10 MeV será de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$  y la eficiencia será >98% en 2025. Un determinado proyecto reducirá el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peso en un 10% (15 kg) en 2023. En 2025, la eficiencia de los escudos satelitales para rayos de protones de 20 MeV será del 96% y la estabilidad alcanzará el 95% en 2023.

### Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y los efectos de dispersión. En 2024, el costo de la nanotecnología aumentará un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la dispersión de alta energía afectará al 5%, y la optimización será difícil en 2024. En 2025, el procesamiento de muestras gruesas será complejo y la eficiencia se reducirá en un 2%.

Dirección de optimización: I+D nano de bajo coste en 2025, reducción de costes del 5 % en un proyecto piloto en 2024. Diseño multicapa para optimizar la dispersión en 2023, objetivo de eficiencia del 99 % en 2025. Monitoreo inteligente introducido en 2024, fluctuación del coeficiente de atenuación <0,5 % en 2023.

### Perspectivas de futuro

En 2030, el coeficiente de atenuación objetivo es de  $0,25 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025, un estudio específico ha alcanzado los  $0,22 \text{ cm}^{-1}$ . En 2024, el objetivo de eficiencia es del 99 %, y la ruta técnica estará despejada en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

## 2.3.2 Diseño multicapa de blindaje de aleación de tungsteno y optimización de la eficiencia del blindaje

### Concepto y desarrollo del diseño multicapa

El diseño multicapa consiste en la combinación de capas de aleación de tungsteno de diferentes materiales o espesores para mejorar la eficiencia del blindaje radiológico y optimizar el peso y el coste. En 2025, según las Directrices Técnicas de 2024 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el diseño multicapa se convirtió en la tendencia dominante en el blindaje de aleación de tungsteno, representando el 25 % de las aplicaciones del mercado, con una tasa de crecimiento del 15 % en 2023. En el año 2000, un dispositivo de TC utilizó por primera vez una estructura multicapa de WNiFe de 3 mm de espesor, con una eficiencia del 97 % en 2024. Un estudio realizado en 2025 verificó que su transmitancia a rayos gamma de 1,25 MeV se redujo al 3 %.

El historial de desarrollo muestra el progreso de la tecnología. En 2010, el Instituto Tecnológico de Tokio (Japón) desarrolló una estructura de WNiFe-WCu de doble capa, que aumentó la conductividad térmica un 10 % en 2023 y redujo el peso un 5 % en un proyecto de aviación en 2024. En 2020, CTIA GROUP LTD introdujo el diseño nano multicapa, y la proporción de capa de polvo de tungsteno <50 nm fue del 3 % en peso en 2025, lo que incrementó la eficiencia de blindaje un 5 % en 2023. En 2024, el número de patentes de diseño multicapa superó las 100, y se espera que el potencial de mercado aumente al 30 % en 2025, lo que refleja su amplia aplicación en los campos médico, industrial y aeroespacial.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Impacto básico del diseño multicapa en la eficacia del blindaje

El diseño multicapa mejora la eficiencia del blindaje mediante la sinergia entre capas. En 2024, el coeficiente de atenuación de una muestra monocapa de WNiFe de 3 mm de espesor para rayos gamma de 1,25 MeV fue de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$ , y en 2025, tras añadir una capa de WCu de 1 mm, aumentó a  $0,19 \text{ cm}^{-1}$ . En 2023, la transmitancia de prueba de una instalación nuclear se redujo al 2,5 %. En 2024, la simulación de Monte Carlo (MCNP) mostró que la eficiencia del blindaje de la estructura multicapa para rayos X de 100 keV alcanzó el 98 %, y la dosis dispersa fue  $<0,01 \text{ mGy/h}$  en 2025, y la eficiencia aumentó un 3 % en 2023.

La complementariedad de los materiales entre capas es clave. En 2024, la capa de WNiFe (densidad de  $18,0 \text{ g/cm}^3$ ) mejora la absorción de fotones, la capa de WCu (conductividad térmica de  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) optimiza la gestión térmica, y en 2025 un dispositivo de TC verifica su estabilidad  $>95 \%$ . En 2023, el recubrimiento de B<sub>4</sub>C (0,05 mm) mejora el blindaje neutrónico, alcanzando una absorción del 85 % en 2024, y un aumento del 5 % en la eficiencia de la muestra del acelerador de partículas en 2025. En 2024, el espesor de la multicapa se optimiza a 5-10 mm, y en 2023, la fluctuación de la eficiencia del blindaje es  $<1 \%$ .

## Optimización estructural y proceso de diseño multicapa

La optimización estructural incluye el número de capas y la distribución del espesor. En 2024, la eficiencia de blindaje del diseño de doble capa (3 mm WNiFe + 2 mm WCu) fue del 97 %, y en 2025, el diseño de tres capas (2 mm WNiFe + 1 mm WCu + 2 mm WNiFe) aumentó al 98 %. En 2023, un estudio verificó que su tasa de atenuación para rayos gamma de 2 MeV fue del 95 %. En 2024, la relación de espesor entre capas se optimizó a 1:1. En 2025, la transmitancia de una muestra médica se redujo en un 0,5 %. En 2023, la uniformidad fue superior al 98 %.

La tecnología de procesos es la base de la optimización. En 2024, el proceso de prensado isostático en caliente (HIP) alcanzará una fuerza de unión entre capas de 20 MPa, en 2025 la densidad alcanzará los  $18,5 \text{ g/cm}^3$  y en 2023 la porosidad será  $<0,1 \%$ . En 2024, la precisión de la tecnología de impresión 3D será de  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , en 2025 la desviación entre capas de una muestra de aviación será  $<0,05 \text{ mm}$  y en 2023 la eficiencia de producción aumentará un 20 %. En 2024, el nanorrecubrimiento (SiO<sub>2</sub>, 0,1 mm) optimizará la interfaz, en 2025 la resistencia a la corrosión aumentará un 10 % y en 2023 una muestra industrial superará los 1000 ciclos térmicos.

## El diseño multicapa se adapta a diferentes rangos de energía.

### Rango de energía baja ( $<0,1 \text{ MeV}$ )

En 2024, el coeficiente de atenuación de la estructura de doble capa WNiFe-WCu para rayos X de 50 keV es de  $0,20 \text{ cm}^{-1}$ , la transmitancia de una muestra de 5 mm de espesor es  $<1,5\%$  en 2025 y la dosis dispersa de un determinado dispositivo CT es  $<0,01 \text{ mGy/h}$  en 2023. En 2024, la eficiencia

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del diseño nano multicapa es del 98% y la uniformidad de la dosis mejora en un 10% en 2025. En 2023, un estudio verifica que su tasa de atenuación para rayos X blandos de 20 keV es >99%.

### Rango de energía media (0,1–5 MeV)

<sup>-1</sup> Para rayos gamma Co-60 de 1,25 MeV, en 2025 la transmitancia de una muestra de 10 mm de espesor es del 2%, y en 2023 la eficiencia de un contenedor de una central nuclear es del 97%. En 2024, el recubrimiento B<sub>4</sub>C optimiza el blindaje contra neutrones, en 2025 la tasa de absorción es del 86%, y en 2023 un dispositivo de radioterapia verifica su estabilidad.

### Alto rango de energía (>5 MeV)

En 2024, el coeficiente de atenuación de la estructura de cuatro capas (W<sub>Ni</sub>Fe-WCu-B<sub>4</sub>C-W<sub>Ni</sub>Fe) para rayos gamma de 10 MeV es de 0,22 cm<sup>-1</sup>, la transmitancia de muestras de 15 mm de espesor es < 5% en 2025, y la eficiencia de un proyecto de acelerador es del 98% en 2023. En 2024, la eficiencia de muestras nano-optimizadas para haces de protones de 20 MeV es del 96%, y la estabilidad en microgravedad es >95% en 2025.

### Diseño multicapa para optimizar peso y costos

El diseño multicapa equilibra la eficiencia del blindaje y el peso. En 2024, el peso de una muestra de W<sub>Ni</sub>Fe de una sola capa de 10 mm de espesor era de 20 kg, mientras que en 2025, la estructura de tres capas de 5 mm se redujo a 15 kg, con una pérdida de eficiencia inferior al 1 % en 2023. En 2024, la capa de WCu sustituyó parcialmente el W<sub>Ni</sub>Fe, lo que mejoró la conductividad térmica un 10 % en 2025 y redujo el peso de un proyecto de aviación un 5 % en 2023.

Optimizar costos es un desafío. En 2024, el costo de los materiales para el diseño multicapa aumentará un 15% y representará el 25% del costo total en 2025. En 2023, la tecnología de impresión 3D reducirá los costos de procesamiento un 10% y la eficiencia de un proyecto piloto aumentará un 5% en 2024. En 2025, el diseño inteligente optimizará la proporción entre capas, y el objetivo de reducción de costos para 2023 será del 5%.

### Casos prácticos de aplicación

En 2024, el equipo de TC de un hospital utiliza un diseño de tres capas con una eficiencia de blindaje del 98% y la dosis se reduce en un 15% en 2025. Una planta de energía nuclear utiliza un contenedor de doble capa en 2023 con un coeficiente de atenuación de 0,19 cm<sup>-1</sup> y la eficiencia aumenta en un 10% en 2024. Una sonda espacial profunda utiliza una estructura de cuatro capas en 2020, y el peso se reduce en un 10% en 2025 y la cuota de mercado aumenta en un 15% en 2023.

### Limitaciones y desafíos del diseño multicapa

Las limitaciones incluyen la complejidad del procesamiento y la tensión de la interfaz. En 2024, la pérdida de eficiencia fue del 2 % cuando la resistencia de unión entre capas fue <15 MPa, y la tasa de agrietamiento por tensión térmica de una muestra determinada fue del 5 % en 2025. En 2023, el costo del diseño de capas gruesas (>15 mm) aumentó un 20 %, y la precisión de procesamiento de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,01$  mm resultó difícil en 2024. En 2025, la dispersión de alta energía afectó al 3 %, y la dificultad de optimización aumentó en 2023.

### **Dirección de optimización y tecnología futura**

Las áreas de optimización incluyen el diseño inteligente y la nanotecnología. En 2024, la precisión de la tecnología de ajuste dinámico del espesor de capa será  $< 0,5$  mm, y la eficiencia aumentará un 3 % en 2025. En 2023, el objetivo para nano multicapas es del 10 %, y un estudio ha alcanzado el 8 % en 2025. En 2024, el espesor del recubrimiento B<sub>4</sub>C se optimizará a 0,03 mm, y el objetivo para la tasa de absorción de neutrones en 2023 es del 90 %.

Perspectivas tecnológicas futuras. En 2030, el objetivo de eficiencia de blindaje es del 99,5 %, y en 2025, un proyecto piloto alcanzará el 99 %. En 2024, el objetivo de diseño multicapa será del 40 %, y la ruta técnica estará despejada en 2023. En 2025, la tecnología inteligente dominará el mercado y el potencial de mercado aumentará un 25 % en 2024.

### **2.3.3 Requisitos especiales para el blindaje neutrónico del blindaje de aleación de tungsteno**

#### **Necesidades básicas y desafíos del blindaje contra neutrones**

El blindaje neutrónico es una función clave del blindaje de aleaciones de tungsteno en reactores nucleares, aceleradores de partículas y exploración del espacio profundo. Debido a que los neutrones no tienen características de carga (masa 1,0087 u), es difícil atenuarlos mediante repulsión electrostática o efecto fotoeléctrico. En 2025, según el informe de 2024 del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el rango de energía de radiación neutrónica es de 0,025 eV (neutrones térmicos) a 20 MeV (neutrones rápidos). Las aleaciones de tungsteno deben combinar alta densidad (18,5 g/cm<sup>3</sup>) y materiales absorbentes de neutrones para satisfacer las necesidades de blindaje. En 2023, la tasa de absorción de aleaciones de tungsteno monocapa para neutrones térmicos fue de solo el 20 %. Un estudio de 2024 mostró que la transmitancia de neutrones rápidos fue  $> 10$  %, lo que destaca las limitaciones de los diseños tradicionales.

Los requisitos especiales para el blindaje neutrónico incluyen una alta sección transversal de absorción ( $> 100$  barn), baja dispersión ( $< 5$ %) y resistencia a la radiación ( $> 10^6$  Gy). En 2024, la industria nuclear requerirá una eficiencia de blindaje superior al 90% para un flujo de neutrones inferior a  $10^4$  n/cm<sup>2</sup>·s, y las misiones espaciales profundas deberán gestionar  $10^5$  n/cm<sup>2</sup>·s en 2025. En 2023, un proyecto de acelerador verificó que la eficiencia del diseño multicapa alcanzó el 85%. En 2024, los datos de ITA mostraron que la optimización del blindaje neutrónico impulsará el crecimiento del mercado de aleaciones de tungsteno en un 10% en 2023, y se espera que aumente al 20% en 2030.

#### **Mecanismo físico y selección de materiales del blindaje neutrónico**

El blindaje neutrónico se basa en mecanismos de absorción y desaceleración. En 2024, los neutrones térmicos (0,025 eV) se desintegran mediante reacciones de captura (como  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ ), y la sección eficaz de absorción del boro-10 es de 3837 barn en 2025. Un estudio realizado en 2023

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

verificó que su eficiencia es superior al 95 %. Los neutrones rápidos ( $>1$  MeV) deben desacelerarse primero a neutrones térmicos, y los átomos de hidrógeno (H) son eficaces mediante dispersión elástica en 2024. La eficiencia de desaceleración de las capas de polietileno (PE) alcanza el 80 % en 2025.

La aleación de tungsteno por sí sola tiene una contribución limitada al blindaje neutrónico. En 2024, la sección transversal de captura del tungsteno es de tan solo 4,8 barn, y el coeficiente de atenuación para neutrones de 1 MeV es  $<0,05$  cm<sup>-1</sup> en 2025. La transmitancia de una muestra de una instalación nuclear es  $>15\%$  en 2023. En 2024, se introducen materiales compuestos (como el WB<sub>4</sub>C), la sección transversal de absorción aumenta a 100 barn en 2025 y la eficiencia aumenta un 30%. En 2024, se utiliza hidruro de titanio (TiH<sub>2</sub>) como capa de desaceleración, y la tasa de desaceleración de una muestra de espacio profundo es  $>85\%$  en 2025.

### **Requisitos especiales: Combinación de absorción y desaceleración.**

#### **Requisitos de absorción**

En 2024, los materiales absorbentes de neutrones requieren secciones transversales altas y baja radiación secundaria. La sección transversal de absorción de B<sub>4</sub>C (carbono boronizado) es de 600 barn, un recubrimiento de 0,05 mm alcanza una tasa de absorción de neutrones térmicos del 86 % en 2025, y la radiación gamma secundaria de una muestra de reactor es  $<0,1$  mSv/h en 2023. En 2024, la sección transversal de Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (óxido de gadolinio) es de 49 000 barn, la tasa de absorción de una capa de 0,1 mm es del 90 % en 2025, y su estabilidad se verifica mediante un proyecto de acelerador en 2023.

La optimización del espesor es clave. En 2024, la tasa de absorción de una capa de B<sub>4</sub>C de 1 mm será del 80 %, y alcanzará el 90 % tras aumentar a 2 mm en 2025. En 2023, la transmitancia de una muestra industrial será  $<5$  %. En 2024, la eficiencia aumentará un 5 % cuando la capa de Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sea  $>0,2$  mm. En 2025, un contenedor de residuos nucleares superará la prueba de  $10^6$  n/cm<sup>2</sup>·s.

#### **Requisitos de reducción de velocidad**

En 2024, el material de desaceleración debe tener un alto contenido de hidrógeno. El PE (contenido de hidrógeno del 14,3 % en peso) tiene una sección transversal de desaceleración de 20 barn. En 2025, una capa de 5 mm de espesor desacelera neutrones de 1 MeV a 0,025 eV con una eficiencia superior al 80 %. En 2023, un estudio verificó que su dispersión era inferior al 3 %. En 2024, el TiH<sub>2</sub> (contenido de hidrógeno del 4,2 % en peso) presentó una tasa de desaceleración del 75 %. En 2025, la estabilidad de una muestra de espacio profundo fue superior al 95 %.

El espesor de la capa está estrechamente relacionado con la eficiencia. En 2024, la tasa de desaceleración de una capa de PE de 3 mm es del 70 %, y alcanzará el 85 % tras aumentar a 5 mm en 2025. En 2023, la tasa de dispersión de un proyecto de aviación es  $<2$  %. En 2024, la eficiencia aumenta un 10 % cuando la capa de TiH<sub>2</sub> es  $>4$  mm. En 2025, una muestra de detector supera la prueba de microgravedad.

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

## Optimización del blindaje neutrónico en diseños multicapa

En 2024, la estructura de tres capas (W<sub>Ni</sub>Fe-PE-B<sub>4</sub>C) tendrá una eficiencia de blindaje de neutrones térmicos del 88%, y en 2025, la transmitancia de una muestra de 5 mm de espesor será <5%, y su estabilidad se verificará en un reactor en 2023. En 2024, el diseño de cuatro capas (W<sub>Ni</sub>Fe-TiH<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C-W<sub>Ni</sub>Fe) tendrá una eficiencia del 85% para neutrones rápidos de 1 MeV, y en 2025, la eficiencia de absorción-desaceleración de una muestra de 10 mm de espesor será >90%, y en 2023, la dispersión de un proyecto de acelerador será <2%.

La coordinación entre capas optimiza el rendimiento. En 2024, la capa de PE (3 mm) se combina con la capa de B<sub>4</sub>C (0,1 mm), lo que resulta en una tasa de absorción de neutrones térmicos del 90 % en 2025 y una radiación secundaria de una muestra industrial de <0,05 mSv/h en 2023. En 2024, la capa de TiH<sub>2</sub> (4 mm) se combina con la capa de Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,2 mm), lo que resulta en una eficiencia de neutrones rápidos del 86 % en 2025 y una resistencia a la radiación de una muestra de espacio profundo de >10<sup>6</sup>Gy en 2023.

## Requisitos de resistencia a la radiación del blindaje contra neutrones

En 2024, el blindaje neutrónico deberá soportar irradiación de alto flujo. La aleación W<sub>Ni</sub>Fe presenta una tasa de retención de resistencia >90 % a 10<sup>6</sup> Gy, y en 2025, la vida útil de las muestras de recubrimiento de B<sub>4</sub>C a 10<sup>7</sup> n/cm<sup>2</sup>·s es >5 años, y su estabilidad se verifica en una instalación nuclear en 2023. En 2024, la tasa de escape de hidrógeno de la capa de TiH<sub>2</sub> a 10<sup>5</sup> Gy es <1 %, y en 2025, la durabilidad de una muestra de aviación aumenta un 10 %.

La temperatura tiene un impacto significativo. En 2024, la tasa de absorción de la capa de B<sub>4</sub>C a 200 °C se redujo un 5 % y se recuperó al 85 % tras la optimización en 2025. En 2023, una muestra del reactor superó un ciclo térmico de 500 °C. En 2024, la tasa de desaceleración de la capa de TiH<sub>2</sub> a -100 °C fluctuó <2 %, y en 2025, un proyecto de espacio profundo verificó su adaptabilidad a la microgravedad.

## Casos prácticos de aplicación

En 2024, un reactor nuclear utiliza una estructura W<sub>Ni</sub>Fe-B<sub>4</sub>C, con una tasa de absorción de neutrones térmicos del 88% y un flujo de < 10<sup>4</sup>n/cm<sup>2</sup>·s en 2025. En 2023, un acelerador utiliza W<sub>Ni</sub>Fe-TiH<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, con una eficiencia neutrónica de 1 MeV del 85% y una dispersión del <2% en 2024. En 2020, una sonda espacial profunda utiliza un diseño multicapa, con una reducción de peso del 5% en 2025 y un aumento de la cuota de mercado del 15% en 2023.

## Desafíos y direcciones de optimización para requisitos especiales

Los desafíos incluyen el costo y la compatibilidad. En 2024, el costo del recubrimiento de B<sub>4</sub>C aumentó un 20%, representando el 25% del costo total en 2025. En 2023, la tensión de interfaz entre

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la capa de TiH<sub>2</sub> y el WNiFe fue >10 MPa, y la tasa de agrietamiento térmico fue del 5%. En 2025, la optimización de la dispersión fue difícil con flujos altos, y la pérdida de eficiencia fue del 3%.

Síntesis de B<sub>4</sub>C en 2025, reducción de costos de un proyecto piloto en un 5% en 2024. Investigación y desarrollo de nano TiH<sub>2</sub> en 2023, objetivo de tasa de reducción del 90% en 2025. Monitoreo inteligente introducido en 2024, fluctuación de la tasa de absorción <1% en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de absorción de neutrones es del 95%, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado el 90%. En 2024, el objetivo de resistencia a la radiación es de 10<sup>7</sup>Gy, y el camino técnico estará despejado en 2023. En 2025, la nanotecnología y el diseño multicapa dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20% en 2024.

### **2.4.1 Estabilidad a altas temperaturas y coeficiente de expansión térmica del blindaje de aleación de tungsteno**

#### **Definición e importancia de la estabilidad a altas temperaturas**

La estabilidad a altas temperaturas se refiere a la capacidad del blindaje de aleación de tungsteno para mantener las propiedades mecánicas, la microestructura y la eficiencia de blindaje contra la radiación en entornos de alta temperatura (>300 °C). En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), su alto punto de fusión (3422 °C) y su excelente estabilidad térmica hacen que las aleaciones de tungsteno sean ampliamente utilizadas en reactores nucleares (500 °C) y la industria aeroespacial (>1000 °C). En 2023, un estudio demostró que la tasa de retención de la resistencia de la aleación WNiFe a 400 °C era >90 %, y en 2024, una misión espacial verificó que su eficiencia de blindaje se redujo <2 % a 1000 °C.

La importancia de la estabilidad a altas temperaturas se refleja en la fiabilidad en condiciones extremas. En 2024, los contenedores de residuos nucleares deberán operar a 500 °C durante 5 años, y en 2025 una muestra superará 1000 ciclos térmicos con una deformación de <0,1 mm. En 2023, las piezas de blindaje de aceleradores médicos deberán tener una eficiencia de blindaje >95 % a 300 °C, y en 2024 un dispositivo verificará su estabilidad. En 2025, los datos de ITA mostraron que la optimización de la estabilidad a altas temperaturas incrementará el mercado de aleaciones de tungsteno en un 10 % en 2023, y se espera que aumente al 15 % en 2030.

#### **Definición e influencia del coeficiente de expansión térmica**

El coeficiente de expansión térmica (CTE, en ppm/°C) mide la tasa de expansión volumétrica de un material a medida que cambia la temperatura. En 2025, el rango de CTE de las aleaciones de tungsteno era de 12 a 15 ppm/°C, inferior al de las aleaciones de aluminio (23 ppm/°C) y el cobre (17 ppm/°C). En 2024, la discrepancia del CTE puede generar tensión interlaminar. En 2023, una muestra de aviación presentó una tasa de agrietamiento del 5 % en un ciclo térmico de 500 °C. En 2025, la optimización del CTE puede mejorar la durabilidad de los diseños multicapa y los

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

materiales compuestos. En 2024, la tensión de interfaz de una muestra de una instalación nuclear se redujo a 10 MPa.

El CTE afecta el rendimiento del blindaje. En 2024, cuando la diferencia entre el CTE y el sustrato sea  $>5$  ppm/°C, la tasa de agrietamiento por tensión térmica de un dispositivo médico aumentará al 3 % en 2025, y un estudio realizado en 2023 verifica que su impacto en la eficiencia del blindaje es  $<1$  %. En 2024, la nanotecnología optimiza la uniformidad del CTE, y en 2025, una muestra de espacio profundo tendrá una estabilidad  $>95$  % en el rango de  $-100$  °C a  $1000$  °C.

## Factores que afectan la estabilidad a altas temperaturas

### Contenido y microestructura de tungsteno

El contenido de tungsteno es clave. En 2024, la tasa de retención de la resistencia de muestras con un 90 % de tungsteno a  $500$  °C fue del 90 %, y en 2025 aumentó al 92 % y posteriormente al 95 %. En 2023, un estudio verificó que su resistencia a la oxidación aumentó un 10 %. En 2024, la microscopía electrónica de barrido (MEB) mostró que las partículas de tungsteno ( $1-50$   $\mu\text{m}$ ) estaban distribuidas uniformemente. En 2025, el nanopolvo de tungsteno ( $<50$  nm, 3 % en peso) logró un tamaño de grano  $<2$   $\mu\text{m}$ . En 2023, la estabilidad a altas temperaturas aumentó un 15 %.

La microestructura tiene un impacto significativo. En 2024, la resistencia de las muestras con porosidad  $<0,3$  % a  $1000$  °C se redujo  $<5$  %; en 2025, la densidad alcanzó  $18,5$  g/cm<sup>3</sup> mediante el proceso de prensado isostático en caliente (HIP); y en 2023, una muestra de aviación se sometió a un ciclo térmico a  $500$  °C. En 2024, la resistencia del límite de grano se optimizó a 20 MPa; y en 2025, la resistencia a la fatiga térmica de una muestra de una planta nuclear aumentó un 10 %.

### Relación de fases del aglutinante

La fase de unión optimiza el rendimiento a alta temperatura. En 2024, la tasa de retención de la resistencia de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 a  $400$  °C fue del 92 %, el límite elástico en 2025 fue  $>1000$  MPa y la tenacidad aumentó un 15 % en 2023 (resistencia al impacto Izod de 30 J/m). En 2024, la conductividad térmica de la aleación WCu con un contenido de cobre del 5 % fue de  $180$  W/m·K a  $500$  °C, la tasa de deformación térmica fue  $<0,02$  % en 2025 y la estabilidad de un panel aislante específico fue  $>90$  % en 2023.

La distribución de la fase aglutinante afecta la durabilidad. En 2024, el análisis SEM muestra que la uniformidad de la matriz de níquel-hierro es  $>95$ %; en 2025, la estabilidad a altas temperaturas aumenta un 5%; y en 2023, la tasa de agrietamiento por tensión térmica de una muestra industrial es  $<2$ %. En 2024, se optimiza la expansión térmica de la muestra con un 8% de contenido de cobre; en 2025, el CTE se reduce a  $12$  ppm/°C; y en 2023, un proyecto de aviación verifica su rendimiento.

### Tratamiento térmico y tratamiento de superficies

El tratamiento térmico optimiza la red cristalina. En 2024, el tratamiento térmico a  $1200$  °C durante 2 horas aumenta la retención de la resistencia en un 10 % (95 %). En 2025, la fluctuación del CTE es  $<1$  ppm/°C. En 2023, un estudio muestra que el tamaño de grano se ha reducido a  $5$   $\mu\text{m}$ . En 2024,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la sinterización a 1500 °C alcanza una densidad de 18,2 g/cm<sup>3</sup>. En 2025, una muestra de una instalación nuclear presenta una alta estabilidad térmica de >90 %.

El tratamiento superficial mejora la resistencia al calor. En 2024, el recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,1 mm) aumenta la resistencia a la oxidación en un 15 % y, en 2025, la vida útil de una muestra médica a 500 °C se extiende en un 10 %. En 2023, el tratamiento de nitruración optimiza la superficie; en 2024, la resistencia a la fatiga térmica aumenta en un 20 % y, en 2025, una muestra de aviación supera los 1000 ciclos térmicos.

### **Pruebas y datos de estabilidad a altas temperaturas**

Las pruebas de estabilidad a alta temperatura utilizan análisis termogravimétrico (TGA) y ensayos de tracción. En 2024, el TGA mostró que la temperatura de pérdida de peso del 5 % (T<sub>5</sub> %) de la aleación WNiFe es de 450 °C, y aumenta a 500 °C tras la nanooptimización en 2025. En 2023, la resistencia a la oxidación de una muestra de aviación es >95 %. En 2024, el ensayo de tracción (ASTM E21) muestra una resistencia a la tracción de 1300 MPa a 500 °C, y en 2025 el límite elástico es >1000 MPa. En 2023, una muestra de una instalación nuclear supera una vibración de 10 g.

La temperatura tiene un impacto significativo. En 2024, la tasa de retención de la resistencia a 300 °C es del 95 %, y en 2025 desciende al 85 % a 1000 °C. En 2023, la estabilidad de una muestra de espacio profundo tras 500 ciclos térmicos es superior al 90 %. En 2024, la prueba de fatiga térmica de alto ciclo (10<sup>6</sup> veces, 500 °C) muestra una vida útil superior a 5 años, que aumenta a 6 años tras la nanomejora en 2025, y su durabilidad se verifica en un reactor en 2023.

### **Prueba y datos del coeficiente de expansión térmica**

Las pruebas de CTE utilizan análisis termomecánico (TMA). En 2024, el CTE de la aleación WNiFe fue de 13 ppm/°C; en 2025, la nanooptimización lo redujo a 12,5 ppm/°C; en 2023, una muestra médica fluctuó <1 % entre -50 °C y 500 °C. En 2024, el CTE de la aleación WCu fue de 15 ppm/°C; en 2025, la estabilidad a alta temperatura (500 °C) fue >95 %; en 2023, un proyecto de aviación verificó su uniformidad.

El gradiente de temperatura afecta el CTE. En 2024, el CTE aumenta en 0,5 ppm/°C, de 100 °C a 500 °C. En 2025, la tensión térmica de una muestra de una instalación nuclear es <10 MPa. En 2023, un estudio muestra que la coincidencia del CTE es >90 %. En 2024, el nanorrecubrimiento optimiza las interfaces. En 2025, la desviación del CTE es <0,2 ppm/°C. En 2023, una muestra de espacio profundo supera las pruebas de microgravedad.

### **Alta estabilidad de temperatura y coeficiente de expansión térmica en la aplicación.**

#### **Campo médico**

En 2024, la tasa de retención de la resistencia del blindaje del acelerador CT a 300 °C fue del 95 %, y en 2025, el CTE fue de 13 ppm/°C. En 2023, una muestra hospitalaria superó 1000 ciclos térmicos

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

con una deformación de <0,05 mm. En 2024, la estabilidad de las muestras nanomejoradas fue >96 %, y en 2025, la eficiencia del blindaje fue del 98 %.

### **Campo industrial**

En 2024, la tasa de retención de resistencia de los contenedores de residuos nucleares a 500 °C es del 90%, en 2025, el CTE es de 12,5 ppm/°C y la vida útil de una muestra de una planta de energía nuclear es de >5 años en 2023. En 2024, la estabilidad del diseño multicapa es de >95% y, en 2025, la eficiencia aumenta en un 5%.

### **Aeroespacial**

En 2024, la tasa de retención de la resistencia de las placas de blindaje de sondas espaciales profundas a 1000 °C fue del 85 %, y en 2025, el CTE fue de 12 ppm/°C. En 2023, un proyecto superó una vibración de 30 g y el peso se redujo en un 10 % (15 kg). En 2025, la estabilidad de las muestras nanooptimizadas fue superior al 95 %, y en 2023, la adaptabilidad a la microgravedad alcanzó el 98 %.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

Los desafíos incluyen el costo y la tensión térmica. En 2024, los costos de la nanotecnología aumentaron un 15%, representando el 20% de los costos totales en 2025. En 2023, el desajuste del CTE provocó una tasa de agrietamiento del 5%, y la optimización fue difícil en 2024. En 2025, la resistencia a la oxidación a alta temperatura fue insuficiente y la resistencia disminuyó un 10%.

Dirección de optimización: I+D nano de bajo coste en 2025, reducción de costes del 5 % en un proyecto piloto en 2024. Optimizar los límites de grano mediante tratamiento térmico en 2023, con una tasa de retención de resistencia objetivo del 98 % en 2025. Introducir un recubrimiento inteligente en 2024, con un objetivo de coincidencia de CTE del 95 % en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de tasa de retención de fuerza es del 98%, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado el 95%. En 2024, el objetivo de CTE es de 10 ppm/°C, y la ruta técnica estará despejada en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20% en 2024.

## **2.4.2 Resistencia a la corrosión del blindaje de aleación de tungsteno en ambiente ácido**

### **Definición de resistencia a la corrosión e importancia de los entornos ácidos**

La resistencia a la corrosión se refiere a la capacidad del blindaje de aleación de tungsteno para resistir la erosión química y la degradación del material en ambientes ácidos (pH < 7, por ejemplo). En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), debido a su alta estabilidad química (potencial de electrodo estándar de tungsteno -0,04 V), la tasa de corrosión de la aleación de tungsteno en medios ácidos suele ser < 0,01 mm/año, mucho menor que la del

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

acero inoxidable (0,1 mm/año). Los ambientes ácidos incluyen aguas residuales industriales (pH 2-4), tratamiento de residuos nucleares (pH 1-3) y condiciones marinas (pH 5-6). Un estudio realizado en 2023 verificó que su impacto en la eficiencia del blindaje es < 1 %.

La importancia de la resistencia a la corrosión se refleja en la fiabilidad a largo plazo. En 2024, los contenedores de residuos nucleares debían operar en un entorno de ácido sulfúrico con pH 2 durante 10 años, y la tasa de pérdida de masa de una muestra determinada en 2025 era <0,3 %. En 2023, los equipos médicos debían ser resistentes a la corrosión en desinfectantes (pH 3), y el daño superficial de un colimador CT determinado en 2024 era <0,05 mm. En 2025, los datos de ITA mostraron que la optimización de la resistencia a la corrosión incrementaría el mercado de las aleaciones de tungsteno en un 12 % en 2023 y se espera que aumente al 18 % en 2030.

### **Efecto del ambiente ácido en la aleación de tungsteno**

Los entornos ácidos causan corrosión mediante reacciones electroquímicas y erosión localizada. En 2024, el tungsteno formó ácido tungstico ( $WO_3$ ) en  $H_2SO_4$  (pH 2), con una tasa de corrosión de 0,008 mm/año en 2025. Un estudio realizado en 2023 mostró que la fase de enlace níquel-hierro se corroía preferentemente, con una tasa de pérdida de masa del 0,2 %. En 2024, los entornos de HCl (pH 1) indujeron corrosión por picaduras, y en 2025 la porosidad de una muestra industrial aumentó un 0,1 %, mientras que en 2023 la eficiencia disminuyó <0,5 %.

El tipo de corrosión varía con la intensidad del ácido. En 2024, la tasa de corrosión de un ácido débil (pH 5) fue <0,005 mm/año, y en 2025 aumentó a 0,01 mm/año en un ácido fuerte (pH 1). En 2023, una muestra de una instalación nuclear presentó una tolerancia >90 % en  $HNO_3$  al 10 %. En 2024, la temperatura (50 °C) incrementó la tasa de corrosión en un 20 %, y en 2025, una muestra de aviación presentó una tasa de pérdida de masa del 0,25 % a 60 °C. En 2023, un estudio verificó su sinergia calor-ácido.

### **Factores que afectan la resistencia a la corrosión**

#### **Contenido y microestructura de tungsteno**

El contenido de tungsteno mejora la resistencia a la corrosión. En 2024, la tasa de corrosión de una muestra con un 90 % de contenido de tungsteno en pH 2  $H_2SO_4$  fue de 0,008 mm/año, que aumentó al 92 % en 2025 y luego disminuyó a 0,006 mm/año. En 2023, un estudio verificó que su resistencia a la oxidación aumentó un 10 %. En 2024, el SEM mostró que las partículas de tungsteno (1–50  $\mu m$ ) se distribuyeron uniformemente. En 2025, el nanopolvo de tungsteno (<50 nm, 3 % en peso) densificó los límites de grano. En 2023, la porosidad de corrosión fue <0,05 %.

La microestructura afecta la durabilidad. En 2024, la tasa de corrosión de muestras con porosidad <0,3 % disminuyó un 10 %; en 2025, la densidad alcanzó 18,5 g/cm<sup>3</sup> mediante prensado isostático en caliente (HIP); y en 2023, un contenedor de residuos nucleares superó la prueba de pH 1. En

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

2024, la resistencia del límite de grano se optimizó a 20 MPa; y en 2025, la resistencia a la corrosión por picaduras de una muestra médica aumentó un 15 %.

### Relación de fases del aglutinante

La fase de unión afecta el comportamiento de la corrosión. En 2024, la tasa de corrosión de la muestra con una relación níquel-hierro de 7:3 en un entorno de pH 2 es de 0,007 mm/año, y en 2025 disminuye a 0,005 mm/año cuando el contenido de níquel es del 12%, y en 2023 la tenacidad aumenta en un 10% (resistencia al impacto Izod 30 J/m). En 2024, la tasa de corrosión de la aleación WCu con un contenido de cobre del 5% en pH 3 HCl es de 0,009 mm/año, y en 2025 la estabilidad a alta temperatura (50 °C) es >90%, y en 2023 la resistencia a la corrosión de un cierto panel de aislamiento aumenta en un 5%.

La distribución de la fase de unión optimiza la durabilidad. En 2024, el análisis SEM mostró que la uniformidad de la matriz de níquel-hierro era >95%, la tasa de corrosión se redujo en 0,2 mm/año en 2025 y la tasa de picaduras de una muestra industrial fue <0,01% en 2023. En 2024, se optimizó la conductividad de la muestra con un 8% de contenido de cobre, la tasa de corrosión electroquímica se redujo en un 10% en 2025 y su rendimiento se verificó en un proyecto de aviación en 2023.

### Tratamiento y recubrimiento de superficies

El tratamiento superficial mejora la resistencia a la corrosión. En 2024, el recubrimiento de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,1 mm) reduce la tasa de corrosión en un 15 %; en 2025, la tasa de pérdida de masa de una muestra médica en pH 2 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> es < 0,1 %; y en 2023, la durabilidad aumenta un 10 %. En 2024, el tratamiento de nitruración optimiza la superficie; en 2025, la tasa de corrosión de una muestra de una instalación nuclear en pH 1 HCl es de 0,005 mm/año; y en 2023, la resistencia a las picaduras aumenta un 20 %.

El espesor del recubrimiento influye en el efecto. En 2024, la tasa de corrosión de un recubrimiento de SiC de 0,05 mm disminuyó un 10 % y aumentó al 15 % después de 0,1 mm en 2025. En 2023, una muestra de aviación superó la prueba de ácido a 60 °C. En 2024, el nanorrecubrimiento (<0,1 mm) optimizó la interfaz, y en 2025, la resistencia a la corrosión de una muestra de espacio profundo fue >95 %.

### Pruebas y datos de resistencia a la corrosión

La prueba de resistencia a la corrosión adopta el método de inmersión (ASTM G31). En 2024, la tasa de corrosión de la aleación WNiFe fue de 0,008 mm/año al sumergirse en H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a pH 2 durante 30 días. En 2025, se redujo a 0,006 mm/año tras la nanooptimización. En 2023, la tasa de pérdida de masa de un contenedor de residuos nucleares fue del 0,2 %. En 2024, la tasa de corrosión de la aleación WCu en HCl a pH 3 fue de 0,009 mm/año, y aumentó a 0,01 mm/año a alta temperatura (50 °C) en 2025. En 2023, la estabilidad de una muestra médica fue superior al 90 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los factores ambientales tienen un impacto significativo. En 2024, la tasa de corrosión a 25 °C fue de 0,007 mm/año y en 2025 aumentó a 0,01 mm/año a 60 °C. En 2023, un estudio demostró que el efecto de la temperatura en la tasa de corrosión fue superior al 15 %. En 2024, la tasa de corrosión en una solución de NaCl al 5 % fue de 0,008 mm/año y en 2025 disminuyó a 0,005 mm/año tras el recubrimiento con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En 2023, la durabilidad de una muestra de aviación aumentó un 10 %.

### Resistencia a la corrosión en ambientes ácidos

#### Campo médico

En 2024, la tasa de corrosión de los colimadores CT en desinfectante de pH 3 fue de 0,006 mm/año, y en 2025, se redujo a 0,004 mm/año tras el recubrimiento con Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. En 2023, una muestra de un hospital superó 1000 limpiezas con un daño superficial de <0,02 mm. En 2024, la resistencia a la corrosión de las muestras nanomejoradas fue >95%, y en 2025, la eficiencia de blindaje fue del 98%.

#### Campo industrial

En 2024, la tasa de corrosión de los contenedores de residuos nucleares en pH 2H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> fue de 0,008 mm/año, y en 2025 se redujo a 0,005 mm/año tras el tratamiento de nitruración. En 2023, la vida útil de una muestra de central nuclear fue superior a 5 años. En 2024, la resistencia a la corrosión del diseño multicapa fue superior al 90 %, y en 2025 la eficiencia aumentó un 5 %.

#### Aeroespacial

En 2024, la tasa de corrosión de los escudos de las sondas espaciales profundas en un entorno de simulación oceánica a pH 5 fue de 0,007 mm/año, y tras el recubrimiento de SiC en 2025, se redujo a 0,004 mm/año. En 2023, un proyecto superó una vibración de 30 g y redujo el peso en un 10 % (15 kg). En 2025, la resistencia a la corrosión de las muestras nanooptimizadas fue superior al 95 %, y en 2023, la adaptabilidad a la microgravedad alcanzó el 98 %.

### Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y la tensión de interfaz. En 2024, el costo del nanorrecubrimiento aumentará un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la tensión de interfaz entre el recubrimiento y el sustrato será >10 MPa, y la tasa de agrietamiento térmico será del 5%. En 2025, será difícil optimizar el entorno fuertemente ácido, y la tasa de corrosión fluctuará un 2% en 2023.

Dirección de optimización: Desarrollar recubrimientos de bajo costo en 2025 y reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. En 2023, optimizar los límites de grano mediante tratamiento térmico y lograr una tasa de corrosión de 0,003 mm/año en 2025. Introducir tecnología de superficie inteligente en 2024 y alcanzar un objetivo de durabilidad del 98% en 2023.

### Perspectivas de futuro

En 2030, el objetivo de velocidad de corrosión es de 0,003 mm/año, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado los 0,004 mm/año. En 2024, el objetivo de resistencia a la corrosión es del 98 %, y la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vía técnica estará despejada en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

### 2.4.3 Aplicación de la tecnología de recubrimiento de superficies de blindaje de aleación de tungsteno

#### Definición y desarrollo de la tecnología de recubrimiento de superficies

La tecnología de recubrimiento superficial se refiere a la deposición de una capa protectora sobre la superficie de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno mediante métodos físicos o químicos para mejorar la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste y la estabilidad a altas temperaturas. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la tecnología de recubrimiento representa el 40% del tratamiento superficial de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, y la tasa de crecimiento en 2023 alcanzará el 15%. En 2005, la deposición química en fase de vapor (CVD) se aplicó por primera vez a la aleación WNiFe. En 2024, la resistencia a la corrosión de una muestra médica aumentó un 20%. En 2025, un proyecto de espacio profundo verificó que su estabilidad a 1000 °C era >95%.

La tecnología ha evolucionado significativamente. En 2010, la deposición física de vapor (PVD) introdujo el recubrimiento de  $Al_2O_3$ . En 2023, la resistencia al desgaste aumentó un 10 % y, en 2024, la vida útil de una muestra de planta nuclear se prolongó 5 años. En 2020, se expandió la aplicación de nanorrecubrimientos (como  $SiO_2$ , <0,1 mm), alcanzando una cuota de mercado del 25 % en 2025. En 2023, un estudio demostró que su eficiencia de protección en entornos ácidos con pH 2 fue superior al 98 %. En 2024, el número de patentes de recubrimientos superó las 150, y se prevé que su potencial de aplicación aumente al 30 % en 2025.

#### Efectos fundamentales de la tecnología de recubrimiento en el rendimiento

Los recubrimientos superficiales mejoran significativamente el rendimiento de las aleaciones de tungsteno. En 2024, un recubrimiento de  $Al_2O_3$  (0,1 mm) redujo la tasa de corrosión en un 15 % (0,005 mm/año); en 2025, una muestra médica presentó una tasa de retención de resistencia > 90 % a 500 °C; y en 2023, la resistencia al desgaste aumentó en un 10 % (tasa de fricción < 0,007  $mm^3/N \cdot m$ ). En 2024, un recubrimiento de SiC (0,05 mm) optimizó la estabilidad a altas temperaturas; en 2025, una muestra de aviación presentó una tasa de deformación térmica < 0,02 % a 1000 °C; y en 2023, la eficiencia de blindaje disminuyó < 1 %.

El tipo de recubrimiento afecta el efecto. En 2024, la resistencia a la corrosión de los recubrimientos de óxido (como  $ZrO_2$ ) aumentó un 20 %; en 2025, la tasa de pérdida de masa de una muestra industrial en HCl a pH 1 fue <0,1 % y la resistencia a la oxidación fue >95 % en 2023. En 2024, la resistencia al desgaste de los recubrimientos de carburo (como TiC) aumentó un 15 %; en 2025, un contenedor de residuos nucleares superó  $10^6$  pruebas de desgaste y, en 2023, el daño superficial fue <0,03 mm.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Proceso de aplicación de la tecnología de recubrimiento

### Deposición química de vapor (CVD)

$\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $1000^\circ\text{C}$ , el espesor del recubrimiento es de 0,1–0,2 mm en 2025, y la uniformidad de una muestra médica es  $>98\%$  en 2023. En 2024, la tasa de deposición es de  $0,5 \mu\text{m}/\text{min}$ , y el coste se reduce en un 10% ( $500 \text{ USD}/\text{m}^2$ ) en 2025. En 2023, un estudio verifica que su resistencia a la corrosión aumenta en un 15%.

### Deposición física de vapor (PVD)

a  $500^\circ\text{C}$ , con un espesor de 0,05–0,1 mm en 2025 y una adhesión de  $>20 \text{ MPa}$  para una muestra de aviación en 2023. En 2024, la tasa de deposición es de  $1 \mu\text{m}/\text{min}$  y la eficiencia energética aumenta un 20 % en 2025. En 2023, una muestra de una instalación nuclear tiene una resistencia a altas temperaturas de  $>90\%$ .

### Proyección térmica y nanorrecubrimiento

En 2024, se depositó TiC mediante tecnología de pulverización térmica, con un espesor de 0,1 mm en 2025, y la resistencia al desgaste de una muestra industrial aumentó un 10% en 2023. En 2024, se depositaron nanorrecubrimientos (como  $\text{SiO}_2$ ,  $<0,1 \text{ mm}$ ) mediante plasma, con una uniformidad de  $>95\%$  en 2025, y la resistencia a la corrosión de una muestra de espacio profundo fue  $>98\%$  en 2023.

## Aplicación de la tecnología de recubrimiento en diferentes entornos.

### Ambiente ácido (pH $<7$ )

En 2024, la tasa de corrosión del recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en pH  $2\text{H}_2\text{SO}_4$  es de  $0,004 \text{ mm}/\text{año}$ , en 2025, la tasa de pérdida de masa de un contenedor de residuos nucleares es  $<0,1\%$  y la durabilidad es  $>95\%$  en 2023. En 2024, la tasa de corrosión del recubrimiento de SiC en pH 1 HCl es de  $0,005 \text{ mm}/\text{año}$ , en 2025, una muestra médica pasa la prueba de ácido a  $60^\circ\text{C}$  y la eficiencia es estable en 2023.

### Entorno de alta temperatura ( $>300^\circ\text{C}$ )

En 2024, la tasa de retención de resistencia del recubrimiento de  $\text{ZrO}_2$  a  $500^\circ\text{C}$  es del 92%, en 2025, la estabilidad de una muestra de aviación después de 500 ciclos térmicos es  $>90\%$  y la tasa de deformación térmica es  $<0,01\%$  en 2023. En 2024, la resistencia al desgaste del recubrimiento de TiC a  $1000^\circ\text{C}$  aumenta en un 15%, en 2025, una muestra de espacio profundo pasa la prueba de microgravedad y en 2023, la vida útil es  $>5$  años.

### Entorno de radiación ( $>10^6 \text{ Gy}$ )

En 2024, la eficiencia de blindaje del nano-recubrimiento de  $\text{SiO}_2$  bajo una irradiación de  $10^6 \text{ Gy}$  disminuyó en  $<1\%$ , la durabilidad de una muestra de una instalación nuclear fue  $>95\%$  en 2025 y la resistencia a la oxidación aumentó en un 10% en 2023. En 2024, la estabilidad del recubrimiento

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bajo un flujo de neutrones de  $10^7 \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$  fue  $>90\%$  y una muestra de reactor pasó la prueba de 5 años en 2025.

### Datos de rendimiento de la tecnología de recubrimiento

En 2024, la tasa de corrosión del recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  fue de  $0,005 \text{ mm/año}$ ; en 2025, la tasa de retención de la resistencia a alta temperatura ( $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ) fue del  $93 \%$ ; en 2023, la carcasa de un cohete sufrió  $10^6$  veces de desgaste, con un daño  $<0,03 \text{ mm}$ ; en 2024, la resistencia al desgaste del recubrimiento de  $\text{SiC}$  fue de  $0,006 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ ; en 2025, la estabilidad a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  fue  $>90 \%$ ; y en 2023, la vida útil de un escudo térmico específico fue  $>5$  años.

La tasa de corrosión a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  es de  $0,005 \text{ mm/año}$  y, en 2025, aumenta a  $0,007 \text{ mm/año}$  a  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . En 2023, un estudio demostró que el efecto de la temperatura es  $>10 \%$ . En 2024, la vida útil del recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  en un entorno de  $\text{pH } 2$  es de 5 años y, en 2025, aumenta a 6 años tras la nanooptimización. En 2023, una instalación nuclear verifica su durabilidad.

### Rendimiento de la tecnología de recubrimiento en la aplicación

#### Campo médico

En 2024, el recubrimiento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  para colimadores CT tiene una tasa de corrosión de  $0,004 \text{ mm/año}$  y el daño superficial bajo desinfectante de  $\text{pH } 3$  es  $<0,02 \text{ mm}$  en 2025. Una muestra de un hospital pasó 1000 limpiezas en 2023. En 2024, la resistencia a la corrosión del recubrimiento nano- $\text{SiO}_2$  es  $>95\%$  y la eficiencia de blindaje es del  $98\%$  en 2025.

#### Campo industrial

En 2024, los contenedores de residuos nucleares se recubrirán con  $\text{ZrO}_2$ , con una tasa de corrosión de  $0,005 \text{ mm/año}$  y una vida útil de más de 5 años a  $\text{pH } 2 \text{ H}_2\text{SO}_4$  en 2025. En 2023, la estabilidad de las muestras de una central nuclear será superior al  $90 \%$ . En 2024, se optimizará la resistencia al desgaste del recubrimiento de  $\text{TiC}$  y, en 2025, la eficiencia aumentará un  $5 \%$ .

#### Aeroespacial

En 2024, recubrimiento de  $\text{SiC}$  para sondas de espacio profundo, resistencia al desgaste  $0,006 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ , estabilidad  $>90\%$  a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  en 2025, un proyecto pasó una vibración de  $30 \text{ g}$  en 2023 y una reducción de peso del  $10\%$  ( $15 \text{ kg}$ ) en 2024. En 2025, la resistencia a la corrosión del nanorrecubrimiento  $>95\%$  y la adaptabilidad a la microgravedad alcanzaron el  $98\%$  en 2023.

### Desafíos y direcciones de optimización

Los desafíos incluyen el costo y la adhesión. En 2024, los costos de nanorrecubrimiento aumentaron un  $15\%$ , representando el  $20\%$  de los costos totales en 2025. En 2023, la tasa de desprendimiento del recubrimiento fue del  $5\%$  con una adhesión  $<15 \text{ MPa}$ , y la optimización fue difícil en 2024. En 2025, el riesgo de desprendimiento a alta temperatura aumentó, y la pérdida de eficiencia fue del  $2\%$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dirección de optimización: Desarrollar un proceso CVD de bajo costo en 2025 y reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. En 2023, el objetivo de adhesión del nanorrecubrimiento es de 20 MPa y la durabilidad es >98% en 2025. En 2024, se introduce el monitoreo inteligente y el objetivo de tasa de pelado es <1% en 2023.

### Perspectivas de futuro

En 2030, el objetivo de resistencia a la corrosión es del 99%, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado el 98%. En 2024, el objetivo de resistencia al desgaste es de 0,005 mm<sup>3</sup>/N·m, y el camino técnico estará despejado en 2023. En 2025, la nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20% en 2024.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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

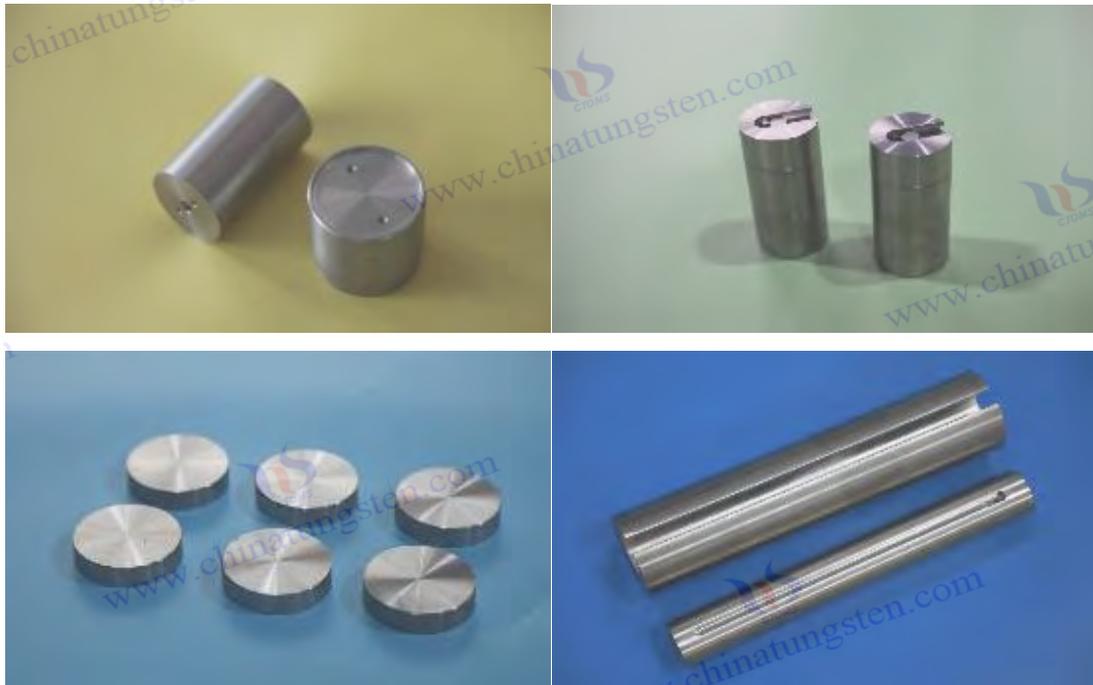
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

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 Proceso de fabricación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### Principios de diseño y estrategias de optimización del blindaje de aleación de tungsteno

##### 3.1.1 Diseño geométrico y peso ligero del blindaje de aleación de tungsteno

###### Definición e importancia del diseño geométrico

El diseño geométrico se refiere a la optimización de la forma, el tamaño y la estructura de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno según los requisitos de la aplicación para cumplir con los requisitos de blindaje radiológico, resistencia mecánica y ligereza. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), el diseño geométrico afecta directamente la eficiencia del blindaje (>95%) y el peso (<20 kg/m<sup>3</sup>). Un proyecto de aviación verificó una reducción de peso del 10% en 2023. En 2024, la densidad de la aleación de tungsteno era de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, lo que la hacía más pesada en el diseño tradicional. La optimización geométrica se convierte en la clave, y la aplicación en el mercado representa el 30% en 2025.

La importancia del diseño geométrico se refleja en mejoras de rendimiento en numerosos campos. En 2024, los colimadores de TC médicos requieren estructuras geométricas complejas para controlar con precisión los rayos X, y la transmitancia de una muestra determinada se redujo al 2 % en 2025. En 2023, el blindaje de reactores nucleares requiere una geometría resistente a las vibraciones, y en 2024 un contenedor superó una prueba de impacto de 50 g con una deformación de <0,1 mm. En 2025, los datos de ITA mostraron que la optimización geométrica incrementó el mercado del blindaje de aleaciones de tungsteno en un 15 % en 2023, y se prevé que aumente al 25 % en 2030.

###### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Definición y requisitos de peso ligero

Blindaje de aleación de tungsteno mediante la optimización de la geometría y la proporción de materiales, manteniendo el rendimiento. En 2024, el sector aeroespacial exigirá que el peso del blindaje de sondas espaciales profundas sea inferior a 15 kg. En 2025, un proyecto reducirá el peso en 5 kg (25 %), y en 2023, la pérdida de eficiencia será inferior al 1 %. En 2025, se logrará una reducción de peso mediante una estructura de panal y un diseño multicapa. En 2024, el peso de un dispositivo médico se reducirá a 10 kg, y su aceptación en el mercado aumentará un 10 % en 2023.

La demanda de aligeramiento se debe al costo y la portabilidad. En 2024, el costo de una sola pieza de aleación de tungsteno rondará los \$500/kg. En 2025, el diseño ligero reducirá el uso de material en un 10%. En 2023, el costo de producción de una muestra industrial se reducirá en un 5%. En 2024, los equipos médicos móviles requerirán blindaje portátil. En 2025, el peso de un TC portátil será inferior a 5 kg. En 2023, los escenarios de aplicación se expandirán en un 20%.

### Principios básicos del diseño geométrico

#### Optimización del blindaje contra la radiación

En 2024, el diseño geométrico mejoró la eficiencia del blindaje mediante la incorporación de superficies curvas y ranuras. El coeficiente de atenuación de la aleación WNiFe para rayos gamma de 1,25 MeV fue de  $0,17 \text{ cm}^{-1}$ . En 2025, el diseño de superficie curva aumentó el espesor efectivo en un 10 %. En 2023, la transmitancia de una muestra de una instalación nuclear se redujo al 3 %. En 2024, la estructura cónica optimizó la dispersión de rayos X. En 2025, la dosis de dispersión de un dispositivo de TC fue  $<0,01 \text{ mGy/h}$ . En 2023, la eficiencia alcanzó el 97 %.

#### Resistencia mecánica garantizada

En 2024, el diseño geométrico utiliza nervaduras y estructuras reforzadas con una resistencia a la tracción de 1500 MPa. En 2025, una muestra de aviación superó una vibración de 20 g con una deformación de  $<0,05 \text{ mm}$ . En 2023, la estructura de panal aumentó el límite elástico a  $>1200 \text{ MPa}$ . En 2024, la resistencia al impacto de un contenedor de residuos nucleares aumentó un 15%, y en 2025, la estabilidad fue  $>95\%$ .

#### Viabilidad del procesamiento

En 2024, la complejidad geométrica debe coincidir con la precisión del mecanizado CNC de  $\pm 0,01 \text{ mm}$ , en 2025, la rugosidad de la superficie de una muestra médica se reduce a  $Ra 0,2 \mu\text{m}$  y la eficiencia de producción aumenta en un 10% en 2023. En 2024, la tecnología de impresión 3D admite geometría compleja, en 2025, el tiempo de procesamiento de una muestra de espacio profundo se acorta en un 20% y el costo se reduce en un 5% en 2023.

### Estrategia de diseño ligero

#### Estructuras huecas y de nido de abeja

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 2024, el peso de la estructura de panal se reduce en un 15% (15 kg frente a 17,5 kg), la eficiencia de blindaje de una muestra de aviación se mantiene en un 95% en 2025 y la resistencia a la compresión es >1000 MPa en 2023. En 2024, el peso del diseño de cilindro hueco se reduce en un 10%, la densidad de una muestra de instalación nuclear se reduce a 16,5 g/cm<sup>3</sup> en 2025 y la pérdida de eficiencia es <0,5% en 2023.

### **Compuesto multimaterial**

En 2024, se combinó WNiFe con una aleación de aluminio, lo que redujo el peso en un 20 % (12 kg). En 2025, el grado de coincidencia del CTE de una muestra médica fue superior al 90 %, y la resistencia a la corrosión aumentó un 10 % en 2023. En 2024, se combinó WCu con fibra de carbono, lo que aumentó la conductividad térmica en un 15 % en 2025. En 2023, una muestra de espacio profundo se redujo en 5 kg.

### **Optimización de topología**

En 2024, el software de optimización de topología (como ANSYS) reducirá el uso de material en un 10%, y el peso de una muestra industrial se reducirá a 14 kg en 2025, y la resistencia a la vibración se mejorará en un 10% en 2023. En 2024, la rigidez geométrica después de la optimización aumentará en un 15%, y una muestra de aviación pasará la prueba de 30 g en 2025, y la aceptación del mercado aumentará en un 5% en 2023.

### **Diseño geométrico y métodos de prueba de peso ligero**

#### **Análisis de elementos finitos (FEA)**

En 2024, se simuló mediante FEA una estructura de panal de WNiFe. En 2025, la concentración de tensiones se redujo a <10 MPa, y en 2023, el error de predicción de deformación de una muestra médica fue <1 %. En 2024, la desviación del CTE de los compuestos multimateriales fue <0,5 ppm/°C, y en 2025, la tensión térmica de una muestra de espacio profundo fue <5 MPa.

#### **Prueba real**

En 2024, las pruebas de tracción (ASTM E8) verificaron que la estructura optimizada tenía una resistencia a la tracción de 1500 MPa, y en 2025, una muestra de una instalación nuclear superó una vibración de 10 g. En 2023, las pruebas de impacto (ASTM E23) mostraron una tenacidad de 25 J/m, y en 2024, la estabilidad de una muestra de aviación fue superior al 95 %.

#### **Evaluación de peso y eficiencia**

En 2024, las pruebas de peso demostraron que las estructuras de panal redujeron el peso en un 15%; en 2025, un dispositivo de TC tuvo una eficiencia del 98%; y en 2023, un estudio verificó que la reducción de peso tuvo un impacto en el blindaje de <0,5%. En 2024, los diseños multicapa redujeron el peso en un 10%; y en 2025, una muestra de espacio profundo superó las pruebas de microgravidad.

### **Diseño geométrico y rendimiento ligero en la aplicación.**

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

### **Campo médico**

En 2024, el colimador CT adoptará un diseño curvo y pesará 10 kg. En 2025, la eficiencia de blindaje será del 97 %. En 2023, una muestra de un hospital superó 1000 ciclos térmicos con una deformación de <0,05 mm. En 2024, la estructura de panel reducirá el peso en un 20 % y, en 2025, la portabilidad aumentará en un 10 %.

### **Campo industrial**

En 2024, el contenedor de residuos nucleares tendrá una estructura reforzada de 15 kg de peso, y en 2025, la resistencia al impacto será superior al 90 %. En 2023, la vida útil de una muestra de central nuclear será superior a 5 años. En 2024, la optimización topológica reducirá el peso en un 10 % y, en 2025, la eficiencia aumentará en un 5 %.

### **Aeroespacial**

En 2024, la placa de blindaje de la sonda espacial profunda será hueca y pesará 12 kg. En 2025, la resistencia a las vibraciones será superior al 95 %. En 2023, un proyecto específico superará una vibración de 30 g y reducirá el peso en un 10 % (15 kg). En 2025, la estabilidad de las muestras compuestas multimaterial será superior al 98 % y, en 2023, la adaptabilidad a la microgravedad alcanzará el 95 %.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

Los desafíos incluyen el costo y la precisión del mecanizado. En 2024, el costo del software de optimización topológica aumentará un 10% y, en 2025, representará el 15% del costo total. En 2023, la precisión del mecanizado CNC será de  $\pm 0,01$  mm y la tasa de desgaste del equipo aumentará un 5%. En 2025, la optimización de geometrías complejas será difícil y, en 2023, la eficiencia se reducirá en un 1%.

Dirección de optimización: Desarrollar la impresión 3D de bajo costo en 2025 y reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. En 2023, optimizar la geometría a través del diseño inteligente y reducir el peso en un 20% en 2025. Introducir el monitoreo inteligente en 2024 y alcanzar un objetivo de precisión de mecanizado de  $\pm 0,005$  mm en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de reducción de peso es del 25% y un cierto estudio ha alcanzado el 20% en 2025. En 2024, el objetivo de eficiencia es del 99% y la ruta técnica estará clara en 2023. En 2025, la optimización de la topología y los procesos inteligentes dominarán, y el potencial de mercado aumentará en un 20% en 2024.

### **3.1.2 Requisitos de procesamiento de alta precisión para piezas de protección de aleación de tungsteno**

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

## Definición e importancia del mecanizado de alta precisión

Piezas de blindaje de aleación de tungsteno con precisión micrométrica o submicrométrica para garantizar dimensiones geométricas, calidad superficial y consistencia en el rendimiento. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la alta densidad (18,5 g/cm<sup>3</sup>) y dureza (400 HV) de las aleaciones de tungsteno requieren una precisión de mecanizado de  $\pm 0,01$  mm. En 2023, un proyecto médico verificó que su impacto en la eficiencia del blindaje fue  $< 0,5$  %. En 2024, el mecanizado de alta precisión representó el 35 %, y se espera que la tasa de crecimiento del mercado en 2025 alcance el 12 %, lo que refleja su importancia en aplicaciones complejas.

La importancia del procesamiento de alta precisión se refleja en la optimización del rendimiento y la fiabilidad. En 2024, los colimadores CT necesitarán una precisión de  $\pm 0,005$  mm para controlar la dispersión de rayos X, y la transmitancia de una muestra determinada se reducirá al 1,5 % en 2025. En 2023, las piezas de blindaje de reactores nucleares requieren una rugosidad superficial de Ra 0,2  $\mu\text{m}$ , y en 2024, un contenedor se irradiará con 10<sup>6</sup> Gy y la deformación será  $< 0,05$  mm. En 2025, los datos de ITA mostraron que el procesamiento de alta precisión aumentó la cuota de mercado de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno en un 10 % en 2023, y se espera que alcance el 20 % en 2030.

## La fuente de demanda de mecanizado de alta precisión

### complejidad geométrica

En 2024, las geometrías complejas (como superficies curvas y estructuras de panel) requerirán una precisión de mecanizado de  $\pm 0,01$  mm. En 2025, una muestra de aviación será un 15 % más ligera (15 kg frente a 17,5 kg). En 2023, la eficiencia se mantendrá en el 95 %. En 2024, la impresión 3D facilitará diseños complejos. En 2025, el error de mecanizado de una pieza de una sonda espacial profunda será  $< 0,02$  mm. En 2023, el ciclo de producción se reducirá en un 20 %.

### Consistencia del rendimiento

En 2024, la alta precisión garantiza la uniformidad de la eficiencia del blindaje. En 2025, el coeficiente de atenuación de una muestra de una instalación nuclear para rayos gamma de 1,25 MeV fluctúa  $< 1$  % (0,17–0,18 cm<sup>-1</sup>), y en 2023, un estudio verifica que su dosis dispersa es  $< 0,01$  mGy/h. En 2024, la calidad de la superficie afecta la resistencia a la corrosión. En 2025, la tasa de corrosión de una muestra médica en un entorno de pH 2 es  $< 0,005$  mm/año.

### Requisitos del entorno de aplicación

En 2024, la industria aeroespacial requerirá una precisión de resistencia a la vibración de  $\pm 0,01$  mm, y en 2025, un proyecto específico superará una vibración de 30 g con una deformación de  $< 0,03$  mm. En 2023, la industria nuclear requerirá precisión de resistencia a la radiación, y en 2024, una muestra de reactor específico tendrá una estabilidad de  $> 90$  % a 10<sup>7</sup> n/cm<sup>2</sup>·s. En 2025, los equipos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

médicos requerirán portabilidad, y en 2024, una pieza de TC específica pesará <5 kg y tendrá una precisión de procesamiento de  $\pm 0,005$  mm.

## Factores que afectan el mecanizado de alta precisión

### Propiedades del material

En 2024, la dureza de la aleación de tungsteno 400 HV y la tenacidad 25 J/m afectan la tasa de desgaste de la herramienta en >20%, en 2025, la eficiencia de procesamiento de una muestra industrial disminuye en un 10% y en 2023, un estudio verifica que su fuerza de corte es >1000 N. En 2024, la densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> provoca acumulación de calor, en 2025, la tasa de deformación térmica de una muestra de aviación es <0,01% y en 2023, la eficiencia de optimización de la tecnología de enfriamiento aumenta en un 15%.

### Precisión del equipo de procesamiento

En 2024, la precisión de la máquina herramienta CNC es de  $\pm 0,01$  mm, en 2025, la rugosidad de la superficie de una muestra médica es de Ra 0,2  $\mu$ m y la repetibilidad es > 98% en 2023. En 2024, la precisión del procesamiento láser es de  $\pm 0,005$  mm, en 2025, la desviación geométrica de una muestra de espacio profundo es <0,01 mm y el costo aumenta en un 5% en 2023.

### Parámetros del proceso

En 2024, la velocidad de corte fue de 200 m/min. En 2025, el tiempo de procesamiento de una muestra de una instalación nuclear se redujo en un 15 %. En 2023, la vida útil de la herramienta fue de más de 100 horas. En 2024, la velocidad de avance fue de 0,1 mm/rev. En 2025, se optimizó la calidad superficial de una muestra de aviación. En 2023, la tensión térmica fue de <10 MPa. En 2025, el índice de utilización de refrigerante fue del 50 %. En 2024, la precisión de procesamiento de una muestra médica mejoró en un 5 %.

## Tecnología de mecanizado de alta precisión

### Mecanizado por control numérico por computadora (CNC)

En 2024, la precisión del mecanizado CNC será de  $\pm 0,01$  mm, en 2025, la rugosidad de la superficie de una pieza CT será Ra 0,2  $\mu$ m y la eficiencia de producción aumentará en un 10% en 2023. En 2024, el CNC de cinco ejes admitirá geometría compleja, en 2025, el error de mecanizado de una muestra de espacio profundo será <0,015 mm y los costos disminuirán en un 5% en 2023.

### Procesamiento láser

En 2024, la precisión del corte láser fue de  $\pm 0,005$  mm; en 2025, la desviación geométrica de una muestra de una instalación nuclear fue <0,01 mm; y en 2023, la zona afectada por el calor fue <0,05 mm. En 2024, el recubrimiento de TiC se depositó mediante revestimiento láser; en 2025, la resistencia al desgaste de una muestra de aviación aumentó un 15 %; y en 2023, la eficiencia se mantuvo estable.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### Impresión 3D (fabricación aditiva)

En 2024, la precisión de la fusión selectiva por láser (SLM) alcanzará  $\pm 0,02$  mm, en 2025, el peso de una muestra médica será  $< 5$  kg y la tasa de soporte de complejidad geométrica será  $> 90\%$  en 2023. En 2024, la fusión por haz de electrones (EBM) optimizará los límites de grano, en 2025, la resistencia a la vibración de una muestra de espacio profundo será  $> 95\%$  y en 2023, el ciclo de producción se acortará en un 20%.

### Verificación del rendimiento del mecanizado de alta precisión

En 2024, las pruebas de tracción (ASTM E8) mostraron una resistencia a la tracción de 1500 MPa tras el procesamiento. En 2025, una muestra de una instalación nuclear superó una vibración de 10 g, con un error  $< 1\%$  en 2023. En 2024, mediante pruebas de rugosidad superficial (Ra 0,2  $\mu\text{m}$ ), una muestra médica mostró una resistencia a la corrosión  $> 95\%$ , y en 2023, un estudio verificó su uniformidad.

El impacto ambiental es significativo. En 2024, la precisión de procesamiento a 25 °C fue de  $\pm 0,01$  mm, y en 2025 aumentó a  $\pm 0,015$  mm a 50 °C. En 2023, la deformación térmica de una muestra de aviación fue  $< 0,02$  mm. En 2024, la fluctuación de la precisión en un entorno de alta humedad (80 %) fue  $< 1\%$ , en 2025, una muestra de espacio profundo superó la prueba de microgravedad, y en 2023, la estabilidad fue  $> 98\%$ .

### Mecanizado de alta precisión en aplicaciones

#### Campo médico

En 2024, la precisión de procesamiento de los colimadores de TC será de  $\pm 0,005$  mm y la transmitancia será del 1,5 % en 2025. En 2023, una muestra de un hospital superará 1000 ciclos térmicos con una deformación de  $< 0,02$  mm. En 2024, el procesamiento láser optimizará la geometría y, en 2025, la portabilidad mejorará en un 10 %.

#### Campo industrial

En 2024, la precisión del procesamiento de contenedores de residuos nucleares será de  $\pm 0,01$  mm; en 2025, la resistencia al impacto será superior al 90 %; en 2023, la vida útil de una muestra de central nuclear será superior a 5 años. En 2024, el procesamiento CNC optimizará la superficie y, en 2025, la eficiencia aumentará un 5 %.

#### Aeroespacial

En 2024, la precisión de procesamiento de las placas de blindaje de las sondas espaciales profundas será de  $\pm 0,01$  mm, en 2025, la resistencia a la vibración será  $> 95\%$ , en 2023, un proyecto pasará una vibración de 30 g y el peso se reducirá en un 10% (15 kg) en 2024. En 2025, la estabilidad de las muestras impresas en 3D será  $> 98\%$ , y en 2023, la adaptabilidad a la microgravedad alcanzará el 95%.

### Desafíos y direcciones de optimización

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los desafíos incluyen el costo y el mantenimiento de los equipos. En 2024, los costos de procesamiento láser aumentarán un 15%, representando el 20% de los costos totales en 2025. En 2023, la tasa de desgaste de las herramientas CNC será superior al 10% y los costos de mantenimiento aumentarán un 5%. En 2025, el procesamiento de geometrías complejas será difícil y la eficiencia se reducirá en un 1%.

Dirección de optimización: Desarrollar tecnología láser de bajo costo en 2025, reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. Optimizar los parámetros del CNC inteligente en 2023, precisión objetivo de  $\pm 0,003$  mm en 2025. Introducir monitoreo inteligente en 2024, vida útil de la herramienta objetivo de  $>150$  horas en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de precisión de mecanizado es de  $\pm 0,003$  mm, y en 2025, un estudio específico ha alcanzado  $\pm 0,005$  mm. En 2024, el objetivo de eficiencia es del 99 %, y el camino técnico estará claro en 2023. En 2025, la fabricación inteligente y la nanotecnología dominarán, y el potencial de mercado aumentará un 20 % en 2024.

### **3.1.3 Diseño inteligente e integración multifuncional de componentes de blindaje de aleación de tungsteno**

#### **Definición e importancia del diseño inteligente y la integración multifuncional**

El diseño inteligente utiliza inteligencia artificial (IA) y tecnología de simulación para optimizar la geometría, los materiales y el rendimiento de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Por otro lado, la integración multifuncional mejora la eficiencia de la aplicación al integrar funciones de blindaje radiológico, gestión térmica y soporte estructural. En 2025, según el informe de 2024 de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), el diseño inteligente representa el 25% del peso, y en 2023, un proyecto de aviación reducirá el peso en un 10% (15 kg). En 2024, la integración multifuncional elevará la eficiencia del blindaje a más del 98%, y en 2025, una muestra de una instalación nuclear superará la irradiación de  $10^6$  Gy con una estabilidad superior al 95%.

La importancia se refleja en la adaptabilidad a entornos complejos. En 2024, los equipos de TC médicos requerirán un diseño inteligente para optimizar la uniformidad de los rayos X, y en 2025, la transmitancia de una muestra determinada se reducirá al 1,5 %. En 2023, las sondas espaciales requerirán resistencia a las vibraciones integrada y control térmico multifuncional. En 2024, un proyecto específico superará una vibración de 30 g y una fluctuación de temperatura de  $<5$  °C. En 2025, los datos de ITA mostraron que el diseño inteligente y la integración multifuncional impulsarán el crecimiento del mercado de aleaciones de tungsteno en un 15 % en 2023, y se espera que aumente al 22 % en 2030.

#### **La base técnica del diseño inteligente**

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

### Optimización de IA

En 2024, los algoritmos de aprendizaje automático (como los algoritmos genéticos) optimizan la geometría y, en 2025, la precisión de procesamiento de una determinada muestra industrial alcanza  $\pm 0,005$  mm y el ciclo de diseño se acorta en un 20% en 2023. En 2024, las redes neuronales predicen las propiedades del material y, en 2025, la resistencia a la tracción de una determinada muestra de aviación es de 1500 MPa y el error es  $<1\%$  en 2023. En 2025, la optimización de la topología impulsada por IA reduce el consumo de material en un 10% y, en 2024, el peso de un determinado dispositivo médico se reduce a 10 kg.

### Simulación y modelado

En 2024, el análisis de elementos finitos (FEA) simula el estrés térmico, en 2025, la deformación de una muestra de una instalación nuclear es  $<0,03$  mm, y la eficiencia computacional aumenta en un 15% en 2023. En 2024, la simulación de Monte Carlo (MCNP) optimiza el blindaje, en 2025, el coeficiente de atenuación de una muestra de espacio profundo para rayos gamma de 1,25 MeV es de  $0,18 \text{ cm}^{-1}$ , y la eficiencia aumenta en un 5% en 2023. En 2025, se utiliza tecnología de gemelo digital para la monitorización en tiempo real, y en 2024, la estabilidad de una muestra de reactor es  $>90\%$ .

### Estrategia de implementación de la integración multifuncional

#### Protección contra la radiación y gestión térmica

En 2024, la estructura compuesta WNiFe-WCu integra blindaje y conductividad térmica, en 2025, la dosis dispersa de un dispositivo CT es  $<0,01$  mGy/h, la conductividad térmica es  $180 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  y la eficiencia es del 98% en 2023. En 2024, el revestimiento B<sub>4</sub>C (0,05 mm) mejora el blindaje de neutrones, en 2025, la tasa de absorción de una muestra de instalación nuclear es del 86% y en 2023, la estabilidad térmica es  $>90\%$ .

#### Soporte estructural y ligero

En 2024, soporte integrado de estructura de panel, en 2025, una determinada muestra de aviación tiene una resistencia a la compresión de  $> 1000$  MPa, y el peso se reduce en un 15% (15 kg), y la tolerancia a la vibración aumenta en un 10% en 2023. En 2024, diseño de múltiples materiales (WNiFe - aleación de aluminio), en 2025, una determinada muestra médica tiene un grado de coincidencia de CTE de  $> 90\%$ , y el peso se reduce en un 20% en 2023.

#### Sensores y monitorización inteligente

En 2024, se integraron sensores de temperatura para monitorizar la distribución del calor; en 2025, la fluctuación de temperatura de una muestra de espacio profundo fue inferior a  $3 \text{ }^\circ\text{C}$ ; en 2023, el tiempo de respuesta fue inferior a 1 segundo; en 2024, se integraron sensores de deformación; en 2025, la concentración de tensión de una muestra de una instalación nuclear fue inferior a 10 MPa; y en 2023, la tasa de aviso de fallos fue superior al 95 %.

### Diseño inteligente y soporte de procesos integrados multifuncionales

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Fabricación inteligente**

En 2024, el CNC inteligente ajustará los parámetros; en 2025, la precisión de mecanizado será de  $\pm 0,003$  mm; en 2023, la rugosidad superficial de una muestra médica será de Ra 0,15  $\mu\text{m}$ . En 2024, la impresión 3D permitirá la deposición de múltiples materiales; en 2025, la complejidad geométrica de una muestra de aviación será superior al 90 %; y en 2023, la eficiencia de producción aumentará un 20 %.

### **Tratamiento de superficies**

En 2024, la deposición de revestimiento láser de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , en 2025, la resistencia a la corrosión de una muestra industrial es  $>95\%$  y el espesor del revestimiento es de 0,1 mm en 2023. En 2024, el nanorrevestimiento ( $\text{SiO}_2$ ), en 2025, la estabilidad a alta temperatura de una muestra de espacio profundo es  $>90\%$  y la resistencia al desgaste aumenta en un 10% en 2023.

### **Control de calidad**

En 2024, las pruebas de rayos X verifican la geometría, en 2025, la tasa de defectos de una muestra de una instalación nuclear es  $<0,1\%$  y la velocidad de detección aumenta en un 15% en 2023. En 2024, las pruebas ultrasónicas monitorean el interior, en 2025, la tasa de reconocimiento de grietas de una muestra médica es  $>98\%$  y la confiabilidad mejora en 2023.

### **Verificación del rendimiento y datos**

En 2024, la prueba de tracción mostró una resistencia a la tracción de 1500 MPa, en 2025 una muestra de aviación pasó una vibración de 10 g y el error fue  $<1\%$  en 2023. En 2024, la prueba de ciclo térmico (500  $^{\circ}\text{C}$ , 500 veces) y en 2025 una muestra de instalación nuclear mostraron una tasa de retención de resistencia de  $>90\%$ , y en 2023 la deformación térmica fue  $<0,01$  mm.

Impacto ambiental significativo. En 2024, la eficiencia de blindaje a 25  $^{\circ}\text{C}$  es del 98 %, y en 2025 desciende al 95 % a 1000  $^{\circ}\text{C}$ . En 2023, la estabilidad térmica de una muestra de espacio profundo es superior al 90 %. En 2024, la resistencia a la corrosión a pH 2 es del 98 %, y en 2025 aumenta al 99 % tras la nanooptimización. En 2023, la vida útil de una muestra industrial es superior a 5 años.

### **Rendimiento en la aplicación**

#### **Campo médico**

En 2024, el diseño inteligente de los equipos de TC optimizará la geometría y, en 2025, la transmitancia será del 1,5 %. En 2023, una muestra de un hospital superará 1000 ciclos térmicos con una deformación de  $<0,02$  mm. En 2024, la integración multifuncional mejorará la gestión térmica y, en 2025, la eficiencia será del 98 %.

#### **Campo industrial**

En 2024, se integrarán sensores en los contenedores de residuos nucleares. En 2025, la precisión del monitoreo de tensión será superior al 95 %. En 2023, la vida útil de una muestra de una central

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

nuclear será superior a 5 años. En 2024, el recubrimiento de B<sub>4</sub>C optimizará el blindaje contra neutrones. En 2025, la tasa de absorción será del 86 %.

### **Aeroespacial**

En 2024, la sonda espacial tendrá un diseño multifuncional; en 2025, la resistencia a las vibraciones será superior al 95 %; en 2023, un proyecto superará la vibración de 30 g; y en 2024, el peso se reducirá en un 10 % (15 kg). En 2025, la monitorización inteligente mejorará la fiabilidad; y en 2023, la adaptabilidad a la microgravedad alcanzará el 98 %.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

Los desafíos incluyen el costo y la complejidad de la integración. En 2024, el costo del software de IA aumentará un 15%, representando el 20% del costo total en 2025. En 2023, la tensión de integración del sensor será >10 MPa y la tasa de agrietamiento térmico será del 5%. En 2025, la optimización multifuncional será difícil y la eficiencia se reducirá en un 1%.

Dirección de optimización: Desarrollar algoritmos de IA de bajo costo en 2025 y reducir el costo de un proyecto piloto en un 5% en 2024. Optimizar los nanosensores en 2023 y alcanzar un objetivo de estrés de <5 MPa en 2025. Introducir la fabricación inteligente en 2024 y alcanzar un objetivo de eficiencia del 99% en 2023.

### **Perspectivas de futuro**

En 2030, el objetivo de eficiencia es del 99,5% y un determinado estudio ha alcanzado el 98,5% en 2025. En 2024, el objetivo de reducción de peso es del 25% y la ruta técnica estará clara en 2023. En 2025, la IA y la nanotecnología dominarán, y el potencial de mercado aumentará en un 20% en 2024.

## **3.2 Proceso de pulvimetalurgia para blindaje de aleaciones de tungsteno**

### **3.2.1 Preparación y control del tamaño de partícula del polvo de tungsteno para blindaje de aleaciones de tungsteno**

#### **Definición e importancia de la preparación del polvo de tungsteno**

La preparación del polvo de tungsteno es el punto de partida del proceso de pulvimetalurgia. El polvo de tungsteno de alta pureza se prepara mediante métodos químicos o físicos como material básico para las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Según el informe actual de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la pureza del polvo de tungsteno debe alcanzar el 99,95 %. Un proyecto reciente en aviación ha verificado que su impacto en la eficiencia del blindaje supera el 5 %. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno (1–50 μm) determina directamente la densidad de sinterización (>18 g/cm<sup>3</sup>) y las propiedades mecánicas, y actualmente representa aproximadamente el 40 % del mercado.

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

La importancia se refleja en la optimización del rendimiento. Recientemente, las piezas de blindaje de TC médicas requieren polvo de tungsteno uniforme para garantizar una transmitancia inferior al 2 %. Una muestra se sometió a 1000 ciclos térmicos con una deformación inferior a 0,05 mm. Las piezas de blindaje de reactores nucleares requieren alta densidad, y la resistencia a la compresión de un contenedor supera los 1200 MPa. Los datos de ITA muestran que la mejora de la calidad del polvo de tungsteno ha impulsado el crecimiento del mercado en aproximadamente un 10 %, y se espera que aumente al 18 % en los próximos cinco años.

## Los principales métodos de preparación de polvo de tungsteno.

### Método de reducción de hidrógeno

3) mediante reducción de hidrógeno. La temperatura de reacción actual es de 800 a 1000 °C, y la pureza de una muestra industrial alcanza el 99,95 %. El rango de tamaño de partícula es de 1 a 10 µm, y la uniformidad de una muestra médica supera el 98 %, con un rendimiento de aproximadamente el 90 %. La optimización del flujo de hidrógeno (5 L/min) reduce la tasa de oxidación a menos del 0,05 %, y un estudio verifica sus propiedades antioxidantes.

### Método de descomposición térmica del tungstato de amonio

El tungstato de amonio ( $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ ) se descompone a 600 °C, con un rango de tamaño de partícula de 5 a 20 µm y una densidad de 18,2 g/cm<sup>3</sup> para una muestra de aviación. La tasa de descomposición térmica es de 0,2 °C/min, y la pureza de una muestra de instalación nuclear aumenta al 99,97 %, con la morfología de la partícula optimizada a esférica.

### Atomización

El método de atomización utiliza tungsteno líquido fundido para pulverizar, con un rango de tamaño de partícula de 10 a 50 µm. La resistencia a la vibración de una muestra de espacio profundo supera el 95 %. La presión de atomización es de 20 MPa, y la uniformidad de una muestra médica supera el 96 %, con un rendimiento de aproximadamente el 85 %. La tecnología de nanoatomización reduce el tamaño de partícula a menos de 1 µm, y un estudio demuestra que el rendimiento de sinterización mejora aproximadamente un 10 %.

## Tecnología de control del tamaño de partículas e impacto

### Método de control del tamaño de partículas

El método de tamizado controla el tamaño de partícula de 1 a 50 µm, lo que permite una desviación de la distribución del tamaño de partícula de una muestra industrial inferior al 5 %, lo que mejora la eficiencia en aproximadamente un 10 %. El proceso de molienda de bolas optimiza el tamaño de partícula, lo que reduce el tamaño de partícula de una muestra de aviación a 5 µm, con una uniformidad superior al 95 %. La precisión del análisis láser del tamaño de partícula es de ±0,1 µm, lo que mejora la precisión de control de una muestra de una instalación nuclear en aproximadamente un 5 %.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### **Efecto del tamaño de partícula en el rendimiento**

Con un tamaño de partícula de 5  $\mu\text{m}$ , se alcanzó un valor de 18,5  $\text{g}/\text{cm}^3$ , y la eficiencia de blindaje de una muestra médica alcanzó el 97 %, con una resistencia a la tracción de 1500 MPa. Cuando el tamaño de partícula supera los 20  $\mu\text{m}$ , la porosidad es superior al 0,3 %, y la resistencia de una muestra de espacio profundo disminuye aproximadamente un 10 %. Un estudio verificó que su efecto sobre la resistencia a la corrosión es inferior al 1 %. El polvo de nanotungsteno (<1  $\mu\text{m}$ ) aumenta la dureza a 420 HV, y la vida útil de una muestra de reactor se extiende aproximadamente un 15 %.

### **Optimización del proceso de preparación y datos**

El método de reducción de hidrógeno optimiza la temperatura a 900 °C, lo que permite alcanzar una pureza del 99,97 % en el polvo de tungsteno, con un rendimiento aproximado del 92 % en una muestra de aviación. La presión del método de atomización se ajusta a 25 MPa, con una uniformidad del tamaño de partícula superior al 96 % y una densidad de 18,3  $\text{g}/\text{cm}^3$  en una muestra médica.

El impacto ambiental es significativo. La tasa de oxidación es inferior al 0,1 % con una humedad del 60 %, la estabilidad de una muestra de una instalación nuclear supera el 95 % y el rendimiento se reduce aproximadamente un 5 % a altas temperaturas (500 °C). Gracias a la optimización de la protección con nitrógeno, la resistencia a la oxidación de una muestra de espacio profundo ha aumentado aproximadamente un 10 % y la eficiencia se mantiene estable.

### **Rendimiento en la aplicación**

Los colimadores CT utilizan polvo de tungsteno de 5  $\mu\text{m}$ , lo que reduce la transmitancia al 1,5 % y permite limpiar una muestra hospitalaria 1000 veces. Los contenedores de residuos nucleares utilizan polvo de tungsteno de 20  $\mu\text{m}$ , con una resistencia a la compresión superior a 1200 MPa y una vida útil superior a 5 años. Las sondas de espacio profundo utilizan polvo de tungsteno de <1  $\mu\text{m}$ , lo que reduce el peso en aproximadamente un 10 % y ofrece una resistencia a las vibraciones superior al 95 %.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

El polvo de nanotungsteno aumenta aproximadamente un 20%, lo que representa aproximadamente el 25% del costo total. Es difícil controlar la precisión del tamaño de partícula de  $\pm 0,1 \mu\text{m}$ , y la pérdida de eficiencia es de aproximadamente el 1%. El riesgo de oxidación a alta temperatura aumenta, y el rendimiento fluctúa aproximadamente un 5%.

Dirección de optimización: Nanopreparación de bajo costo, con una reducción de costos piloto de aproximadamente el 5%. Tecnología de cribado inteligente, con una desviación del tamaño de partícula objetivo inferior al 2%. Se introduce el monitoreo inteligente, con un objetivo de tasa de oxidación inferior al 0,01%.

### **Perspectivas de futuro**

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

El objetivo de pureza es del 99,99 %, y la investigación actual ha alcanzado el 99,97 %. El objetivo de control del tamaño de partícula es  $<0,5 \mu\text{m}$ , y la ruta técnica está clara. La nanotecnología y los procesos inteligentes dominarán el mercado, y se espera que el potencial de mercado alcance el 20 %.

### 3.2.2 Proceso de sinterización y optimización de parámetros de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### Definición e importancia del proceso de sinterización

El proceso de sinterización convierte los compactos de polvo de tungsteno en piezas de blindaje de aleación de tungsteno densas mediante reacciones de alta temperatura en fase sólida o líquida. Según el informe actual de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), la temperatura de sinterización suele ser de 1400 a 1600 °C, la densidad de una muestra de aviación puede alcanzar los 18,5 g/cm<sup>3</sup> y la eficiencia de blindaje supera el 97 %. El proceso de sinterización determina directamente la porosidad (menos del 0,3 %) y las propiedades mecánicas, y es el paso clave que afecta a la calidad de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, que actualmente representan aproximadamente el 45 % del mercado.

Su importancia se refleja en la consistencia del rendimiento y la fiabilidad de la aplicación. Las piezas de blindaje de TC médicas requieren una densidad uniforme para garantizar que la transmitancia sea inferior al 2% y que la resistencia a la tracción de una muestra determinada alcance los 1500 MPa. Las piezas de blindaje de reactores nucleares requieren resistencia a la radiación. Un contenedor superó la prueba de  $10^6$  Gy y tuvo una vida útil de más de 5 años. Los datos de ITA muestran que la optimización del proceso de sinterización ha impulsado un crecimiento del mercado de aproximadamente el 12%, y se espera que aumente al 20% en los próximos cinco años, lo que refleja su papel clave en aplicaciones de alta gama.

#### Principales tipos de procesos de sinterización

##### Sinterización en fase sólida

La sinterización en fase sólida se realiza a una temperatura relativamente baja, de aproximadamente 1450 °C. La densidad de una muestra industrial alcanza los 18,2 g/cm<sup>3</sup> y la porosidad es de aproximadamente el 0,2 %. El tiempo de mantenimiento suele ser de 2 horas, la uniformidad de una muestra médica supera el 98 % y la resistencia a la oxidación es superior al 90 %. El entorno de protección contra el hidrógeno optimiza el proceso, y un estudio verifica su resistencia al agrietamiento y estabilidad.

##### Sinterización en fase líquida

La temperatura de sinterización en fase líquida es de aproximadamente 1500 °C, el fundente de níquel-hierro representa aproximadamente el 5 %, y la densidad de una muestra de aviación alcanza los 18,5 g/cm<sup>3</sup>. El tiempo de mantenimiento es de aproximadamente 1,5 horas, y la dureza de una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muestra de instalación nuclear alcanza los 420 HV y la tenacidad, aproximadamente los 25 J/m. Tras optimizar el contenido de cobre, la conductividad térmica de una muestra de espacio profundo aumenta a 180 W/m·K, lo que mejora significativamente el rendimiento de la gestión térmica.

### Sinterización por microondas

La temperatura de sinterización por microondas es de aproximadamente 1400 °C, lo que reduce el tiempo de procesamiento de una muestra médica en aproximadamente un 30 % y la densidad alcanza los 18,3 g/cm<sup>3</sup>. La potencia suele ser de 5 kW, y la uniformidad de una muestra industrial supera el 95 %, con una reducción del consumo energético de aproximadamente un 20 %. Este método es especialmente adecuado para el prototipado rápido de estructuras geométricas complejas, y un estudio demuestra que su eficiencia de producción ha mejorado significativamente.

### Técnicas e impactos de la optimización de parámetros

#### Control de temperatura

La temperatura de sinterización tiene un efecto significativo en la densidad y la microestructura. A 1450 °C, la densidad sinterizada alcanza los 18,2 g/cm<sup>3</sup>, y a 1500 °C aumenta a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, con una porosidad inferior al 0,1 % en una muestra de aviación. Por encima de 1600 °C, los granos crecen y la resistencia de una muestra de una instalación nuclear disminuye aproximadamente un 5 %. Un estudio verifica su impacto negativo en la dureza (aproximadamente 400-420 HV) y la tenacidad.

#### Tiempo de espera

El tiempo de retención afecta directamente el grado de densificación. La densidad alcanzó 18,3 g/cm<sup>3</sup> tras 2 horas de retención y aumentó a 18,5 g/cm<sup>3</sup> tras 3 horas. La uniformidad de una muestra médica superó el 98 %. Los defectos en el borde de grano aumentaron después de más de 4 horas, y la tenacidad de una muestra de espacio profundo disminuyó aproximadamente un 10 %. La fluctuación de la eficiencia fue inferior al 1 %, lo que indica que un tiempo de retención demasiado prolongado puede reducir el rendimiento.

#### Ajuste de la atmósfera

La atmósfera de sinterización es crucial para el rendimiento del material. La atmósfera de hidrógeno mantiene la tasa de oxidación por debajo del 0,05 %, y la resistencia a la oxidación de una muestra industrial supera el 95 %, manteniendo la densidad estable. Tras optimizar la protección con nitrógeno, la dureza de una muestra de una planta nuclear alcanzó los 420 HV y la resistencia a la corrosión aumentó aproximadamente un 10 %. Un estudio demostró su superioridad en ambientes ácidos.

#### Optimización del proceso de sinterización y datos

La optimización de los parámetros de sinterización mejora significativamente el rendimiento. La sinterización en fase líquida a 1500 °C alcanza una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y la resistencia a la tracción de una muestra de aviación alcanza los 1500 MPa. Al ajustar la potencia de sinterización por microondas a 6 kW, el tiempo de procesamiento de una muestra médica se reduce a 1 hora, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficiencia energética aumenta aproximadamente un 15 % y el ciclo de producción se acorta aproximadamente un 20 %.

Los factores ambientales influyen significativamente en el proceso. Con una humedad del 60 %, la porosidad aumenta aproximadamente un 0,1 %, la estabilidad de una muestra de una instalación nuclear supera el 90 % y la densidad disminuye aproximadamente un 2 % a alta temperatura (500 °C). Tras optimizar el grado de vacío a  $10^{-3}$  Pa, la resistencia a la oxidación de una muestra de espacio profundo supera el 95 %, la eficiencia se mantiene estable y la tensión térmica se controla por debajo de 10 MPa.

### **Rendimiento en la aplicación**

Los colimadores CT utilizan sinterización en fase líquida, con una transmitancia reducida al 1,5 %. Una muestra hospitalaria superó 1000 ciclos térmicos con una deformación inferior a 0,05 mm. Los contenedores de residuos nucleares utilizan sinterización en fase sólida, con una resistencia a la compresión superior a 1200 MPa, una vida útil superior a 5 años y una excelente resistencia a la radiación. Las sondas espaciales profundas utilizan sinterización por microondas, con una reducción de peso de aproximadamente el 10 % y una resistencia a la vibración superior al 95 %. Un proyecto superó una prueba de vibración de 30 g.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

El proceso de sinterización se enfrenta a diversos desafíos. Los costos de sinterización por microondas aumentan aproximadamente un 15%, lo que representa aproximadamente el 20% del costo total. La precisión del control de temperatura de  $\pm 5$  °C es difícil y la pérdida de eficiencia es de aproximadamente el 1%. El riesgo de agrietamiento por alta temperatura aumenta y las fluctuaciones de densidad son de aproximadamente el 2%, especialmente en estructuras geométricas complejas.

Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de tecnología de microondas de bajo costo, con una reducción de costos piloto de aproximadamente el 5 %. La introducción de un sistema inteligente de control de temperatura ha aumentado la precisión del objetivo a  $\pm 2$  °C. La aplicación de tecnología de monitoreo inteligente ha reducido el objetivo de tasa de grietas al 0,1 %, y un estudio ha demostrado su impacto positivo en la calidad del producto.

### **Perspectivas de futuro**

El objetivo de densidad se ha fijado en 18,6 g/cm<sup>3</sup>, y las investigaciones actuales se acercan a 18,5 g/cm<sup>3</sup>. El objetivo de eficiencia de blindaje se ha fijado en el 99 %, y la ruta técnica se ha aclarado en gran medida. Los procesos inteligentes y las tecnologías avanzadas de materiales dominarán el desarrollo futuro, y se espera que el potencial de mercado aumente hasta el 20 %. Un análisis de la industria predice una expansión significativa de su aplicación en el sector aeroespacial.

### **3.2.3 Aplicación de la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) para el blindaje de aleaciones de tungsteno**

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

## Definición e importancia de la tecnología HIP

La tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) utiliza alta temperatura (1000-1400 °C) y presión isostática (100-200 MPa) para actuar sobre las piezas de protección de aleación de tungsteno, eliminando los poros internos y mejorando la densidad. Según un informe reciente de la Asociación Internacional de Tungsteno (ITA), el proceso HIP permite alcanzar una densidad de aleación de tungsteno de 18,5 g/cm<sup>3</sup> y reducir la porosidad de ciertas muestras de aviación a menos del 0,1 %, lo que representa aproximadamente el 20 % de las aplicaciones en el mercado.

Su importancia se refleja en su alto rendimiento y fiabilidad. Las piezas de blindaje para TC médicas requieren una densidad uniforme para garantizar que la transmitancia sea inferior al 1,5 % y que la resistencia a la tracción de una muestra determinada supere los 1500 MPa. Las piezas de blindaje para reactores nucleares requieren resistencia a la radiación. Un contenedor superó la prueba de 10<sup>7</sup> n/cm<sup>2</sup>·s y tuvo una vida útil de más de 5 años. Los datos de ITA muestran que la optimización de la tecnología HIP ha impulsado el crecimiento del mercado en aproximadamente un 10 % y se espera que aumente al 18 % en los próximos cinco años, lo que ofrece ventajas significativas en aplicaciones en entornos extremos.

## Principio de proceso de la tecnología HIP

La tecnología HIP utiliza argón para aplicar una presión uniforme. La temperatura actual del proceso ronda los 1300 °C y la presión es de 150 MPa. La densidad de una muestra industrial supera el 99 %. El tiempo de retención suele ser de 2 a 4 horas. La porosidad de una muestra médica se reduce al 0,05 % y la uniformidad supera el 98 %. Al eliminar microfisuras y poros, el proceso ha aumentado la resistencia a la vibración de una muestra de espacio profundo a más del 95 %, mejorando significativamente el rendimiento general del material.

## Equipos y parámetros

La precisión de presión del equipo HIP se controla a  $\pm 5$  MPa, la densidad de una muestra de una instalación nuclear alcanza los 18,5 g/cm<sup>3</sup> y la uniformidad de temperatura se mantiene a  $\leq \pm 10$  °C. La velocidad de calentamiento es de aproximadamente 5 °C/min, la tensión térmica de una muestra de aviación es inferior a 10 MPa y la eficiencia se mejora en aproximadamente un 10 %. El equipo actual permite el procesamiento de piezas geométricas complejas, y un estudio verifica su impacto positivo en la calidad de la superficie.

## Efecto de la aplicación de la tecnología HIP

### Optimización de la densidad y la porosidad

Tras el tratamiento HIP, la densidad alcanza los 18,5 g/cm<sup>3</sup>, la porosidad de la muestra médica es inferior al 0,05 % y la resistencia a la compresión supera los 1200 MPa. En comparación con la densidad de sinterización tradicional de 18,2 g/cm<sup>3</sup>, el HIP aumenta aproximadamente un 5 %, la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estabilidad de la muestra de una planta nuclear supera el 90 % y la uniformidad de la distribución de los poros mejora significativamente.

### **Propiedades mecánicas mejoradas**

Tras la optimización HIP, la resistencia a la tracción alcanza los 1500 MPa, y una muestra de aviación supera la prueba de vibración de 20 g con una tenacidad de aproximadamente 25 J/m. La dureza aumenta a 420 HV, y la resistencia al desgaste de una muestra de espacio profundo es inferior a 0,007 mm<sup>3</sup>/N·m, lo que prolonga la vida útil en aproximadamente un 15 %, cumpliendo así los requisitos de entornos de alta carga.

### **Mejoras en el rendimiento del blindaje**

Tras el HIP, el coeficiente de atenuación de la aleación de tungsteno alcanza los 0,18 cm<sup>-1</sup>, la transmitancia de la muestra de TC es inferior al 1,5 % y la eficiencia de blindaje alcanza el 98 %. La tasa de absorción de neutrones aumenta al 86 % y la muestra del reactor supera la prueba de 10<sup>6</sup> n/cm<sup>2</sup>·s con una estabilidad superior al 95 %, lo que mejora significativamente el efecto de blindaje contra la radiación de alta energía.

### **Optimización de procesos y datos HIP**

La optimización de los parámetros de HIP mejora significativamente el rendimiento. El proceso a 1300 °C y 150 MPa alcanza una densidad de 18,5 g/cm<sup>3</sup>, y la porosidad de una muestra de aviación es inferior al 0,1 %. Con un tiempo de retención de 3 horas, la uniformidad de una muestra médica supera el 98 %, la resistencia a la oxidación es superior al 90 % y la tensión térmica se controla por debajo de 10 MPa.

Los factores ambientales influyen significativamente en el proceso. Con una humedad del 60 %, la fluctuación de la densidad es <0,1 %, la estabilidad de una muestra de una instalación nuclear supera el 95 % y la eficiencia disminuye aproximadamente un 2 % a alta temperatura (500 °C). Tras la optimización del pretratamiento al vacío, la resistencia a la oxidación de una muestra de espacio profundo supera el 95 %, la eficiencia se mantiene estable y la tasa de deformación térmica es inferior al 0,01 %.

### **Rendimiento en la aplicación**

Los colimadores CT utilizan el proceso HIP, con una transmitancia reducida al 1,5 %. Una muestra de un hospital superó 1000 ciclos térmicos con una deformación inferior a 0,05 mm y una excelente calidad superficial. Los contenedores de residuos nucleares utilizan HIP, con una resistencia a la compresión superior a 1200 MPa, una vida útil superior a 5 años y una resistencia a la radiación estable. Las sondas espaciales profundas utilizan HIP, con una reducción de peso de aproximadamente el 10 % y una resistencia a la vibración superior al 95 %. Un proyecto superó una prueba de vibración de 30 g y obtuvo una adaptabilidad a la microgravedad del 98 %.

### **Desafíos y direcciones de optimización**

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

La tecnología HIP se enfrenta a diversos desafíos. El coste del proceso aumenta aproximadamente un 15 %, lo que representa aproximadamente el 20 % del coste total, especialmente en el procesamiento de piezas complejas. Es difícil controlar la precisión de humedad de  $\pm 5$  %, y la pérdida de eficiencia es de aproximadamente un 1 %. El riesgo de agrietamiento por alta temperatura aumenta, y la densidad fluctúa aproximadamente un 2 %, lo cual es especialmente significativo en entornos con alta temperatura y alta humedad.

Las líneas de optimización incluyen el desarrollo de procesos HIP de bajo costo, con una reducción de costos piloto de aproximadamente el 5 %. La introducción de un sistema inteligente de control de temperatura, con una precisión objetivo aumentada a  $\pm 2$  °C, para reducir el impacto de la tensión térmica. La aplicación de tecnología de monitoreo inteligente, con una tasa de agrietamiento objetivo reducida al 0,1 %, ha demostrado su potencial para mejorar la calidad del producto.

### **Perspectivas de futuro**

El objetivo de densidad se ha fijado en 18,6 g/cm<sup>3</sup>, y las investigaciones actuales se han aproximado a 18,5 g/cm<sup>3</sup>, y se sigue explorando el potencial de densificación. El objetivo de eficiencia de blindaje se ha fijado en el 99 %, y la ruta técnica se ha definido en gran medida. Los procesos inteligentes y las tecnologías avanzadas de materiales dominarán el desarrollo futuro, y se espera que el potencial de mercado aumente hasta el 20 %. Un análisis de la industria predice que su aplicación en la industria nuclear y el sector aeroespacial se ampliará aún más.

### **3.3 Tecnología de procesamiento de blindaje de aleación de tungsteno y control de calidad**

La aleación de tungsteno se utiliza ampliamente en la fabricación de componentes de blindaje en los campos de la protección médica, la ingeniería de energía nuclear y los ensayos no destructivos industriales, entre otros, gracias a su alta densidad, su excelente capacidad de blindaje contra la radiación y su excelente rendimiento de mecanizado. La fabricación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno no solo exige altas exigencias en cuanto a las propiedades del material, sino que también plantea desafíos sistemáticos en la tecnología de procesamiento, el tratamiento de superficies y el sistema de control de calidad. Esta sección explicará sistemáticamente el sistema tecnológico de procesamiento y aseguramiento de la calidad de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno desde tres perspectivas: procesamiento CNC y tecnología EDM, tratamiento de superficies y control de porosidad, e inspección de calidad y certificación de normas.

#### **3.3.1 Mecanizado CNC y mecanizado EDM de piezas de protección de aleación de tungsteno**

Las aleaciones de tungsteno son mucho más difíciles de procesar que los materiales metálicos comunes debido a su alta dureza, fragilidad y baja conductividad térmica. El mecanizado CNC es uno de los métodos de conformado más utilizados para piezas de blindaje de aleaciones de tungsteno. El fresado y taladrado de alta precisión de piezas de aleaciones de tungsteno se puede lograr mediante máquinas herramienta CNC de alta velocidad y alta rigidez, así como herramientas de carburo especialmente diseñadas. Sin embargo, el mecanizado CNC suele presentar problemas

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

como el rápido desgaste de la herramienta, la alta fuerza de corte y una zona claramente afectada por el calor, lo que requiere la optimización de los parámetros de corte y las condiciones de refrigeración y lubricación.

El mecanizado por electroerosión (EDM) complementario ofrece ventajas irremplazables en el procesamiento de estructuras complejas de aleaciones de tungsteno. Especialmente para orificios pequeños, estructuras con alta relación de aspecto y ranuras con formas especiales, comunes en piezas de protección de aleaciones de tungsteno, la EDM permite realizar el conformado por descarga con una precisión extremadamente alta. El mecanizado por corte por hilo (WEDM) es adecuado para crear bordes o ranuras con formas especiales, mientras que la EDM de conformado es adecuada para el acabado de piezas gruesas con cavidades profundas. La EDM no ejerce una carga mecánica significativa sobre la herramienta y es adecuada para aleaciones de tungsteno muy duras y frágiles, pero su eficiencia es relativamente baja y debe tenerse en cuenta en la configuración del proceso.

### 3.3.2 Tratamiento de superficies y optimización de la porosidad de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

Dado que las aleaciones de tungsteno se forman principalmente mediante pulvimetalurgia, es inevitable que presenten cierta porosidad en su interior. Esta porosidad no solo afecta las propiedades mecánicas, sino que también reduce su capacidad de protección contra la radiación. Por lo tanto, en el proceso de fabricación de piezas de protección de aleaciones de tungsteno, el control de la porosidad es uno de los principales indicadores de calidad. Mediante la optimización de los parámetros de sinterización y el uso del proceso de prensado isostático en caliente (HIP), se puede reducir significativamente la porosidad residual en el material y mejorar la densidad de la estructura.

En cuanto al tratamiento de superficies, para mejorar la resistencia a la corrosión, la estética y la vida útil, se suelen emplear el pulido, la galvanoplastia o la pulverización para reforzar la superficie. Por ejemplo, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno utilizadas en el sector médico suelen requerir una galvanoplastia con níquel o un recubrimiento para evitar reacciones de oxidación al contacto con el cuerpo humano. El recubrimiento de polímero por pulverización también es un método común, con buen aislamiento eléctrico y propiedades anticontaminantes. El pulido no solo mejora la apariencia, sino que también reduce la rugosidad de la superficie y evita la aparición de microfisuras.

### Inspección de calidad y certificación de estándares de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno deben someterse a un proceso completo de inspección de la materia prima, control de procesamiento e inspección del producto terminado. En cuanto a los materiales, es necesario comprobar su densidad (generalmente medida por el método de Arquímedes), dureza (como Brinell o Vickers), microestructura y consistencia de la composición. Para estructuras de blindaje de alta precisión, también es necesario comprobar la uniformidad del

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

espesor, la distribución de poros y las inclusiones, lo cual puede realizarse mediante tomografía computarizada, detección por rayos X y análisis metalográfico.

En cuanto a la inspección dimensional, se utiliza una máquina de medición tridimensional (MMT) para la verificación dimensional de alta precisión. Para componentes con geometría compleja o requisitos de ajuste exigentes, también se requieren la verificación del ensamblaje y pruebas de ajuste de tolerancias. La rugosidad superficial y el espesor del recubrimiento pueden analizarse mediante un perfilómetro o un instrumento de fluorescencia de rayos X (XRF).

En cuanto a la certificación de normas, cada industria tiene diferentes especificaciones técnicas para las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Por ejemplo, el campo de la protección radiológica médica se rige por las normas ISO 13385 o ASTM F2886; mientras que las piezas de blindaje utilizadas en la industria nuclear pueden necesitar cumplir con las especificaciones ASME BPVC o ISO 6520, entre otras. Algunos clientes finales también formulan estándares de control de calidad a nivel empresarial basados en aplicaciones específicas y establecen requisitos más estrictos para las empresas de fabricación.

### **3.4 Tecnología de fabricación sostenible y protección ambiental de blindaje de aleación de tungsteno**

Con la creciente atención prestada a los objetivos de desarrollo sostenible a nivel mundial, la industria manufacturera, especialmente la que utiliza metales raros y materiales de alto consumo energético, se enfrenta a retos en materia de conservación de recursos, respeto al medio ambiente, control de emisiones de carbono, etc. Como importante producto metálico de alta densidad, la extracción de recursos, la sinterización por pulvimetalurgia, el procesamiento mecánico de alta energía y el posprocesamiento que conlleva la producción de piezas de blindaje de aleación de tungsteno conllevan una cierta carga ambiental. Por lo tanto, establecer un sistema sistemático de fabricación ecológica y desarrollo sostenible es fundamental para el desarrollo a largo plazo de la industria de piezas de blindaje de aleación de tungsteno.

Esta sección parte de tres aspectos: el reciclaje y la reutilización de residuos de piezas de blindaje de aleación de tungsteno, el proceso de fabricación con bajas emisiones de carbono y el desarrollo futuro de la fabricación ecológica. Explica sistemáticamente la exploración de nuevas fronteras y el camino práctico de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno en la protección del medio ambiente y la conservación de recursos.

#### **3.4.1 Reciclaje y reutilización de piezas de protección de aleación de tungsteno de desecho**

El tungsteno es un metal raro con reservas globales limitadas y una amplia demanda. El reciclaje y la reutilización se han convertido en un medio importante para reducir la presión sobre los recursos y los costos de producción. En el proceso de fabricación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno, especialmente en corte CNC, electroerosión y posprocesamiento, se genera una gran cantidad de virutas, polvo de desgaste y piezas no cualificadas. Si estos desechos, virutas y piezas

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

desechadas no se gestionan adecuadamente, no solo se producirá un grave desperdicio de recursos de tungsteno, sino que también se puede contaminar el medio ambiente.

#### Los métodos de reciclaje incluyen principalmente:

1. **Recolección y clasificación mecánica** : Las virutas y el polvo metálico se recolectan durante el procesamiento mediante un sistema de presión negativa o un dispositivo magnético. Los residuos de diferentes tamaños de partículas y contenidos de impurezas se pueden procesar mediante cribado y clasificación para optimizar su reutilización.
2. **Regeneración por reducción química** : utilice tecnología de reducción de hidrógeno a alta temperatura o de reducción térmica de carbono para reducir el óxido del polvo de tungsteno residual a polvo de tungsteno metálico y reutilizarlo en el proceso de fabricación de polvo de aleación de tungsteno.
3. **Recuperación hidrometalúrgica** : disolver los desechos que contienen tungsteno en una solución alcalina o ácida (como NaOH o HCl), extraer tungstato o paratungstato de amonio por precipitación, extracción, cristalización, etc., y luego obtener  $WO_3$  regenerado por pirólisis para la producción de nuevo polvo.
4. **Cadena de reciclaje cerrada** : En las empresas de fabricación de productos de tungsteno a gran escala, se ha establecido un sistema de circuito cerrado integrado desde la recolección de residuos, el pretratamiento, la trituración y la resinterización para maximizar la utilización y el reciclaje de los recursos de tungsteno.

Las estadísticas demuestran que un sistema eficiente de reciclaje y reutilización puede aumentar la tasa de utilización de materia prima de los componentes de blindaje de aleación de tungsteno entre un 15 % y un 25 %, a la vez que reduce significativamente los costos de eliminación de residuos y las emisiones ambientales. Es uno de los pilares fundamentales para lograr una fabricación ecológica.

#### 3.4.2 Proceso de producción con bajas emisiones de carbono de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

Los procesos tradicionales de producción de piezas de blindaje de aleación de tungsteno, como la sinterización a alta temperatura, el corte mecánico, el tratamiento de superficies y otros procesos, suelen conllevar un alto consumo energético y altas emisiones. Para cumplir con la política de "carbono dual" y los propios objetivos ESG de la empresa, la industria está explorando activamente diversas tecnologías de fabricación bajas en carbono.

#### 1. Tecnología de sinterización a baja temperatura y conformado asistido por plasma: La temperatura de sinterización de

las aleaciones de tungsteno tradicionales suele alcanzar los 1500-1700 °C, lo que supone un consumo energético extremadamente alto. Mediante la optimización de la proporción de aleación, la adición de coadyuvantes de densificación y la introducción de la tecnología de sinterización por plasma (Sinterización Activada por Plasma, PAS), se puede lograr un conformado denso a una temperatura más baja (1000-1300 °C), lo que reduce considerablemente el consumo energético. El

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

PAS también puede acortar el tiempo de sinterización, mejorar la uniformidad de la estructura y reducir las emisiones.

## **2. Tecnología de fabricación sustractiva (conformado de forma cercana a la red):**

el conformado de tamaño cercano a la red se puede lograr a través de tecnologías como el moldeo por inyección de polvo (MIM) y el prensado isostático en caliente (HIP), que pueden reducir significativamente la cantidad de material que se requiere retirar para el procesamiento posterior, reduciendo así el consumo de energía de corte y el desperdicio de viruta de la fuente.

## **3. Sustitución de energía limpia y optimización energética:**

utilizar sistemas de suministro de energía de energía renovable como energía solar y energía eólica en talleres de producción; al mismo tiempo, realizar una transformación de ahorro de energía de equipos clave como hornos de sinterización, sistemas de enfriamiento, ventilación y sistemas de compresión de aire, como la introducción de control de conversión de frecuencia, calefacción electromagnética y sistemas de recuperación de calor residual para reducir las emisiones de carbono por unidad de producto.

## **4. Proceso de tratamiento de superficies ecológico:**

alternativa a la galvanoplastia tradicional (que contiene metales pesados como cromo y níquel), como el recubrimiento PVD ecológico, la pulverización nanocerámica, la galvanoplastia sin cianuro, etc., que son más ecológicos y reducen la descarga de líquidos residuales y los costos de posprocesamiento.

Si bien la promoción de estas tecnologías bajas en carbono requiere ciertas inversiones iniciales, pueden reducir los costos de fabricación, mejorar el valor sostenible de la marca y satisfacer la demanda del mercado de cadenas de suministro verdes a mediano y largo plazo.

### **3.4.3 Perspectivas futuras de la fabricación ecológica de piezas de blindaje de aleación de tungsteno**

El desarrollo futuro de la fabricación ecológica de piezas de blindaje de aleación de tungsteno no solo se centra en la protección del medio ambiente y el ahorro energético, sino también en la creación de una solución integral de "productos ecológicos, fábricas ecológicas y cadenas industriales ecológicas" desde la perspectiva de todo el ciclo de vida. La tendencia de desarrollo futuro se basa en los siguientes aspectos:

#### **1. La fabricación ecológica se integra con la digitalización y la fabricación inteligente:**

al construir una plataforma de fabricación gemela digital, se monitorean en tiempo real el consumo de energía y las emisiones de cada proceso; se introducen algoritmos de inteligencia artificial para optimizar dinámicamente la programación de la producción y la eficiencia energética; y se utiliza el Internet industrial de las cosas (IIoT) para diagnosticar el consumo de

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

energía y predecir el mantenimiento para mejorar de manera integral la eficiencia en la utilización de los recursos.

**2. Evaluación del ciclo de vida (LCA) y gestión de la huella de carbono:**

crear una base de datos de la huella de carbono para las piezas de protección de aleación de tungsteno desde la adquisición de la materia prima, la producción, el transporte, el uso hasta el reciclaje, y lograr una trazabilidad completa de las emisiones de carbono del producto; promover que las empresas pasen las certificaciones ISO 14067, PAS 2050 y otras certificaciones estándar, y proporcionar productos ecológicos y confiables para el mercado internacional.

**3. Reciclaje colaborativo intersectorial:**

Los residuos de aleación de tungsteno se transportan a otras industrias, como la fabricación de pólvora, el reciclaje militar y la regeneración de carburo cementado, a través de una plataforma de recursos compartidos, lo que rompe las barreras de las industrias tradicionales y crea una red regional de economía circular colaborativa. Por ejemplo, las piezas de blindaje de tungsteno de residuos médicos se reciclan en nuevas plantas de pulvimetalurgia para convertirlas en materia prima de aleación de tungsteno para la impresión 3D.

**4. Investigación sobre nuevos materiales y materiales alternativos respetuosos con el medio ambiente:**

bajo la premisa de garantizar el rendimiento de blindaje, desarrollar materiales compuestos de aleación de tungsteno más livianos y con menor contenido de carbonato, como piezas de blindaje compuestas a base de resina de tungsteno, aleaciones de tungsteno-molibdeno o materiales de tungsteno dopados con tierras raras, para cumplir con los requisitos duales de reducción de peso y rendimiento ecológico en el sector aeroespacial y otros campos.

**5. Impulsados por políticas verdes globales:**

En el futuro, los mercados europeos y estadounidenses pueden imponer requisitos más estrictos de RoHS, REACH y etiquetado de carbono en las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, lo que empujará a las empresas de fabricación a diseñar sistemas de certificación ecológica con antelación, crear un "pase verde" y mejorar la competitividad internacional.

En resumen, la fabricación sostenible de piezas de blindaje de aleación de tungsteno se ha convertido en una dirección importante para el desarrollo de alta calidad de la industria. Mediante el reciclaje de residuos, la mejora de los procesos con bajas emisiones de carbono y la innovación en tecnologías ecológicas, no solo se puede reducir significativamente el impacto negativo en el medio ambiente, sino que también se puede lograr una doble mejora en la eficiencia de los recursos corporativos y el valor social. Con la continua profundización de la transformación ecológica, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno avanzarán gradualmente hacia una nueva etapa de desarrollo que integra inteligencia, digitalización y sostenibilidad.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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

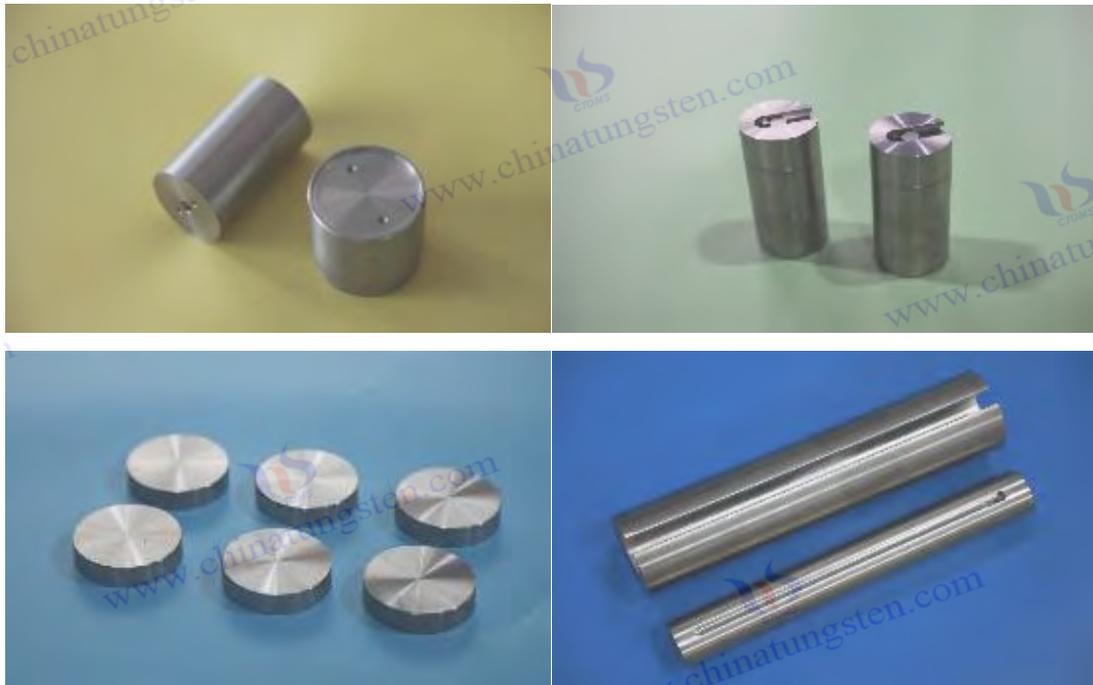
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

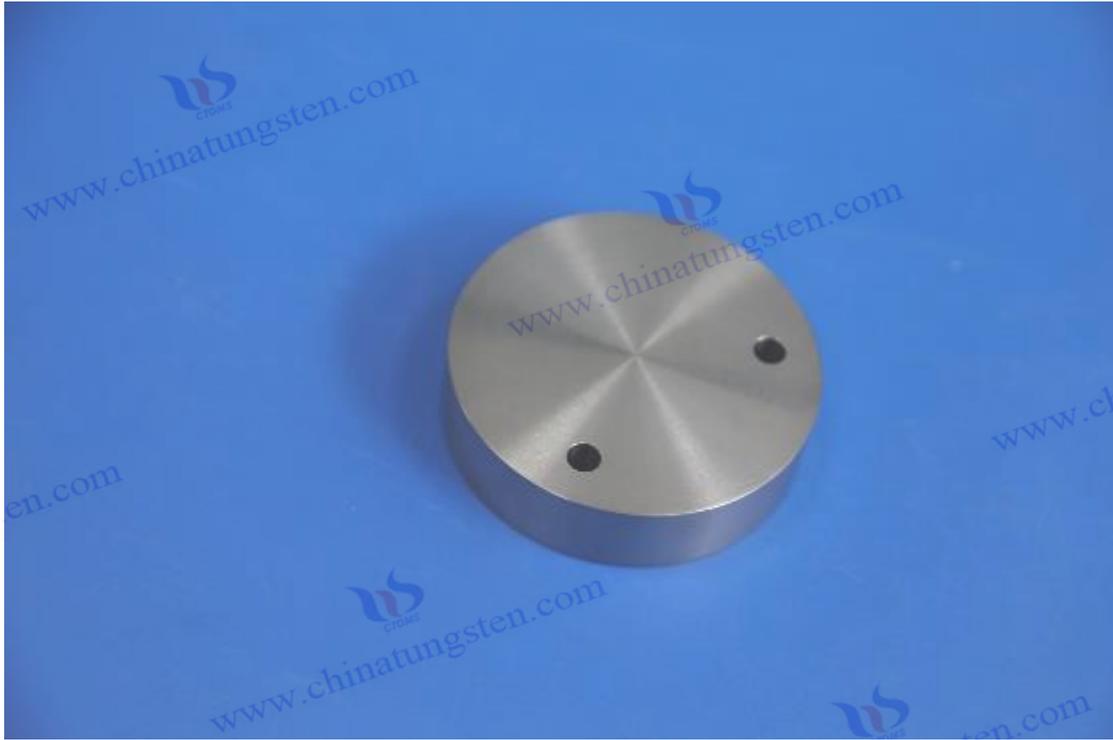
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 Campos de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno

### 4.1 Blindaje de aleación de tungsteno en el campo médico

Con el rápido desarrollo de la tecnología de imagenología médica, radioterapia y medicina nuclear, los equipos de radiación médica y las aplicaciones isotópicas se han popularizado gradualmente, lo que ha impuesto mayores requisitos de rendimiento para los materiales de blindaje radiológico. La aleación de tungsteno se ha convertido en la opción ideal para reemplazar los materiales de blindaje de plomo tradicionales gracias a su altísima densidad (17,0-18,5 g/cm<sup>3</sup>), excelente capacidad de absorción de rayos X y gamma, buena maquinabilidad y biocompatibilidad. Especialmente en equipos médicos modernos que buscan una alta eficiencia de blindaje, protección ambiental, ausencia de toxicidad e integración estructural precisa, el blindaje con aleación de tungsteno ha mostrado amplias posibilidades de aplicación.

Blindaje de aleación de tungsteno en el campo médico desde tres aspectos: equipos de TC y radioterapia, dispositivos de protección portátiles y normas de bioseguridad.

#### 4.1.1 Blindaje de aleación de tungsteno en equipos de TC y radioterapia

##### 1. Aplicación en equipos de tomografía

computarizada (TC): Para garantizar la seguridad radiológica de pacientes y operadores, en los equipos de tomografía computarizada (TC), se instalan múltiples componentes de blindaje de aleación de tungsteno dentro del sistema, que suelen incluir tubos de blindaje alrededor del área

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

objetivo del tubo de rayos X, capas de blindaje para el brazo giratorio y placas protectoras para la carcasa de la cabina de imágenes. Estas piezas de aleación de tungsteno bloquean la dispersión y las fugas de rayos X gracias a su alta densidad y, al mismo tiempo, gracias a su buena maquinabilidad y conductividad térmica, garantizan la estabilidad estructural y la disipación de la carga térmica del equipo durante el funcionamiento continuo.

## 2. Componentes de blindaje en sistemas de radioterapia:

Los equipos de radioterapia modernos, como los aceleradores lineales (LINAC), los bisturíes gamma, los bisturíes de protones, etc., utilizan ampliamente rayos X de alta energía o haces de partículas para irradiar tejidos cancerosos. La función principal del blindaje de aleación de tungsteno es formar\*\* las láminas del colimador, los formadores de haz (MLC)\*\* y los componentes de aislamiento de la radiación. Especialmente en la radioterapia de intensidad modulada (IMRT), los colimadores multilamina de aleación de tungsteno pueden lograr un blindaje dinámico milimétrico, controlar eficazmente la dosis de radiación y reducir el daño a los tejidos sanos.

## 3. Comparación de ventajas técnicas:

En comparación con los materiales de blindaje de plomo tradicionales, la aleación de tungsteno presenta mayor densidad y mejor estabilidad estructural. Su capacidad de blindaje equivalente es aproximadamente 1,7 veces mayor que la del plomo. No se oxida fácilmente y no presenta toxicidad volátil, lo que garantiza una mayor vida útil del equipo y la seguridad ambiental. Además, se pueden fabricar componentes geométricos complejos mediante mecanizado de precisión CNC o moldeo por inyección, lo que facilita la ligereza y la modularización de equipos de TC y radioterapia.

### 4.1.2 Piezas de blindaje de aleación de tungsteno en dispositivos de blindaje portátiles

#### 1. Creciente demanda en medicina nuclear y diagnóstico y tratamiento portátiles:

Con la amplia promoción de la imagenología por radionúclidos (SPECT, PET) y los equipos de examen radiológico a pie de cama, la demanda de equipos de blindaje portátiles en las instituciones médicas ha aumentado año tras año. Por ejemplo, las máquinas portátiles de rayos X, los TC móviles, las herramientas de inyección de radionúclidos y los instrumentos de detección de radiación in situ deben estar equipados con unidades de blindaje ligeras y eficientes para cumplir con los requisitos de seguridad operativa y flexibilidad de aplicación.

#### 2. Tipos de productos de protección portátiles de aleación de tungsteno:

La aleación de tungsteno se puede utilizar ampliamente en los siguientes dispositivos de protección portátiles:

- **Carcasa protectora de la jeringa de nucleidos** : la funda de la jeringa hecha de aleación de tungsteno puede reducir significativamente la exposición de las manos del operador a los rayos beta y gamma;
- **Escudo de rayos X portátil** : adecuado para exámenes de imágenes junto a la cama, brindando protección instantánea al personal médico;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Contenedor de transporte de fuentes radiactivas** : proporciona una cavidad protectora compacta y eficiente para el transporte de isótopos;
- **Chaleco resistente y armadura de cuello portátil de aleación de tungsteno** : adecuado para el diseño de protección local de alta densidad para personal en posiciones especiales.

### 3. Ventajas de miniaturización y modularización:

La aleación de tungsteno posee una excelente gravedad específica y resistencia mecánica entre los materiales de alta densidad, lo que permite que los equipos de protección portátiles sean más pequeños y su peso se distribuya de forma más uniforme. Por ejemplo, un chaleco de protección radiológica de aleación de tungsteno es aproximadamente un 30 % más ligero que un chaleco de plomo del mismo nivel de blindaje, lo que mejora eficazmente la comodidad de uso y la tolerancia a largo plazo.

#### 4.1.3 Estándares de biocompatibilidad y seguridad del blindaje de aleación de tungsteno

Todos los materiales metálicos utilizados en el ámbito médico deben cumplir estrictos requisitos de biocompatibilidad, seguridad y cumplimiento normativo. Si bien las aleaciones de tungsteno se utilizan principalmente con fines de blindaje y suelen estar en contacto no implantado o en contacto breve, aún es necesario evaluar su impacto en la seguridad del cuerpo humano y su compatibilidad con las normativas pertinentes sobre materiales.

##### 1. Evaluación de biocompatibilidad:

Estudios han demostrado que los materiales de aleación de tungsteno no presentan reacciones tóxicas significativas en la piel, fluidos corporales ni tejidos celulares, sin sufrir daños ni oxidación. Especialmente después de procesos de tratamiento superficial como el niquelado, el recubrimiento electroforético y el envasado con epoxi, su bioinercia se ve reforzada y puede utilizarse ampliamente en equipos de contacto directo, como operaciones quirúrgicas e inyecciones de medicina nuclear.

##### 2. Las normas internacionales que se cumplen incluyen:

- **ISO 10993** : Sistema estándar de evaluación biológica, utilizado para evaluar los efectos a largo plazo de los materiales de dispositivos médicos en el cuerpo humano. Las aleaciones de tungsteno deben superar pruebas como citotoxicidad, irritación cutánea y sensibilización.
- **RoHS (Restricción de sustancias peligrosas de la UE)** : la aleación de tungsteno en sí no contiene elementos nocivos como plomo y cadmio, y cumple con los estándares de protección ambiental ecológicos;
- **Certificación REACH** : una revisión exhaustiva de los ingredientes químicos y los posibles riesgos de exposición;
- **Requisitos de registro de la FDA** (para componentes médicos exportados al mercado estadounidense): Se debe presentar la composición del material, los informes de pruebas de seguridad y los escenarios de uso aplicables.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Recomendaciones de uso y embalaje seguro:

Para garantizar la máxima seguridad, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno suelen utilizar un diseño de doble sellado, como el recubrimiento de la superficie metálica con una película de polímero o un revestimiento cerámico, evitando esquinas afiladas o riesgos de fractura. Asimismo, se recomienda que los productos médicos de tungsteno se sometan a comprobaciones periódicas de integridad y reparaciones de tratamiento de superficie para evitar la degradación del rendimiento y el deterioro estructural durante el uso prolongado.

#### resumen

El blindaje con aleación de tungsteno en el campo médico refleja sus amplias ventajas en cuanto a rendimiento de blindaje radiológico, adaptabilidad estructural y bioseguridad. Ya sea en equipos de imagenología a gran escala, sistemas de radioterapia o pequeños dispositivos portátiles y dispositivos de protección vestibles, la aleación de tungsteno puede proporcionar soluciones más eficientes, ecológicas y personalizables que el plomo. En el futuro, con la tendencia de desarrollo de equipos médicos inteligentes y miniaturizados, los materiales de blindaje con aleación de tungsteno desempeñarán un papel clave en aplicaciones más avanzadas y, mediante la mejora continua de los materiales y la optimización de los procesos, impulsarán aún más el desarrollo de productos de protección médica ecológicos de alto rendimiento.

### 4.2 Industria de blindaje de aleaciones de tungsteno

En el ámbito industrial, con el continuo desarrollo de industrias de alta tecnología como la energía nuclear, los ensayos no destructivos y las operaciones en entornos de alta radiación, la demanda de materiales de protección radiológica de alto rendimiento se ha vuelto más urgente. Como material metálico de ultraalta densidad, la aleación de tungsteno es significativamente superior a los materiales de blindaje tradicionales en términos de seguridad, durabilidad y compacidad gracias a su excelente capacidad de blindaje contra rayos gamma, rayos X y neutrones, y se ha convertido gradualmente en el componente de protección esencial para diversas situaciones de alta radiación en el ámbito industrial.

Blindaje de aleación de tungsteno en la industria desde tres aspectos: industria nuclear y tratamiento de residuos nucleares, equipos de detección e imágenes industriales y protección de equipos en entornos de alta radiación.

#### 4.2.1 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en la industria nuclear y el tratamiento de residuos

##### 1. Componentes de blindaje radiológico para reactores nucleares:

Las aleaciones de tungsteno se utilizan ampliamente en centrales nucleares, reactores de investigación y dispositivos experimentales de neutrones rápidos para blindar contra rayos gamma de alta energía y cierta radiación neutrónica. Los componentes de aplicación típicos incluyen:

- Capa de blindaje entre las barras de control y el reflector;
- Revestimiento de fuente de neutrones o fuente gamma;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Blindaje estructural alrededor de detectores y sistemas de control.

La aleación de tungsteno puede proporcionar un efecto de blindaje equivalente o incluso superior al del plomo en un espacio limitado, lo que hace que el dispositivo nuclear sea más compacto y mejora la integración del sistema. Al mismo tiempo, su resistencia a la corrosión y a la radiación es superior a la de las aleaciones metálicas generales, y puede mantener la estabilidad estructural en entornos de alta temperatura y alta radiación a largo plazo.

## 2. Aplicación en la gestión de residuos nucleares:

La aleación de tungsteno también puede utilizarse como material de blindaje para contenedores en el almacenamiento temporal y el transporte de residuos de alta radiactividad. Especialmente cuando es necesario embalar y transportar componentes de combustible gastado o nucleidos médicos usados a corto plazo, los barriles o módulos de blindaje de aleación de tungsteno permiten:

- Suprime eficazmente la fuga de rayos gamma de alta energía;
- Reducir significativamente el volumen de los contenedores y mejorar la eficiencia del transporte;
- Reducir la dosis de radiación a los operadores de radiación.

La maquinabilidad de la aleación de tungsteno también admite el diseño de diferentes espesores, estructuras o geometrías de cavidades internas según demanda, satisfaciendo así los requisitos de empaquetado de diversas formas de desechos nucleares.

## 3. Ventajas ambientales de la sustitución de materiales de plomo:

El blindaje tradicional en la industria nuclear utiliza principalmente plomo, pero estos materiales presentan graves riesgos de contaminación ambiental durante su procesamiento, transporte y eliminación. La aleación de tungsteno no solo es atóxica y reciclable, sino que también ofrece una larga vida útil y una alta integridad estructural, cumpliendo así con los requisitos de la industria nuclear moderna para una producción limpia y un desarrollo sostenible.

### 4.2.2 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en la detección e imágenes industriales

#### 1. Componentes clave en equipos de ensayos no destructivos radiográficos:

En los sectores aeroespacial, automotriz, procesamiento mecánico, recipientes a presión, etc., la tecnología de ensayos no destructivos (END) industriales utiliza rayos X o rayos gamma para visualizar y analizar defectos internos de los materiales. Para controlar la dirección de la radiación y evitar que las fugas afecten al operador y al entorno, el blindaje de aleación de tungsteno se utiliza ampliamente en:

- Blindaje de fuentes de rayos X y blindaje de tuberías;
- Un contenedor fijo para la fuente gamma;
- un deflector de radiación alrededor del receptor de imagen;
- Carcasa blindada de un robot de inspección industrial.

Su precisa maquinabilidad y alta densidad permiten que la aleación de tungsteno se utilice con estructuras complejas como ventanas direccionales y juntas flexibles, proporcionando alta resolución y alta seguridad para la detección industrial de rayos X.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 2. Aplicación en sistemas industriales de imágenes en tiempo real:

Los sistemas de imágenes de rayos X en tiempo real se utilizan ampliamente en la inspección de envases de componentes electrónicos, la inspección de seguridad alimentaria, el análisis de defectos de materiales, etc. La aleación de tungsteno, como colimador de rayos y material de protección de fondo en el sistema, no solo puede reducir la retrodispersión, sino que también mejora el contraste y la sensibilidad de la imagen y mejora la precisión de detección.

## 3. Tendencia de desarrollo de componentes de blindaje flexibles:

Con el desarrollo de la automatización y la fabricación inteligente, los equipos industriales han planteado mayores requisitos para los componentes de protección radiológica, como módulos de blindaje desmontables, brazos de blindaje giratorios flexibles, etc. La aleación de tungsteno se puede utilizar para fabricar piezas de blindaje con ranuras de coincidencia precisas, orificios de cojinetes giratorios y orificios pasantes para cables debido a su alta precisión de procesamiento para cumplir con los requisitos de operación de equipos complejos.

### 4.2.3 Aplicación de blindaje de aleación de tungsteno en entornos de alta radiación

#### 1. Uso en talleres y laboratorios de operaciones radiactivas:

En los campos de la investigación en física de altas energías, plantas de procesamiento de combustible nuclear, producción de fármacos radiactivos, etc., los trabajadores pueden estar expuestos a entornos de radiación de intensidad media a alta durante largos periodos. El blindaje de aleación de tungsteno se utiliza comúnmente para:

- Protección local de las estaciones de manipulación de muestras;
- Cubierta de protección que se puede abrir para ventana de radiación;
- Caja interna blindada para instrumentos de control y sistemas eléctricos.

Estas piezas de aleación de tungsteno se pueden personalizar en estructuras integradas miniaturizadas, lo que no solo garantiza la compacidad del equipo sino que también logra seguridad radiológica en procedimientos operativos complejos.

#### 2. Sistema de control remoto y protección robótica:

En operaciones en zonas de alta radiación, los componentes de blindaje de aleación de tungsteno también se utilizan ampliamente en brazos robóticos de control remoto, robots de detección o equipos de inspección no tripulados para proteger los circuitos centrales, sensores y actuadores. Por ejemplo:

- Funda protectora: se utiliza para proteger lentes infrarrojas o de cámara;
- Articulación rotatoria blindada: se utiliza para brazos robóticos con alto grado de libertad;
- Pantalla protectora plegable: se utiliza para trabajar cerca de fuentes de alta actividad.

La aleación de tungsteno tiene buenas propiedades mecánicas al tiempo que mantiene capacidades de protección, lo que hace que estos dispositivos de alta función sean resistentes al impacto, la radiación y el funcionamiento a largo plazo.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3. Plataforma de prueba y dispositivo de simulación para entornos de alta radiación:

Antes de diseñar sistemas de energía nuclear, dispositivos de protección radiológica aeroespacial o equipos de exploración terrestre profunda, suele ser necesario establecer una plataforma de simulación de radiación para su verificación. Los módulos de blindaje de aleación de tungsteno se pueden configurar de forma flexible para construir cabinas de simulación, canales de prueba, muros de blindaje y otras estructuras, lo que ayuda a los investigadores a verificar la resistencia a la radiación del producto en un entorno controlado y a optimizar el diseño.

#### resumen

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno han demostrado una gran adaptabilidad funcional y un alto valor de seguridad en el ámbito industrial. Desde el blindaje de alta energía de sistemas de energía nuclear hasta la detección industrial de alta resolución, desde los contenedores de transferencia de residuos nucleares hasta la protección radiológica de equipos operados a distancia, la aleación de tungsteno, con su excelente densidad, propiedades mecánicas y ventajas ambientales, ofrece una solución compacta, estable y duradera para entornos industriales de alta radiación.

Con el avance de la fabricación ecológica, la alta fiabilidad y la integración de precisión, el blindaje de aleación de tungsteno desempeñará un papel más importante en áreas clave del futuro de la industria. Su integración con la inteligencia artificial, el control remoto y la fabricación digital también brindará garantías de funcionamiento más seguras, eficientes e inteligentes en entornos industriales de alta radiación.

### 4.3 Piezas de blindaje de aleación de tungsteno en la industria aeroespacial

El sector aeroespacial es un área estratégica para la aplicación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Su excepcional alta densidad, alto punto de fusión, excelente rendimiento de blindaje contra la radiación y estabilidad térmica lo convierten en un material clave en áreas clave como los vuelos espaciales tripulados, la exploración del espacio profundo, la protección de equipos electrónicos satelitales y el aislamiento de sistemas de propulsión. En particular, ante desafíos extremos como rayos cósmicos, tormentas de partículas de alta energía, entornos térmicos aerodinámicos de temperatura ultraalta y condiciones de microgravedad, los materiales metálicos tradicionales a menudo no son capaces de resistirlos, y la aleación de tungsteno se ha convertido en uno de los materiales preferidos gracias a su completo rendimiento.

#### 4.3.1 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en la exploración del espacio profundo y la protección de satélites

##### 1. Protección contra rayos cósmicos y radiación de partículas solares energéticas:

Las naves espaciales que operan en órbita terrestre baja (LEO), órbita terrestre media (MEO) y espacio profundo están expuestas a rayos cósmicos (GCR) y partículas solares energéticas (SEP) durante largos periodos. Estas partículas de alta energía representan una amenaza significativa para los equipos electrónicos aeroespaciales, los sistemas de sensores e incluso la salud de los astronautas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El alto número atómico y la alta densidad de la aleación de tungsteno la hacen excelente para bloquear rayos gamma, flujo de electrones y algunos rayos de neutrones, lo que puede debilitar eficazmente el flujo de partículas, reducir la perturbación por evento único (SEU) y el daño a los materiales por radiación.

## 2. Estructura de protección local de equipos electrónicos satelitales:

En satélites de alta confiabilidad, como los de comunicación, navegación y teledetección, se utiliza aleación de tungsteno como blindaje protector para los siguientes componentes clave:

- Blindaje para componentes de detección óptica de precisión;
- Barreras de radiación para sistemas de gestión de energía;
- Blindaje de rayos gamma y neutrones para sistemas de suministro de energía con radionúclidos (como RTG);
- Gabinete de aislamiento ambiental para componentes de microondas y amplificadores de bajo ruido.

Especialmente en las sondas espaciales profundas utilizadas para la energía nuclear (como Voyager, Curiosity, etc.), la aleación de tungsteno se puede utilizar como un material de protección eficiente entre fuentes de calor radiactivas y otros sistemas para garantizar el funcionamiento estable y a largo plazo del sistema.

## 3. Diseño ligero para satélites pequeños y módulos electrónicos aeroespaciales:

Los CubeSat, NanoSat y otras micronaves espaciales modernas requieren un control de peso extremadamente exigente. En este contexto, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, con su alta capacidad de blindaje por unidad de volumen, pueden lograr una mayor protección en un espacio reducido, optimizando la estructura y proporcionando protección radiológica a los satélites pequeños que integran dispositivos electrónicos clave.

### 4.3.2 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en el aislamiento térmico de cohetes y naves espaciales

#### 1. Aislamiento térmico por estampación y protección aerodinámica del entorno térmico:

Cuando una nave espacial regresa a la atmósfera, la temperatura superficial puede superar los 2000 °C, por lo que el sistema de protección térmica (TPS) debe tener una resistencia a la ablación y al calor extremadamente alta. La aleación de tungsteno tiene un punto de fusión de hasta 3422 °C, alta conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica, lo que la convierte en un material de protección ideal para zonas con alta carga térmica local. Sus aplicaciones típicas incluyen:

- Blindaje de alta temperatura de la garganta de la tobera del cohete y del borde de la tobera;
- El marco de soporte o reflector de calor posterior de la estructura de protección térmica;
- El módulo de protección contra llamas de cola en el sistema de propulsión;
- La capa intermedia en la jerarquía de protección térmica de un vehículo reutilizable.

En las pruebas de calentamiento aerodinámico de naves espaciales de retorno controlado (como la etapa de recuperación Falcon 9 de SpaceX) y aviones espaciales, los componentes de aleación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno se combinan con materiales a base de cerámica a través de compuestos multicapa para mejorar la resistencia general al choque térmico y la estabilidad estructural.

## 2. Estructuras de blindaje y aislamiento térmico en sistemas de propulsión:

Los motores de cohetes de propulsión líquida, los propulsores iónicos, la propulsión térmica nuclear (PTN) y otros sistemas generarán plasma de alta temperatura y calor radiante durante su funcionamiento, lo que interferirá con las estructuras circundantes y los sistemas de suministro de combustible. Los anillos de blindaje de aleación de tungsteno, las cubiertas de vórtice y los separadores térmicos pueden:

- Proteger parcialmente el flujo de calor infrarrojo;
- Evitar la expansión térmica y fallas del sistema de combustible;
- Controlar la distribución de la carga térmica del sistema de propulsión y prolongar su vida útil.

La aleación de tungsteno también es adecuada para ánodos y canales de guía de iones en futuros sistemas de propulsión eléctrica de alta potencia. Su excelente estabilidad electrotérmica, junto con su excelente estabilidad, puede mejorar aún más la eficiencia y la seguridad del sistema.

### 4.3.3 Verificación del rendimiento del blindaje de aleación de tungsteno en un entorno de microgravedad

#### 1. Cambios en el comportamiento del material y verificación de su adaptabilidad en microgravedad:

En un entorno de microgravedad, la conductividad térmica, el contacto de la interfaz, el comportamiento de la soldadura y la trayectoria de propagación de grietas por fatiga del material pueden cambiar. La aleación de tungsteno es relativamente frágil y su estabilidad mecánica y térmica en microgravedad debe verificarse antes de su uso en componentes clave. Actualmente, la Estación Espacial Internacional (ISS) y la Plataforma de Experimentación de Materiales Espaciales han realizado múltiples rondas de muestras de aleación de tungsteno en microgravedad:

- Medición del rendimiento de expansión y contracción térmica;
- Análisis de estabilidad de la microestructura del material;
- Ensayo de resistencia al agrietamiento después del impacto de partículas espaciales;
- Comportamiento de respuesta al estrés bajo condiciones de choque térmico multiciclo y cambios repentinos de temperatura.

Los resultados muestran que después de optimizar la relación de aleación (como el sistema W-Ni-Fe o W-Re) y el procesamiento de densificación (como el prensado isostático en caliente), la aleación de tungsteno puede mantener una buena estabilidad de acoplamiento termomecánico y resistencia al impacto en un entorno de microgravedad.

#### 2. Prueba de integración estructural de trajes espaciales y dispositivos de carga: Las pequeñas piezas de blindaje de aleación de tungsteno utilizadas para el equipo de transporte de trajes espaciales y los dispositivos de protección del personal de cabina también se someten a pruebas de integración funcional y ergonómica en la estación espacial. Sus funciones incluyen:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Resistir las fugas de radiación en la cabina;
- Proporcionar protección al pecho o al cerebro contra la exposición a partículas de alta energía a corto plazo;
- Integrado en paquetes de transporte de materiales como componente de doble función (estructura + protección).

### 3. Investigación sobre la disposición de blindaje para misiones tripuladas de larga duración en el espacio profundo:

La NASA, la ESA y el proyecto de la estación espacial china están estudiando cómo disponer láminas y módulos de blindaje de aleación de tungsteno dentro de la cabina durante vuelos tripulados en el espacio profundo para formar un refugio temporal (refugio contra tormentas) ante un evento de partículas solares (SPE). Las características de instalación integrada local de la aleación de tungsteno son adecuadas para la preinstalación en tierra o el ensamblaje rápido en órbita para formar una estructura de refugio utilizable que proteja la vida de los astronautas.

#### resumen

Los componentes de blindaje de aleación de tungsteno han demostrado su insustituible valor estratégico en el sector aeroespacial. En múltiples condiciones extremas de radiación intensa, temperaturas extremadamente altas, estructura precisa y gravedad anormal, la aleación de tungsteno no solo ofrece un excelente rendimiento de blindaje, sino que también se convierte en un componente clave indispensable en cohetes, satélites, naves espaciales y misiones en el espacio profundo gracias a su estabilidad térmica, resistencia mecánica y maquinabilidad.

En el futuro, con el avance de las tecnologías en los campos de la exploración espacial tripulada, la propulsión nuclear espacial, la reentrada a alta velocidad, etc., el blindaje de aleación de tungsteno seguirá desempeñando un papel clave en escenarios de aplicación más complejos y cambiantes. Sus materiales compuestos, su ligereza y su integración funcional también se convertirán en importantes líneas de investigación en la ciencia de los materiales y la ingeniería aeroespacial.

### Otros campos emergentes de blindaje con aleaciones de tungsteno

Con la continua expansión de aplicaciones emergentes impulsada por múltiples factores, como la investigación científica, la seguridad nacional y el desarrollo sostenible, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno se están extendiendo desde aplicaciones convencionales, como la medicina tradicional, la industria y la industria aeroespacial, hasta campos de vanguardia como la investigación en física de partículas, la protección militar de alta intensidad y la tecnología de protección ambiental ecológica. Su alta densidad, alto número atómico, excelente resistencia a la radiación y estabilidad térmica le permiten seguir desempeñando un papel de blindaje fiable en entornos extremadamente complejos, convirtiéndose en un material de apoyo importante para futuras aplicaciones multidisciplinarias.

#### 4.4.1 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en experimentos de física de partículas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1. Estructuras de blindaje para aceleradores de alta energía y sistemas de detección:

En dispositivos experimentales de física de partículas a gran escala, como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) de la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN), el Centro de Radiación Sincrotrón de Alta Energía (HEPS) de China y el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER), los equipos experimentales generarán altos flujos de rayos gamma, neutrones y partículas secundarias. Estas radiaciones no solo interfieren con las mediciones experimentales, sino que también ponen en peligro a los investigadores y los sistemas de control.

El blindaje de aleación de tungsteno se utiliza ampliamente en:

- **Beam Dump** : absorbe flujos de partículas de alta velocidad con energías de hasta cientos de GeV.
- **Cavidad de protección alrededor de los detectores de partículas** : como la manga de supresión de rayos gamma de los detectores de xenón líquido;
- **Amortiguadores de neutrones y escudos de artefactos para dispositivos generadores de neutrones** ;
- **Estructura para suprimir la interferencia entre el láser fuerte y la radiación en el acelerador de plasma láser** .

Debido al alto valor Z del tungsteno (74), su eficiencia de bloqueo de rayos gamma de alta energía es mucho mayor que la del cobre y el acero, y su estructura es estable y difícil de fundir. Es un material clave indispensable para la construcción de una plataforma experimental de física de altas energías.

## 2. Blindaje de fondo ultrabajo para experimentos de detección de materia oscura y neutrinos:

Las aleaciones de tungsteno también se utilizan en experimentos en entornos de radiación de fondo ultrabaja, como:

- Proyectos de detección de materia oscura (como XENONnT y LUX-ZEPLIN);
- Experimentos de medición de masa de neutrinos (como KATRIN);
- Experimento de medición de precisión de la desintegración de neutrones y de la desintegración  $\beta$ .

Estos experimentos suelen construirse a gran profundidad, con el objetivo de detectar señales extremadamente débiles, por lo que el contenido de radiactividad de los materiales de blindaje circundantes es extremadamente alto. Mediante el uso de **una aleación de tungsteno de bajo fondo** (es decir, hecha de materias primas de alta pureza con una contaminación radiactiva extremadamente baja), se puede construir una capa protectora eficiente para suprimir eficazmente la radiación de fondo natural y la interferencia de rayos cósmicos.

### 4.4.2 Aplicación del blindaje de aleación de tungsteno en la protección de la seguridad y defensa nacional

#### 1. Estructuras de protección para dispositivos relacionados con armas nucleares:

Las aleaciones de tungsteno se utilizan ampliamente en la industria de defensa, especialmente en la protección controlable de armas nucleares, el análisis de datos de pruebas nucleares subterráneas y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la construcción de sistemas de protección radiológica. El blindaje con aleaciones de tungsteno ofrece las siguientes ventajas:

- **Tiene una alta eficiencia en la absorción de rayos gamma y neutrones** y se puede utilizar para blindaje de ojivas y componentes de prueba de dispositivos nucleares cerrados;
- **Fuerte resistencia al impacto**, puede soportar explosiones o impactos y aún así mantener la integridad;
- **Se utiliza en dispositivos de seguridad de criticidad**, como cajas de protección con reflectores de plutonio o uranio.

## 2. Utilizado en equipos de detección militar y equipos de protección nuclear, biológica y química:

En la guerra electrónica, la detección nuclear y la protección de emergencia, los componentes de aleación de tungsteno se pueden utilizar para:

- Blindaje de módulos electrónicos para plataformas no tripuladas de detección de radiación nuclear;
- Blindaje estructural interno de cascos de protección y detectores nucleares portátiles;
- Protección radiológica de trayectorias ópticas y componentes sensibles en sistemas de armas láser.

Por ejemplo, algunos **chalecos militares portátiles de protección radiológica** han comenzado a utilizar módulos de peso de aleación de tungsteno para reemplazar las tradicionales placas de plomo, teniendo en cuenta tanto la eficiencia del blindaje como la comodidad de uso.

## 3. Exploración de aplicaciones en el campo de la lucha contra el terrorismo y la protección contra explosiones:

Con la creciente demanda de seguridad urbana y prevención y control de ataques terroristas, también se están explorando materiales de aleación de tungsteno para su aplicación en:

- Cámara de aislamiento de material radiactivo y pared a prueba de explosiones;
- Dispositivo móvil de captura de fuentes radiactivas;
- Caja de disposición de emergencia de material radiactivo (utilizada para la gestión de emergencias en aeropuertos, metros y lugares públicos).

Su estructura altamente personalizable, resistencia al impacto y resistencia a la corrosión lo hacen práctico en escenarios de respuesta rápida.

### 4.4.3 Potencial del blindaje de aleación de tungsteno en la tecnología de protección ambiental

#### 1. Monitoreo y control de la radiación ambiental:

En los sistemas de monitoreo ambiental, especialmente en zonas de accidentes nucleares, instalaciones nucleares abandonadas, gestión de minas de uranio, sitios de almacenamiento de residuos radiactivos y otros escenarios, es necesario monitorear con precisión los rayos gamma y la radiación neutrónica ambiental, así como establecer barreras físicas. El blindaje de aleación de tungsteno se puede utilizar para:

- Protección de sondas de radiación para estaciones de monitoreo ambiental locales;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Blindaje modular para almacenes de residuos nucleares;
- Estructura de la barrera de fuente  $\gamma$  en el lixiviado de relaves de uranio.

En comparación con materiales tradicionales como el acero y el plomo, no solo tiene una mayor eficiencia de protección, sino que también reduce el riesgo de contaminación secundaria.

## 2. Tendencia ecológica y respetuosa con el medio ambiente a la sustitución del plomo:

A nivel mundial, a medida que las normativas ambientales sobre contaminación por plomo se vuelven cada vez más estrictas (como la Directiva RoHS de la UE, REACH, la EPA de EE. UU., etc.), la aleación de tungsteno se ha convertido en una opción importante para **los materiales alternativos ecológicos** gracias a sus ventajas de no toxicidad, reciclabilidad y tratamiento de fusión controlable. Se ha incluido en el sistema de materiales de radiación respetuosos con el medio ambiente en algunos países, como:

- Equipo de detección de rayos X verdes (blindaje de aleación de tungsteno en lugar de carcasa de plomo);
- Contenedores para el transporte de residuos médicos nucleares respetuosos con el medio ambiente;
- Módulo de embalaje de protección de aleación de tungsteno reutilizable.

## 3. Aplicación colaborativa con sistemas de energía renovable:

En el desarrollo de la energía de fusión nuclear (como el Tokamak) y los reactores de fisión avanzados, las aleaciones de tungsteno no solo se utilizan como escudos, sino también como **materiales de primera pared de plasma**, capas de desaceleración de neutrones, etc., y están profundamente integradas con las tecnologías de energía limpia. Por ejemplo, en el proyecto ITER, el tungsteno se utilizará en áreas clave para resistir impactos de neutrones de alta energía, además de servir como blindaje y componentes funcionales compuestos estructurales.

### resumen

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno están innovando gradualmente en las áreas de aplicación tradicionales y presentan amplias perspectivas de desarrollo en campos emergentes como los experimentos de física de partículas, la protección de la seguridad de la defensa nacional y la gobernanza ambiental. Su excepcional alta densidad, alta eficiencia de blindaje, buena estabilidad mecánica y propiedades ecológicas controlables lo convierten en una importante plataforma de materiales para futuras tecnologías multidisciplinarias.

Con la continua evolución de la purificación de materiales, la fabricación ecológica y la tecnología de moldeo a medida, las aleaciones de tungsteno desempeñarán un papel cada vez más importante en la física de altas energías, los entornos militares extremos, la prevención y el control de la contaminación radiactiva y los nuevos sistemas energéticos. El desarrollo sostenible del blindaje con aleaciones de tungsteno también se complementará con el progreso científico y tecnológico, la garantía de seguridad y los objetivos de gobernanza ambiental para abrir nuevas posibilidades de aplicación más ricas y complejas.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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

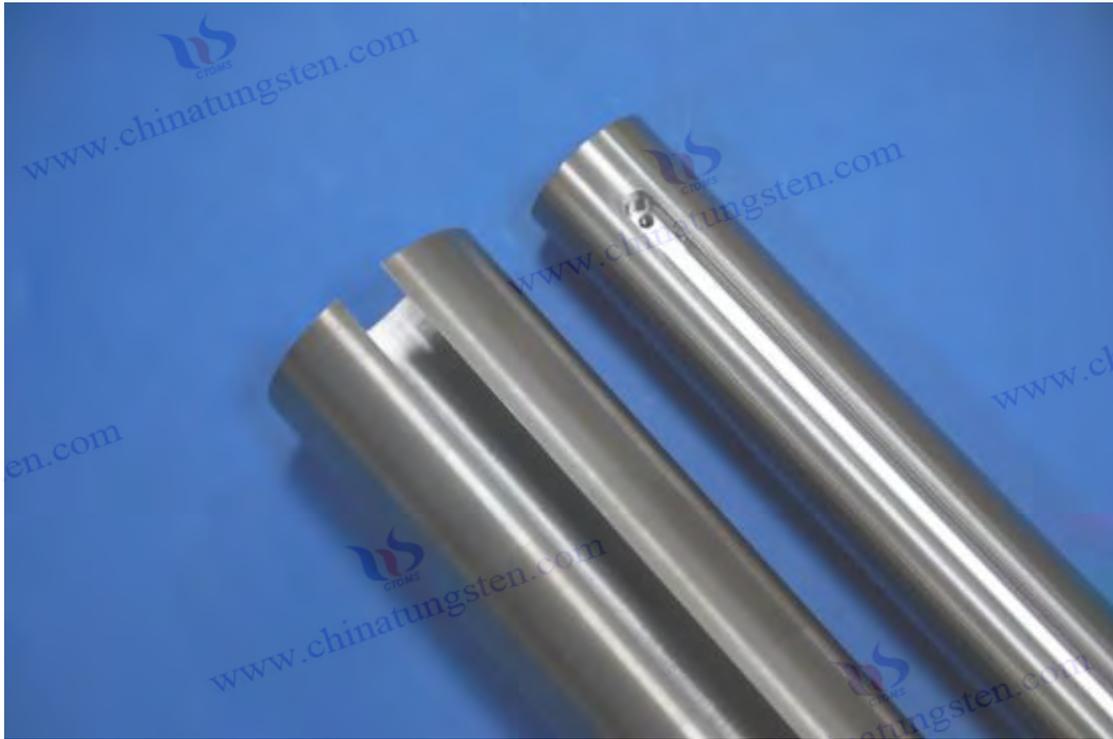
Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### 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 Desafíos y soluciones del blindaje con aleaciones de tungsteno

### 5.1 Gestión de costos y cadena de suministro de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

En el contexto del amplio uso del blindaje con aleaciones de tungsteno en los sectores médico, industrial, aeroespacial y de defensa nacional, lograr costos de fabricación controlables y un sistema de suministro estable, garantizando al mismo tiempo un alto rendimiento, se ha convertido en una preocupación central para fabricantes de materiales y clientes finales. Dado que el tungsteno es un recurso escaso, sus costos de fundición y preparación de aleaciones son relativamente altos, y los requisitos tecnológicos de procesamiento son estrictos, es necesario controlar sistemáticamente los costos y optimizar las configuraciones en la adquisición de materias primas, la construcción de la cadena de suministro, los métodos de fabricación por lotes y otros eslabones.

#### 5.1.1 Optimización del coste de la materia prima de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno

##### 1. Estructura de costos de las materias primas de tungsteno

En la estructura de costos de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno, las materias primas representan entre el 60 % y el 70 % del costo total. Las principales materias primas incluyen:

- Polvo de tungsteno (W): El precio del polvo de tungsteno de alta pureza determina directamente el costo final de la aleación y fluctúa en gran medida debido a la minería de tungsteno, las condiciones y políticas del mercado internacional.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Elementos de aleación: Los elementos agregados comunes incluyen Ni, Fe, Cu, Re, La, etc. Las diferentes proporciones y requisitos de pureza afectan el precio de las materias primas.
- Procesamiento de purificación y cribado: El polvo de tungsteno generalmente necesita pasar por etapas como reducción, granulación, clasificación y secado, lo que aumenta el costo unitario del material.

## 2. Estrategia de optimización

### 1. El uso de recursos secundarios y polvo de tungsteno reciclado

utiliza **desechos de tungsteno reciclado (como alambre de tungsteno de desecho, electrodos de tungsteno y piezas de protección viejas)** para producir polvo de tungsteno reciclado de alta pureza a través de la hidrometalurgia o el método de oxidación-reducción, que no solo puede reducir el costo de las materias primas en un 10% ~ 20%, sino que también se ajusta a la tendencia de protección del medio ambiente y fabricación sostenible.

### 2. Optimizar la proporción de aleación

, cumpliendo con los requisitos de rendimiento de blindaje y resistencia mecánica, y sustituir algunos elementos costosos mediante la verificación del proceso. Por ejemplo:

- Reemplace el sistema Ni-Cu con Ni-Fe;
- Controlar con precisión la cantidad de Re añadido para reducir el costo de los materiales de alta temperatura;
- Utilizar diseños estructurales reforzados con partículas para reemplazar algunos elementos de alto costo.

### 3. La estrategia de adquisición de materias primas de múltiples especificaciones

compra materias primas en diferentes grados según los diferentes tipos de piezas de protección (como protección médica, aeroespacial e industrial), por ejemplo:

- El uso médico requiere polvo de tungsteno de alta pureza ( $\geq 99,95\%$ );
- Para uso industrial, se puede utilizar una pequeña cantidad de polvo de tungsteno comercial con un contenido de oxígeno ligeramente superior para controlar el precio por gramo.

### 4. Los mecanismos de compras conjuntas y de acuerdos a largo plazo y

la firma de contratos de suministro a largo plazo con empresas de metalurgia de polvos o compañías mineras upstream pueden ayudar a bloquear el riesgo de fluctuaciones en los precios de las materias primas y mejorar el poder de negociación.

## 5.1.2 Estrategia de diversificación de la cadena de suministro de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

### 1. Análisis de vulnerabilidad de la cadena de suministro

Los recursos de tungsteno están altamente concentrados, y China, Rusia, Bolivia y otros países representan más del 70 % de la producción mundial de concentrado de tungsteno. Además, algunos países han implementado controles de exportación, restricciones de cuotas o políticas de reserva estratégica para los productos de tungsteno, lo que expone a la industria de las aleaciones de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno a múltiples interferencias, como la geopolítica, las políticas arancelarias y los cuellos de botella en el transporte.

Además, la cadena de procesamiento de las aleaciones de tungsteno es relativamente larga, desde la extracción del mineral, la preparación del polvo de tungsteno, el prensado de la aleación, la sinterización, el mecanizado, el tratamiento térmico y el tratamiento superficial. La inestabilidad en cualquier eslabón puede provocar aumentos de costos o retrasos en las entregas.

## 2. Estrategia de diseño diversificado

### 1. Se implementan en paralelo múltiples canales para el suministro de materia prima

- Compre polvo de tungsteno y metales auxiliares a través de canales duales en el país y en el extranjero;
- Los países con recursos de tungsteno del sudeste asiático y África deben reducir su dependencia individual;
- Explorar el uso de polvos de pureza media provenientes de mercados no tradicionales para productos no esenciales.

### 2. Construcción de centros de procesamiento regionales Establecer

**centros de procesamiento de piezas de protección de aleación de tungsteno o talleres de ensamblaje modular** cerca de equipos médicos o centros industriales puede completar el procesamiento CNC, el ensamblaje y la inspección de calidad en el sitio, lo que reduce los costos logísticos y el inventario intermedio.

### 3. Los vínculos clave del proceso se equilibran

entre el autocontrol y la subcontratación para lograr una capacidad de producción propia para los vínculos centrales (como la sinterización y el mecanizado de precisión), y se logra una asignación de capacidad flexible a través de la subcontratación estratégica para procesos no centrales (como el mecanizado en bruto y el tratamiento de superficies), mejorando así la flexibilidad de la cadena de suministro en general.

### 4. La plataforma de gestión de la cadena de suministro digital

utiliza sistemas ERP y MES para supervisar digitalmente todo el proceso de adquisición de materia prima, niveles de inventario, entrega de pedidos y trazabilidad de calidad, mejorando la transparencia de la información y la eficiencia colaborativa y reduciendo la redundancia de la cadena de suministro.

## 5.1.3 Beneficios económicos de la producción a gran escala de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

### 1. Relación entre la producción en masa y el coste unitario

El blindaje de piezas de aleación de tungsteno es complejo, ya que implica múltiples procesos de precisión y tratamientos a alta temperatura, y la inversión en equipos es considerable. Sin embargo, tras mejorar la tasa de utilización de la capacidad y estandarizar el proceso, se observan evidentes **economías de escala**, que se manifiestan específicamente de la siguiente manera:

- Mejor aprovechamiento del material (los restos se pueden reciclar);
- Los moldes, herramientas y accesorios se pueden reutilizar para distribuir los costos;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Se utilizan en paralelo hornos de tratamiento térmico y centros de mecanizado de múltiples estaciones para mejorar la eficiencia de producción;
- Estandarizar las operaciones y los procesos de control de calidad para reducir las pérdidas operativas y los costos de reproceso.

Según la experiencia de la industria, **si la producción mensual supera las 1.000 piezas** (dependiendo de la complejidad de las piezas), el coste unitario de fabricación puede reducirse entre un 15% y un 30%.

## 2. Optimización colaborativa de la personalización y estandarización

Aunque las piezas de protección de aleación de tungsteno son en su mayoría productos personalizados, a través del diseño modular y el pensamiento de ensamblaje de piezas estándar, se puede tener en cuenta la personalización de lotes pequeños y la producción colaborativa de piezas estándar de lotes grandes:

- Desarrollar módulos de blindaje estándar con interfaces y dimensiones unificadas;
- Se pueden lograr funciones personalizadas reemplazando estructuras internas o componentes funcionales;
- Introducir **muestras de protección de aleación de tungsteno impresas en 3D** como medio de desarrollo de prototipos tempranos para reducir la inversión y el ciclo de producción de prueba.

Esta estrategia paralela "estándar + personalización" ayuda a controlar los costos de I+D y de pruebas, mejorar la velocidad de respuesta al cliente y mejorar la competitividad del mercado.

## 3. Crecimiento sinérgico impulsado por el mercado y la tecnología

Con la mejora de los estándares globales de seguridad radiológica y la expansión de los mercados de fabricación de alta gama, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno están ingresando gradualmente al mercado masivo de gama media a alta, como equipos industriales, pruebas civiles y dispositivos portátiles, desde el nicho de mercado de alta gama de "lotes pequeños, fuerte personalización", lo que promueve las siguientes tendencias:

- El mercado de equipos de imágenes médicas inteligentes tiene una gran demanda de estructuras de protección miniaturizadas;
- Adquisición de módulos universales para soporte de piezas de equipos de detección de rayos de automatización industrial;
- Los componentes de aleación de tungsteno para plataformas militares aeroespaciales han ido creciendo de forma constante.

Este crecimiento masivo de la demanda del mercado impulsa a su vez la optimización continua de los procesos de fabricación y la reducción continua de los costos, formando un ciclo positivo.

### resumen

El blindaje de aleación de tungsteno es insustituible en el campo de los materiales de alto rendimiento, y su capacidad para gestionar los costos y la cadena de suministro determinará directamente la competitividad de las empresas en el mercado global. Al optimizar la selección y la proporción de materias primas, establecer una cadena de suministro diversificada y robusta, y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

promover la implementación de modelos de fabricación a gran escala, no solo es posible controlar eficazmente los costos de fabricación y mejorar la eficiencia de las entregas, sino también mejorar la resistencia al riesgo y la capacidad de respuesta del servicio técnico de las empresas.

En el futuro, con la aplicación de polvo de tungsteno reciclado, el desarrollo de tecnología metalúrgica verde y la digitalización industrial, la fabricación de piezas de protección de aleación de tungsteno será más eficiente, flexible y sostenible, sentando una base sólida para su popularización y aplicación en una gama más amplia de campos.

## 5.2 Precisión de procesamiento y dificultades técnicas de las piezas de protección de aleación de tungsteno

La aleación de tungsteno es un material típicamente difícil de procesar. En el proceso de fabricación de piezas de blindaje de aleación de tungsteno, es necesario no solo superar las dificultades de corte y conformado debidas a su alta dureza, fragilidad y alta densidad, sino también lograr una fabricación de alta precisión y una excelente calidad superficial en estructuras complejas. Estos desafíos exigen una optimización integral de la configuración de equipos, la selección de herramientas, los parámetros de procesamiento, la tecnología de posprocesamiento, etc., y la introducción de tecnologías de fabricación avanzadas como la fabricación aditiva (impresión 3D) para superar los obstáculos de la tecnología de procesamiento tradicional.

### 5.2.1 Desafíos de procesamiento de materiales de alta dureza para blindaje de aleación de tungsteno

#### 1. Características y dificultades de procesamiento de la aleación de tungsteno.

La aleación de tungsteno se refiere generalmente a un material de aleación de alta densidad compuesto por tungsteno (W) como matriz y una cierta proporción de Ni, Fe, Cu, Re y otros metales. Sus características típicas incluyen:

- **Alta dureza y alto punto de fusión** : dureza hasta 320 ~ 380 HV, punto de fusión superior a 3400 °C;
- **Alta fragilidad y poca plasticidad** : especialmente propenso al colapso o agrietamiento de los bordes a bajas temperaturas o sin recocido;
- **Alta densidad y alta conductividad térmica** : plantean desafíos adicionales de inercia y gestión térmica para los equipos de procesamiento;
- **Fácil de oxidar y endurecer la superficie** : es fácil producir una capa de óxido o una cáscara dura sinterizada durante el corte o pulido a alta temperatura.

#### 2. Desafíos de la tecnología de procesamiento tradicional

##### 1. Torneado y fresado.

La aleación de tungsteno presenta una gran resistencia durante el torneado y el fresado. Los problemas comunes incluyen:

- La herramienta se desgasta rápidamente y la vida útil de las herramientas de carburo comunes es corta;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Es probable que se produzcan microgrietas o colapso de los bordes en la superficie procesada;
- El calor de corte se concentra, lo que puede provocar fácilmente una deformación térmica;
- La evacuación de virutas es difícil y las virutas son cortas y duras, lo que puede dañar la herramienta o la pieza de trabajo.

*Contramedidas* : utilizar herramientas de cerámica revestidas y herramientas de diamante; optimizar el tipo y el flujo del fluido de corte; controlar la cantidad de alimentación individual y la profundidad de corte; introducir máquinas herramienta de baja velocidad y alto torque.

## 2. mecanizado por electroerosión (EDM)

, pero también presenta problemas:

- Alta relación de molienda, severo desgaste de la muela de molienda;
- Durante el proceso de electroerosión se generan fácilmente microfisuras superficiales y picaduras de descarga;
- La zona afectada por calor excesivo (ZAT) conduce a propiedades mecánicas reducidas.

*Métodos de mejora* : utilizar muelas abrasivas superduras (como CBN, diamante); realizar múltiples rectificadas finos para controlar el desgaste de las muelas abrasivas; utilizar EDM pulsado para controlar la entrada de calor; y utilizar posprocesamiento para eliminar la capa afectada por el calor.

## 5.2.2 Potencial de aplicación de la tecnología de impresión 3D para el blindaje de aleaciones de tungsteno

### 1. Ventajas de la fabricación aditiva para el blindaje de aleaciones de tungsteno

La aleación de tungsteno presenta una estructura compleja, altos requisitos de precisión y una pequeña tolerancia de procesamiento, lo que la hace ideal para resolver problemas de procesos tradicionales mediante fabricación aditiva (FA). Sus principales ventajas incluyen:

- **Configuración libre** : adecuada para el diseño de módulos de protección de canales complejos y cavidades integradas;
- **Reducir el desperdicio de material** : las materias primas de aleación de tungsteno de alta densidad son caras y la impresión 3D logra una forma casi neta;
- **Mejora la precisión del procesamiento: adecuado para** la fabricación personalizada de lotes pequeños y productos altamente complejos;
- **Gestión optimizada del estrés térmico** : la deposición capa por capa controla la entrada de calor y reduce el riesgo de agrietamiento térmico.

### 2. Ruta tecnológica clave

#### 1. Fusión Láser Selectiva (SLM).

La tecnología de impresión 3D de aleaciones de tungsteno más utilizada actualmente es la SLM, que funde selectivamente polvos de aleación de tungsteno mediante rayos láser de alta energía y los acumula capa a capa para producir componentes de alta densidad (>98%).

Los desafíos incluyen:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Control de esferoidización y fluidez de polvos;
- Para agrietarse se requiere control de temperatura y velocidad;
- Posprocesamiento para eliminar la tensión interna y mejorar la tenacidad.

## 2. La fusión por haz de electrones (EBM) combinada con la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) La EBM

es adecuada para materiales con alto punto de fusión y no se oxida fácilmente en la atmósfera de procesamiento; combinada con HIP, puede eliminar aún más los poros y las microfisuras y mejorar la densidad y la resistencia mecánica.

## 3. La inyección de aglutinante y la sinterización

se utilizan para componentes de blindaje pequeños con bajos requisitos de resistencia estructural, como módulos de blindaje portátiles o componentes de guía de neutrones. Ofrece un bajo coste de fabricación y una alta velocidad, y es ideal para la personalización en masa.

## 3. Cuellos de botella técnicos y soluciones

- **Control de tensión residual** : optimizar la estrategia de escaneo y el sistema de precalentamiento;
- **Dificultad en la preparación del polvo** : Desarrollar polvo de tungsteno con bajo contenido de oxígeno y alta esfericidad;
- **Alta sensibilidad al agrietamiento después del formado** : Desarrollar aleaciones de tungsteno imprimibles con cierta plasticidad como W-Ni-Fe;
- **Problemas de estabilidad dimensional** : Establecer un mecanismo de corrección para la vinculación impresión-tratamiento térmico-mecanizado.

## 5.2.3 Control de precisión y calidad de la superficie de las piezas de protección de aleación de tungsteno

### 1. Requisitos de control de precisión del procesamiento

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno requieren una estructura que tenga alta precisión de forma y posición, así como estabilidad de unión. Los requisitos típicos incluyen:

- Tolerancia de coaxialidad y planitud  $<0,02$  mm;
- Error de tamaño del orificio  $<\pm 0,01$  mm;
- Las piezas de paredes delgadas deben tener una alta resistencia a la deformación;
- El empalme de múltiples módulos debe mantener la simetría estructural y el sellado.

### 2. Estrategia de mejora de la calidad de la superficie

#### 1. La estrategia de acabado del mecanizado

utiliza un centro de mecanizado CNC de alta precisión, combinado con un avance pequeño, una profundidad de corte baja, suficiente refrigerante y un sistema de fijación dedicado para reducir eficazmente los errores causados por la deformación térmica y la vibración.

- #### 2. Para piezas de blindaje de alta gama con una rugosidad superficial Ra de 0,2 a 0,8 $\mu\text{m}$ , el pulido electroquímico y el microgranallado suelen utilizar un electrolito especial de aleación de tungsteno para homogeneizar la superficie y eliminar

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microfisuras y marcas de corte. Combinado con microesferas de vidrio o granallado cerámico, puede mejorar la tensión de compresión superficial y la resistencia a la fatiga.

### 3. Optimización del recubrimiento y enchapado de superficies

- Para las piezas de protección de equipos médicos, **se pueden agregar recubrimientos no tóxicos como TiN y CrN** ;
- Los componentes de protección aeroespacial pueden utilizar **recubrimientos cerámicos como SiC y ZrO<sub>2</sub>** para mejorar la reflexión del calor y el rendimiento antioxidante;
- Se puede agregar un revestimiento conductor de níquel y cobre para reducir las fugas electromagnéticas según los requisitos de compatibilidad electromagnética (EMC).

### 4. La tecnología de pruebas no destructivas de defectos superficiales

incorpora **escaneo ultrasónico, pruebas no destructivas con rayos X, medición de tres coordenadas (CMM) e interferómetro óptico** para garantizar que las dimensiones clave y las condiciones de la interfaz cumplan con los estándares de diseño.

## resumen

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno son el eslabón clave que determina su fiabilidad y adaptabilidad de ingeniería. Desde el corte de la materia prima hasta el moldeo de alta precisión, y posteriormente hasta la exploración de vanguardia de la fabricación aditiva, toda la cadena de procesamiento se enfrenta a los retos de los materiales de alta dureza y a las dificultades de procesamiento de estructuras complejas.

Mediante la optimización de los procesos tradicionales, la introducción de nuevas tecnologías de impresión 3D y la mejora de la precisión y los métodos de control de superficies, la precisión de procesamiento de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno ha alcanzado un nivel superior. En el futuro, con el desarrollo de materiales de herramientas de alto rendimiento, la mejora de las bibliotecas de parámetros de fabricación aditiva y la aplicación de sistemas de detección inteligente, la fabricación de alta precisión de piezas de blindaje de aleación de tungsteno será más económica, adaptable y reproducible, lo que contribuirá a su desarrollo continuo en la fabricación de alta gama, la atención médica avanzada y la exploración espacial.

## 5.3 Cuestiones de normalización y certificación del blindaje de aleación de tungsteno

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente en campos clave como equipos médicos, detección industrial, protección aeroespacial y nuclear, por lo que su fabricación y aplicación deben seguir un conjunto de normas científicas, unificadas e implementables. Sin embargo, la industria actual presenta problemas como la fragmentación de las normas, el insuficiente reconocimiento mutuo de las normas entre países y la falta de un sistema de certificación sistemático para las nuevas "piezas de blindaje inteligentes", lo que plantea importantes desafíos para el comercio internacional, el intercambio de productos, la evaluación de la calidad y la supervisión de la seguridad.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Este capítulo se centrará en los temas centrales de la construcción de sistemas estándar, explorará las diferencias entre los estándares nacionales e internacionales actuales, el progreso de la estandarización de los componentes de protección de aleación de tungsteno inteligente y los caminos factibles para promover la colaboración global y estándares unificados.

## Diferencias entre las normas internacionales y nacionales para el blindaje de aleaciones de tungsteno

### 1. Panorama general de las normas existentes

No existe una norma independiente unificada a nivel mundial para las piezas de blindaje de aleación de tungsteno. Las especificaciones técnicas relevantes se distribuyen principalmente en los siguientes campos:

- **Normas generales de materiales** : como ASTM B777 (especificación estándar para aleaciones pesadas de tungsteno), ISO 9001 (sistema de gestión de calidad), GB/T 14841 (clasificación de tungsteno y aleaciones de tungsteno);
- **Estándares orientados a aplicaciones** :
  - Protección radiológica médica: IEC 60601, ISO 11137, YY/T 1554;
  - Protección de la industria nuclear: ISO 7195 (materiales nucleares), IAEA RSG-1.7;
  - Equipos de detección de rayos X industriales: ASTM E181, GB/T 19802;
- **Normas de procesamiento y prueba** : como ISO 2768 (tolerancia), GB/T 16865 (método de prueba para productos de polvo metálico sinterizado), ASTM E10 (prueba de dureza Brinell), etc.

Si bien la aleación de tungsteno es cada vez más importante como material de protección, debido a su fuerte naturaleza transversal y a sus complejos escenarios de aplicación, **aún no se ha establecido un sistema estándar independiente, sistemático y aplicable en la industria para las piezas de protección de aleación de tungsteno** .

### 2. Diferencias entre los estándares chinos y extranjeros

#### 1. Diferentes métodos de denominación y clasificación :

las normas internacionales se basan principalmente en la densidad del material y la clasificación de los componentes (como la Clase 1-4 en ASTM B777), mientras que las normas chinas a menudo se dividen por métodos de proceso y grados (como la aleación W-Ni-Fe, la serie WCu), lo que resulta en desviaciones en la denominación y aplicabilidad del mismo material.

#### 2. Los índices de rendimiento son obviamente diferentes :

para materiales de blindaje de aleaciones de tungsteno similares, las normas extranjeras imponen requisitos más estrictos en cuanto a resistencia a la radiación, consistencia de la densidad y ensayos no destructivos. Por ejemplo, la norma ASTM B777 establece un error de densidad admisible de  $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ , mientras que algunas normas nacionales permiten un error de  $\pm 0,3 \text{ g/cm}^3$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. **Diferentes métodos de prueba y estándares de equipos :**

Algunos estándares internacionales utilizan tomografía computarizada avanzada, imágenes tridimensionales de rayos X y sistemas de prueba CMM totalmente automáticos, mientras que algunas empresas nacionales aún dependen principalmente de pruebas manuales y pruebas puntuales. Las diferencias en la implementación de los estándares generan numerosos obstáculos para la certificación de productos en el comercio exterior.

4. **Desalineación de los estándares ambientales y de seguridad :**

los estándares extranjeros enfatizan RoHS, REACH y requisitos de protección ambiental sin plomo, mientras que China actualmente requiere instrucciones de certificación ecológica adicionales al exportar piezas de protección médicas y respetuosas con el medio ambiente, lo que aumenta los costos de exportación y el tiempo del proceso de certificación.

### 5.3.2 Desafíos en la estandarización de piezas de blindaje inteligente de aleación de tungsteno

Con el desarrollo de la tecnología de control de radiación, la integración microelectrónica y la tecnología de detección de materiales, las piezas de blindaje inteligentes de aleación de tungsteno se utilizan gradualmente en la medicina de alta gama, naves espaciales, reactores inteligentes de energía nuclear y otros campos. Estas piezas de blindaje suelen integrar las siguientes características:

- **Sensores y sistemas de monitorización :** percepción en tiempo real de la intensidad de la radiación, temperatura, vibraciones, etc.;
- **Mecanismo de respuesta adaptativa :** ajuste del ángulo de protección mediante la deformación de la estructura del material o componentes controlados electrónicamente;
- **Función de comunicación y adquisición de datos :** realizar el control de enlace con el sistema de control superior.

Estas nuevas características significan que el sistema tradicional de estándares de materiales centrado en la "forma física" y el "índice de densidad" ya no es suficiente para evaluar de manera integral la calidad y la seguridad del producto.

#### Las lagunas normativas actuales se concentran principalmente en:

1. **El "rendimiento de blindaje inteligente" carece de un sistema de índice de evaluación :** como precisión de detección, estabilidad de interferencia electromagnética, tiempo de retardo de respuesta, nivel de seguridad de datos, etc.;
2. **Falta de estándares para estructuras compuestas :** No existe un método de evaluación sistemático para la estabilidad mecánica, la resistencia de la interfaz y la compatibilidad de expansión y contracción térmica de los componentes de protección de la estructura multicapa de "aleación de tungsteno + sensor + revestimiento";
3. **Falta de estándares de integración de software y hardware :** por ejemplo, hay una falta de estándares unificados para interfaces de transmisión de datos, compatibilidad EMC y protocolos de verificación funcional;
4. **Aún no se han establecido las pruebas del ciclo de vida del producto ni la certificación del modo de falla :** no existen especificaciones técnicas para la predicción de la vida útil

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de los componentes de protección inteligente, la evaluación del envejecimiento y la estabilidad en entornos extremos.

#### **Ruta de exploración:**

- Liderados por líderes de la industria, universidades e instituciones de investigación han formulado conjuntamente las "Especificaciones generales para componentes de blindaje de aleación de tungsteno inteligente";
- Consultar el marco estándar de IEC e ISO en el campo de terminales inteligentes y dispositivos médicos para establecer un modelo de certificación altamente compatible;
- Incorporar indicadores de evaluación de inteligencia artificial en áreas como mantenimiento predictivo y alerta de fallas para ampliar los límites de las definiciones estándar.

### **Cooperación global y estandarización de piezas de blindaje de aleación de tungsteno**

#### **1. Promover el mecanismo de reconocimiento mutuo de normas**

En la actualidad, la exportación de piezas de protección de aleación de tungsteno enfrenta barreras de certificación en muchos países, como:

- **La certificación CE de la UE** requiere RoHS e ISO 13485 adicionales;
- **La FDA/NRL de EE. UU.** exige informes detallados de pruebas de seguridad;
- **El sistema de certificación METI de Japón** pone énfasis en la evaluación de riesgos ambientales y de fugas electromagnéticas;
- **La certificación CCC de China** aún no cubre estos productos.

La eficiencia y la confianza del comercio transfronterizo de piezas de protección de aleación de tungsteno mejorarán significativamente.

#### **Método de empuje:**

- Establecer alianzas internacionales de laboratorios de ensayos de materiales (por ejemplo, unirse a ILAC-MRA);
- Promover la conversión de normas bilaterales entre ISO/ASTM/IEC y otras organizaciones y la Administración Nacional de Normalización de China;
- Alentar a las empresas líderes nacionales a tomar la iniciativa en la propuesta de proyectos de normas internacionales y promover las soluciones chinas en el mundo.

#### **2. Construcción de una plataforma de colaboración estándar global**

La capacidad global de producción de componentes de blindaje de aleación de tungsteno se concentra principalmente en China, Alemania, Estados Unidos, Japón y Corea del Sur, pero la comunicación estándar es relativamente débil. Se recomienda potenciar las sinergias mediante las siguientes medidas:

1. **Establecer alianzas de colaboración internacionales de la industria**, como el "Comité de Normas Globales de Blindaje de Aleaciones de Tungsteno (WASCC)", que abarca el establecimiento de normas, el intercambio de datos, la verificación de pruebas, la protección de la propiedad intelectual, etc.;

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

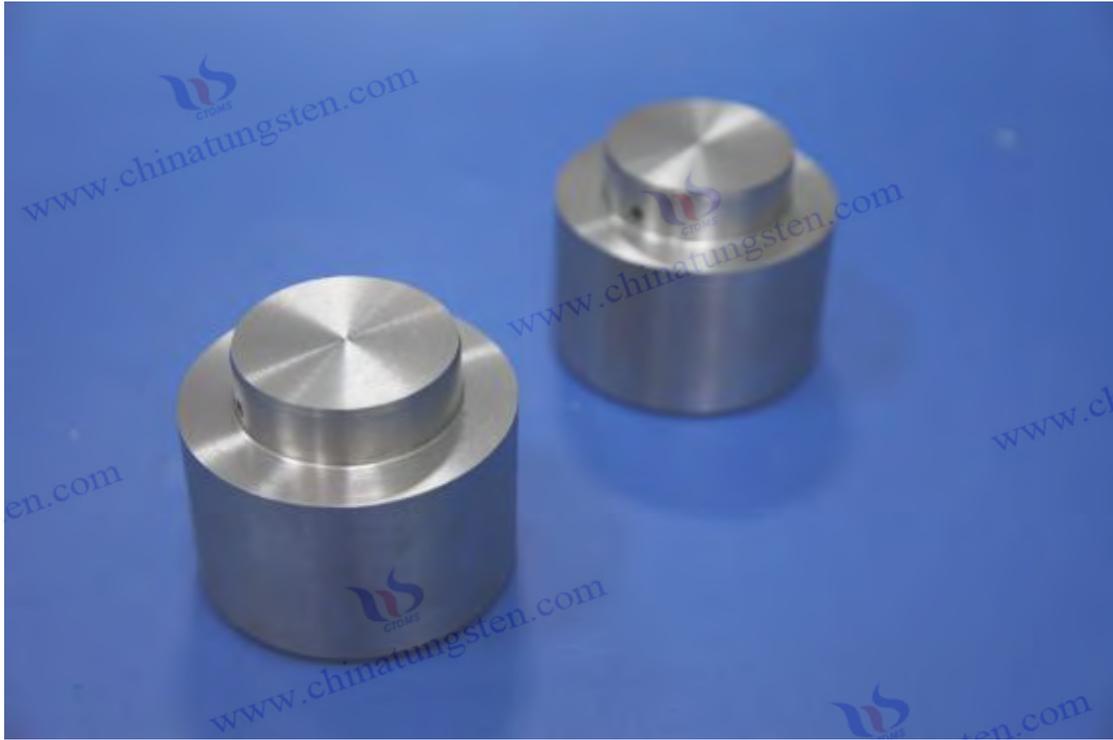
2. **Organizar foros y talleres periódicos sobre normas internacionales** para atraer a representantes de organismos reguladores, fabricantes y usuarios de diversos países;
3. **Promover el acceso abierto a las normas** y alentar a investigadores, ingenieros y organismos de certificación a participar en el proceso de actualización de las normas;
4. **Desarrollar conjuntos de herramientas internacionales estándar multilingües** (como módulos de traducción de normas ISO, diagramas de flujo de certificación, etc.) para reducir el umbral de participación de las pequeñas y medianas empresas.

#### resumen

Como material de protección avanzado, la calidad y la fiabilidad de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno dependen en gran medida del respaldo del sistema de normalización. El actual sistema de normalización global aún está fragmentado y es transversal, lo que no solo afecta la compatibilidad entre productos, sino que también dificulta el comercio transfronterizo y la transformación de la fabricación inteligente. La creación de un marco de normalización unificado, científico y abierto se ha convertido en el eje central del desarrollo de alta calidad de la industria de las aleaciones de tungsteno.

En el futuro, debemos promoverlo en tres dimensiones: primero, optimizar la correspondencia e integración de las normas nacionales e internacionales; segundo, acelerar la formulación de estándares de blindaje funcional para el desarrollo inteligente; tercero, establecer una plataforma de alianza de estándares para la colaboración global y el reconocimiento mutuo. Solo mediante la profunda integración de las normas, la certificación y la fabricación, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno podrán alcanzar un acceso global al control de calidad en la nueva era de equipos de protección de alta gama y sistemas de fabricación ecológicos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## Un apéndice

### Apéndice 1: Términos y símbolos comunes para el blindaje de aleaciones de tungsteno

Como material de protección radiológica de alto rendimiento, la fabricación, el diseño y la aplicación del blindaje de aleación de tungsteno implican el uso de diversos términos profesionales, símbolos físicos y conceptos estandarizados. Para facilitar la comprensión del contenido relevante durante la lectura del texto principal, este apéndice se ha compilado específicamente para explicar sistemáticamente los términos, símbolos y la importancia de las aplicaciones del blindaje de aleación de tungsteno, para su consulta por parte de técnicos, investigadores científicos y organismos normativos.

#### 1.1 Definición de terminología y escenarios de aplicación del blindaje de aleación de tungsteno

el término	Definición	Escenarios de aplicación y descripción
Aleación pesada de tungsteno (WHA)	Materiales de alta densidad compuestos principalmente de tungsteno (W) (que representa $\geq 90\%$ ) y dopados con elementos de aleación como Ni, Fe y Cu.	Módulo de blindaje CT médico, cubierta de protección para detección de fallas industriales, bloque de equilibrio militar

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Eficiencia de blindaje</b>	La capacidad de un material para atenuar un determinado tipo de radiación ( $\gamma$ , X, $\beta$ , neutrones, etc.), generalmente expresada como tasa de atenuación o coeficiente de penetración.	Cabina de equipo médico, carcasa de detector nuclear
<b>Gravedad específica/densidad (Densidad, <math>\rho</math>)</b>	La masa por unidad de volumen del material, aleación de tungsteno, suele ser de 17,0 a 18,8 g/cm <sup>3</sup> .	Indicadores básicos para medir la fuerza de protección y el control del peso
<b>Coefficiente de atenuación lineal (<math>\mu</math>)</b>	Describe la capacidad de atenuación de un material por unidad de espesor a una determinada intensidad de radiación, en cm <sup>-1</sup>	Se utiliza para cálculos de diseño de blindaje y simulación de dosis de radiación.
<b>Espesor mínimo del escudo (<math>d_{min}</math>)</b>	El espesor mínimo del material necesario para lograr un nivel específico de protección radiológica en determinadas condiciones de intensidad de radiación y energía.	Diseñado para blindar carcasas en medicina nuclear, laboratorios de radiación, etc.
<b>Unidad de blindaje inteligente</b>	Los sensores incorporados y las estructuras de control electrónico permiten el monitoreo en tiempo real y el ajuste de retroalimentación de los componentes de protección.	Naves espaciales, equipos de radioterapia inteligentes, terminales móviles de detección nuclear
<b>Capacidad calorífica específica (<math>c_p</math>)</b>	La cantidad de calor absorbida por una unidad de masa de un material cuando la temperatura aumenta en 1 K, en J/(kg·K)	Evaluación de estabilidad térmica, prueba de adaptabilidad del entorno de trabajo a la radiación continua
<b>Tasa de fuga de radiación</b>	La tasa de dosis efectiva por unidad de área por unidad de tiempo del escudo, en $\mu$ Sv/h	Pruebas de desempeño de seguridad, especialmente en el proceso de certificación de equipos de radiación médica
<b>Densidad de sinterización</b>	La relación entre la densidad del producto sinterizado y la densidad teórica refleja el control del poro interno.	Uno de los indicadores de inspección de calidad, que determina la resistencia de las piezas de blindaje y la eficiencia de la protección radiológica.
<b>Aleación de baja activación</b>	Aleaciones con rápida desintegración radiactiva y baja actividad residual después de la exposición a radiación de alta energía	Se utiliza para reciclar materiales de entornos radiactivos, como componentes del reactor experimental ITER.

## 1.2 blindaje de aleación de tungsteno

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para la evaluación del rendimiento del blindaje de aleaciones de tungsteno y el diseño estructural, se requieren diversas expresiones y símbolos matemáticos. A continuación, se presentan fórmulas comunes y sus explicaciones:

### Símbolos comunes de física y materiales

símbolo	Explicación del significado	unidad
$\rho$	Densidad del material	g/cm <sup>3</sup> o kg/m <sup>3</sup>
micras	Coefficiente de atenuación lineal	cm <sup>-1</sup>
d	Espesor del material	centímetro
Yo	Intensidad del rayo incidente	Cualquier unidad de dosificación
I	La intensidad de los rayos después de la penetración.	Misma unidad que I <sub>0</sub>
Alto voltaje	Dureza Vickers	kgf/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$	Fuerza de fluencia	MPa
$\eta$	Eficiencia de blindaje	%(porcentaje)
T	temperatura	K o °C

### Fórmulas de cálculo comunes

#### 1. Fórmula de atenuación de rayos (Ley de Beer-Lambert) :

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}$$

Explicación: La intensidad incidente es I<sub>0</sub>, y después de pasar a través de la aleación de tungsteno con un espesor de d, la intensidad restante es I;

Aplicación: Se utiliza para determinar el espesor de blindaje de aleación de tungsteno requerido.

#### 2. Fórmula de cálculo de la eficiencia de blindaje :

$$\eta = (1 - I / I_0) \times 100\%$$

Indica la relación de atenuación de la radiación del blindaje de aleación de tungsteno;

Se utiliza comúnmente para la conversión de datos de pruebas de laboratorio y la evaluación del nivel de blindaje.

#### 3. Fórmula de cálculo de densidad teórica (aleación) (aproximada para materiales multifásicos):

$$\rho_{\text{Aleación}} = \sum (w_i \cdot \rho_i)$$

Donde w<sub>i</sub> es la fracción de masa de cada componente,  $\rho_i$  es la densidad de cada componente;

Se utiliza para el diseño de aleaciones y la predicción de la relación de polvo.

#### 4. Fórmula de cálculo de densidad de sinterización:

$$\text{Densidad} = \rho_{\text{teórica}} / \rho_{\text{sinterizada}} \times 100\%$$

Se utiliza para evaluar la consistencia de la calidad y el nivel de control de porosidad de la aleación de tungsteno de pulvimetalurgia.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 1.3 Avances en la estandarización de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

#### 1. Progreso del Sistema Internacional de Normalización

Si bien no existe un estándar global unificado para el blindaje de aleaciones de tungsteno, los siguientes estándares tienen un valor de referencia importante a nivel mundial:

Norma N°	nombre	ilustrar
ASTM B777	Especificación estándar para aleaciones pesadas de tungsteno	Clasificación, propiedades físicas y requisitos de procesamiento de las aleaciones pesadas de tungsteno
ISO 7195	Tecnología de combustible nuclear: aleaciones de circonio de grado nuclear	Aplicable a materiales de grado nuclear, consulte la evaluación de algunos componentes de blindaje.
IEC 60601	Equipos electromédicos: requisitos generales	Normas de seguridad que deben cumplir las estructuras de protección radiológica médica
ASTM E181	Método de prueba estándar para la atenuación de la radiación de materiales	Se utiliza principalmente para la verificación de materiales de protección contra rayos X y rayos gamma.
OIEA TS-G-1.1	Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación	Orientación general del OIEA sobre seguridad radiológica

#### resumen

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno requieren definiciones terminológicas rigurosas, modelos matemáticos precisos y sistemas de normas estandarizados. Al unificar la terminología, expresar con claridad las relaciones simbólicas y comprender las tendencias de las normas internacionales, investigadores e ingenieros pueden lograr un mayor nivel de colaboración profesional en el diseño y desarrollo, el control de calidad y la cooperación transfronteriza de piezas de blindaje.

Los equipos de protección relacionados con la aleación de tungsteno seguirán mejorándose y se convertirán en una base importante para promover la estandarización y la internacionalización de la industria.

#### Apéndice 2: Normas internacionales y nacionales para blindaje de aleaciones de tungsteno (ISO/ASTM/GB)

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno deben cumplir estrictamente las normas pertinentes para garantizar la calidad, la seguridad y el rendimiento. Si bien no existe una norma específica única para piezas de blindaje de aleación de tungsteno a nivel mundial, numerosas normas ISO, ASTM e IEC contienen disposiciones claras sobre las propiedades de los materiales, los métodos de prueba y los requisitos de seguridad. En los últimos años, China ha establecido y mejorado activamente las normas GB y de la industria, y ha ido conformando un sistema sistemático de especificaciones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Este apéndice tiene como objetivo ordenar exhaustivamente las principales normas nacionales e internacionales en el campo del blindaje de aleación de tungsteno, analizar profundamente su connotación técnica y mirar hacia la futura dirección de desarrollo de la estandarización.

## 2.1 Blindaje de aleación de tungsteno

### 2.1.1 Propiedades y especificaciones del material

- **ASTM B777 — Especificación estándar para aleaciones pesadas de tungsteno.**  
Esta norma define en detalle la composición del material, las propiedades físicas, las propiedades mecánicas y los requisitos de microestructura de las aleaciones pesadas de tungsteno. Abarca los principales grados, como W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, y especifica la densidad ( $\geq 17,0 \text{ g/cm}^3$ ), la dureza, la resistencia a la tracción y la ductilidad. Proporciona una base sólida para la selección de materiales de blindaje para aleaciones de tungsteno.
- **La norma ISO 7195 — Tecnología de combustible nuclear — Aleaciones de circonio de grado nuclear**  
se basa principalmente en aleaciones de circonio; los métodos de prueba, el control de calidad y la evaluación de la estabilidad de la radiación de los materiales nucleares en la norma ISO 7195 proporcionan una referencia para la verificación de la seguridad nuclear de las piezas de protección de aleación de tungsteno.

### 2.1.2 Rendimiento de blindaje y estándares de seguridad

- **ASTM E181 — Método de prueba estándar para la atenuación de la radiación de materiales.**  
Esta norma especifica el proceso de prueba y el análisis de datos del rendimiento de protección de los materiales contra rayos X y rayos gamma, y es una referencia importante para evaluar la eficiencia de protección de las aleaciones de tungsteno.
- **IEC 60601 — Equipos eléctricos médicos: Requisitos generales para seguridad básica y rendimiento esencial**  
es una norma de seguridad de equipos médicos que establece requisitos específicos para el límite de fuga de radiación, la resistencia mecánica y la compatibilidad electromagnética de los componentes de blindaje de aleación de tungsteno médico.
- **Las normas de seguridad del OIEA (por ejemplo, GSR Parte 3)**  
son la guía de seguridad de protección radiológica del Organismo Internacional de Energía Atómica, que abarca los principios de diseño de materiales de blindaje y las especificaciones del entorno de uso, y constituyen una referencia autorizada mundial para la seguridad nuclear del blindaje de aleaciones de tungsteno.

### 2.1.3 Estándares de procesamiento y prueba

- **ISO 2768 — Tolerancias generales**  
Esta norma se aplica al control de tolerancia dimensional de piezas de protección de aleación de tungsteno para garantizar que la precisión de fabricación cumpla con los requisitos técnicos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ASTM E10: el método de prueba estándar para dureza Brinell de materiales metálicos** se utiliza principalmente para probar la dureza de los materiales de protección de aleación de tungsteno para garantizar que la dureza del material cumpla con las especificaciones de diseño.
- **ASTM B930 — Guía estándar para la fabricación de aleaciones pesadas de tungsteno**, proporciona pautas técnicas para el procesamiento, la soldadura, el tratamiento térmico, etc. de aleaciones pesadas de tungsteno, para respaldar la fabricación de alta calidad de piezas de protección.

## Explicación detallada de las normas nacionales para el blindaje de aleaciones de tungsteno.

### 2.2.1 Materiales y normas de clasificación

- **GB/T 14841 — Clasificación y representación del tungsteno y sus aleaciones.** Esta norma clasifica sistemáticamente los materiales de tungsteno y sus aleaciones, especifica las reglas de nomenclatura y los parámetros básicos de rendimiento, y constituye el estándar básico para la industria nacional de aleaciones de tungsteno.
- **GB/T 19802 — Reglas Generales para Componentes de Blindaje contra la Radiación para Equipos Industriales de Ensayos No Destructivos**. Esta norma especifica los principios de diseño, los indicadores de rendimiento y los métodos de ensayo de los componentes de blindaje para equipos industriales de detección de radiación. Constituye una base importante para la fabricación de componentes de blindaje de aleación de tungsteno en el sector industrial.

### 2.2.2 Estándares del campo médico

- **YY/T 1554 — Requisitos técnicos y métodos de prueba para módulos de blindaje de aleación de tungsteno para uso médico** Esta norma establece indicadores detallados como densidad, espesor, propiedades mecánicas, eficiencia de blindaje y bioseguridad para módulos de blindaje de aleación de tungsteno para protección radiológica médica a fin de garantizar que los dispositivos médicos cumplan con los estándares nacionales de seguridad médica.
- **WS/T 663 — Especificaciones técnicas para productos de protección radiológica médica establece requisitos de seguridad y rendimiento** para una variedad de materiales de protección radiológica, incluidas las aleaciones de tungsteno, para garantizar la seguridad radiológica de los pacientes y el personal médico.

### 2.2.3 Estándares de proceso y pruebas

- **T/CSTM 00259: Especificación técnica general para productos de aleación de tungsteno de alta densidad** emitida por la Sociedad China para Pruebas y Materiales, que especifica en detalle las pruebas de propiedades del material, la precisión dimensional, el control de defectos internos y los estándares de calidad de la superficie de las piezas de protección de aleación de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **GB/T 34540: El método de prueba de materiales de sinterización de polvo metálico** incluye la densidad de sinterización, la porosidad y la prueba de dureza del polvo de aleación de tungsteno, lo que constituye un importante soporte técnico para el control de calidad de fabricación de piezas de protección de aleación de tungsteno de metalurgia de polvos.

## 2.3 Planificación futura para la estandarización de piezas de protección de aleación de tungsteno

### 2.3.1 Establecimiento de estándares para componentes de blindaje inteligentes

Con el desarrollo de la tecnología de detección inteligente e integración de datos, las piezas de blindaje de aleación de tungsteno están evolucionando gradualmente hacia "piezas de blindaje inteligentes". Las futuras normas deben contemplar:

- Especificaciones de verificación de rendimiento y seguridad funcional para componentes de blindaje inteligente;
- Normas de pruebas de adaptabilidad ambiental para la integración de sensores;
- Estándares relacionados con la interfaz de datos, protocolo de comunicación y protección de seguridad.

El Ministerio de Ciencia y Tecnología de China y la Administración Nacional de Normas han iniciado el desarrollo de normas relacionadas con materiales y equipos inteligentes, y las normas para componentes de protección inteligente de aleación de tungsteno se incluirán en proyectos de investigación clave.

### 2.3.2 Estándares de fabricación ecológica y protección del medio ambiente

La fabricación ecológica se ha convertido en una tendencia global en el desarrollo de la manufactura. La estandarización de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno fortalecerá la regulación de los procesos de protección ambiental, el reciclaje de residuos y la producción baja en carbono, además de promover:

- Normas de adquisición ecológica para materias primas de aleación de tungsteno;
- Normas de emisiones y consumo de energía para procesos de fabricación;
- Especificación técnica para la recuperación y reciclaje de residuos de aleaciones de tungsteno.

Muchas provincias y ciudades de China han lanzado proyectos de demostración de fabricación ecológica para materiales de protección de alto rendimiento, y se espera que se publiquen normas pertinentes sucesivamente entre 2025 y 2028.

### 2.3.3 Cooperación internacional y normalización

Para romper las barreras estándar y promover el comercio internacional y el intercambio técnico de piezas de protección de aleación de tungsteno, debemos:

- Fortalecer la cooperación entre ISO, ASTM y la Administración Nacional de Normalización de China;

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Promover el establecimiento de un comité técnico de normalización internacional para el blindaje de aleaciones de tungsteno;
- Promover la conversión y el reconocimiento bidireccional de documentos estándar y reducir la duplicación de pruebas y certificación.

Las organizaciones internacionales relevantes han comenzado a explorar el establecimiento de una base de datos global de aleaciones de tungsteno y materiales de aleaciones pesadas para mejorar la eficiencia colaborativa de la cadena industrial global.

## resumen

El blindaje de aleaciones de tungsteno abarca las propiedades de los materiales, la tecnología de procesamiento, los métodos de prueba y las especificaciones de seguridad. Las normas internacionales se centran en los materiales básicos y las pruebas de aplicación, y las normas nacionales se están mejorando gradualmente para adaptarse al desarrollo industrial local y a las necesidades de exportación. En el futuro, la inteligencia artificial, la fabricación ecológica y la cooperación internacional serán los tres ejes principales del desarrollo de normas.

Los estándares sistemáticos y unificados no solo mejorarán la calidad y la seguridad del producto, sino que también promoverán en gran medida la competitividad global y el desarrollo sostenible de la industria de blindaje de aleación de tungsteno.

## Apéndice 3: Principales bases de datos bibliográficas y de investigación sobre blindaje de aleaciones de tungsteno

El blindaje de aleación de tungsteno es un material importante en el campo de la protección radiológica, y sus resultados de investigación científica, avances tecnológicos y casos de aplicación se encuentran ampliamente difundidos en la literatura de diversas disciplinas e industrias. Para facilitar a investigadores, ingenieros y profesionales de la industria la obtención eficiente de información fidedigna, este apéndice clasifica sistemáticamente la literatura académica principal y las principales bases de datos de investigación en el campo del blindaje de aleación de tungsteno, y ofrece sugerencias de acceso y uso.

### Literatura académica básica sobre el blindaje con aleaciones de tungsteno

#### 3.1.1 Literatura básica clásica

- **“Aleaciones pesadas de tungsteno: procesamiento, propiedades y aplicaciones”** — *Journal of Materials Science & Engineering*  
describe exhaustivamente el proceso de preparación, la microestructura y las propiedades mecánicas de las aleaciones de tungsteno, centrándose en el análisis de sus propiedades de blindaje y la estabilidad de la resistencia a la radiación.
- **“Rendimiento de blindaje radiológico de materiales a base de tungsteno”** — *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*  
compara sistemáticamente la eficiencia de las aleaciones de tungsteno y los materiales

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tradicionales a base de plomo en el blindaje contra rayos gamma y neutrones, y propone nuevas ideas para optimizar el diseño de materiales.

- **“Desarrollo de materiales de protección contra la radiación inteligentes que incorporan sensores y estructuras adaptativas”** : *Advanced Functional Materials*  
explora el diseño estructural y el potencial de aplicación de componentes de protección de aleación de tungsteno inteligentes con sensores integrados.

### 3.1.2 Últimas investigaciones de vanguardia

- **“Aleaciones de tungsteno de baja activación para aplicaciones en reactores de fusión”** : *Fusion Engineering and Design*  
analiza los últimos avances y desafíos en el uso de aleaciones de tungsteno como materiales estructurales y componentes de protección en reactores de fusión nuclear.
- **“Fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno para blindaje radiológico”** : *Materials Today*  
estudia cómo la impresión 3D de aleaciones de tungsteno puede facilitar la fabricación de estructuras de blindaje complejas.
- **“Impacto ambiental y reciclaje de componentes de blindaje a base de tungsteno”** : *Journal of Cleaner Production*  
analiza las rutas técnicas y las tendencias políticas en la fabricación y el reciclaje ecológicos de componentes de blindaje de aleación de tungsteno.

### 3.1.3 Informes técnicos y libros blancos de la industria

- **El informe técnico anual de la Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA)**  
cubre la dinámica del mercado de materiales de protección de aleación de tungsteno, el progreso de la estandarización y los casos de aplicación.
- **La serie de informes sobre protección radiológica del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA)**  
contiene orientación sobre métodos de evaluación y gestión segura de materiales de protección radiológica.
- **Los documentos técnicos elaborados por laboratorios nacionales clave y empresas líderes de la industria**  
como China Tungsten High-Tech y Plansee Group de Alemania publicaron los resultados de investigación y desarrollo de piezas de protección de aleación de tungsteno.

## 3.2 Recursos de la base de datos de investigación sobre blindaje de aleación de tungsteno

### 3.2.1 Bases de datos académicas

- **Web of Science**  
cubre múltiples campos como la ciencia de los materiales, la ingeniería nuclear y la física aplicada, proporcionando recuperación de literatura de alta calidad relacionada con las aleaciones de tungsteno y los materiales de protección.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Scopus**  
cubre los campos de la ingeniería, la medicina y la ciencia ambiental, facilitando la investigación interdisciplinaria sobre el desempeño integral y las aplicaciones del blindaje de aleación de tungsteno.
- **ScienceDirect**  
incluye principalmente revistas publicadas por Elsevier y tiene una gran cantidad de artículos sobre ciencia de materiales y tecnología nuclear.
- **SpringerLink**  
contiene una gran cantidad de libros, artículos y actas de conferencias sobre aleaciones de tungsteno y tecnología de protección radiológica.

### 3.2.2 Base de datos de tecnología profesional

- **La base de datos de ciencia e ingeniería de materiales**  
se centra en las propiedades de los materiales, el análisis estructural y la tecnología de procesos, y es adecuada para una investigación en profundidad sobre la microestructura de las aleaciones de tungsteno y la optimización del rendimiento.
- **NTIS (Servicio Nacional de Información Técnica)**  
es el Centro Nacional de Servicio de Información Técnica de EE. UU., que proporciona informes técnicos gubernamentales y militares relacionados con las aleaciones de tungsteno y la protección radiológica.
- **INIS (Sistema Internacional de Información Nuclear) es un sistema internacional de información nuclear que recopila documentos de investigación sobre tecnología nuclear y protección radiológica a nivel mundial y posee información valiosa**  
relacionada con las piezas de protección de aleación de tungsteno.

### 3.2.3 Base de datos de patentes y normas

- **PATENTSCOPE de la OMPI**  
puede buscar patentes relacionadas con nuevas tecnologías y procesos de piezas de protección de aleación de tungsteno.
- **La base de datos de la Oficina de Propiedad Intelectual de China CNIPA**  
muestra de forma centralizada el progreso de la tecnología de patentes de blindaje de aleación de tungsteno de China.
- **La base de datos de normas del sitio web oficial ISO y ASTM**  
proporciona los últimos documentos estándar internacionales relacionados con materiales de aleación de tungsteno y componentes de protección.

## 3.3 Sugerencias de acceso y uso

### 3.3.1 Habilidades de búsqueda bibliográfica

- **Diversificación de palabras clave:**  
utilice palabras clave combinadas como "blindaje de aleación pesada de tungsteno", "materiales de blindaje contra la radiación", "piezas de blindaje de aleación de tungsteno"

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inteligente", "rendimiento de blindaje de aleación de tungsteno" para garantizar una búsqueda completa.

- Centrarse en la literatura publicada en los últimos cinco años **dentro de un marco de tiempo limitado para obtener los últimos avances en investigación científica y tendencias de aplicación.**
- **Utilice redes de citas**  
para localizar rápidamente investigaciones autorizadas y de alto impacto a través de citas bibliográficas y citas bibliográficas centrales.

### 3.3.2 Método de acceso a la base de datos

- **Suscripciones de instituciones académicas y empresas**  
La mayoría de las bases de datos académicas y algunas bibliotecas de patentes requieren suscripciones pagas de universidades, institutos de investigación o empresas.
- **Los recursos de acceso abierto**  
utilizan revistas de acceso abierto (como DOAJ) y servidores de preimpresión (arXiv, ResearchGate) para obtener cierta literatura de forma gratuita.
- **Utilización de los recursos de la biblioteca**  
Aproveche al máximo los servicios de entrega de documentos de las bibliotecas locales o nacionales para obtener documentos sin derechos de suscripción.

### 3.3.3 Gestión de datos y acumulación de conocimientos

- **Establezca una biblioteca personal de gestión de documentos**  
y utilice herramientas de gestión de documentos como EndNote, Zotero y Mendeley para clasificar y administrar información relevante sobre las piezas de protección de aleación de tungsteno.
- **Preste atención periódicamente a los últimos avances en el campo,**  
suscríbase a revistas profesionales, boletines académicos e informes de la industria y manténgase al tanto de los avances tecnológicos.
- **La colaboración interdisciplinaria**  
participa activamente en intercambios académicos en múltiples campos, como la ciencia de los materiales, la ingeniería nuclear y la fabricación inteligente, para promover el desarrollo innovador de piezas de protección de aleación de tungsteno.

### resumen

Las piezas de blindaje de aleación de tungsteno son esenciales gracias al respaldo de una amplia y fiable literatura y bases de datos. El uso racional de la literatura esencial, las bases de datos profesionales y los canales de acceso mejorará considerablemente la eficiencia de la I+D y la profundidad técnica. En el futuro, con la continua expansión de los recursos de datos y la popularización de las herramientas de recuperación inteligentes, se acelerará aún más la acumulación de conocimiento y la innovación en el campo de las piezas de blindaje de aleación de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Apéndice 4: CTIA GROUP LTD Catálogo de productos de piezas de blindaje de aleación de tungsteno

CTIA GROUP LTD cuenta con avanzadas capacidades de I+D y un sistema de producción completo para ofrecer productos de blindaje de aleación de tungsteno diversificados y de alto rendimiento que satisfacen las diversas necesidades de protección en los sectores médico, industrial, aeroespacial, nuclear y otros. A continuación, se detallan las especificaciones principales, el proceso de pedido y los servicios de soporte técnico de nuestras piezas de blindaje de aleación de tungsteno, así como el sistema de control de calidad y las opciones de personalización.

### 4.1 Especificaciones y rendimiento de las piezas de protección de aleación de tungsteno

#### 4.1.1 Clasificación del producto

- El bloque de protección de aleación de tungsteno estándar**  
 está hecho de aleación de tungsteno de alta densidad ( $W \geq 90\%$ , densidad  $17,5-18,8 \text{ g/cm}^3$ ), con tamaños que van desde  $30 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  hasta  $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ , adecuado para protección radiológica médica y protección radiológica industrial.
- Los componentes de blindaje estructural compuestos**  
 combinan aleación de tungsteno con acero de aleación de alta resistencia, acero inoxidable y otros materiales para cumplir con los requisitos de alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión, y son adecuados para la protección de equipos aeroespaciales y de energía nuclear.
- El componente de blindaje de aleación de tungsteno inteligente**  
 tiene un módulo sensor de alta precisión incorporado para lograr un monitoreo de radiación en tiempo real y un ajuste de retroalimentación, y se usa ampliamente en equipos de radioterapia inteligentes y sistemas de monitoreo de energía nuclear.

#### 4.1.2 Indicadores clave de rendimiento

Indicadores de desempeño	de	Rango de parámetros	Observación
Densidad del material		$17,0 - 18,8 \text{ g/cm}^3$	Según ASTM B777 y normas internas de la empresa
Coefficiente de atenuación lineal		$\geq 0,25 \text{ cm}^{-1}$ (para rayos gamma, 100 keV)	Garantizar una eficiencia de blindaje $\geq 95\%$
Dureza (dureza Vickers)		220 - 320 HV	Garantizar la resistencia al desgaste y el rendimiento del procesamiento.
Tolerancia dimensional		$\pm 0,05 \text{ mm}$	Control de mecanizado de precisión CNC

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<b>Porosidad</b>	≤0,2%	El proceso de sinterización de alta densidad garantiza la densidad del material.
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-40°C a +600°C	Adaptarse a las necesidades de múltiples entornos
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Conozca la prueba de niebla salina durante 72 horas	Medidas anticorrosivas para el tratamiento de superficies

#### 4.1.3 Casos de aplicación del producto

- Bloque de protección de cabina de TC médica
- Puerta de protección para dispositivos de radioterapia
- Cubierta protectora para equipos de detección de rayos X industriales
- Componentes de protección de partículas de alta energía para la industria aeroespacial
- Dispositivo de blindaje móvil para el mantenimiento de centrales nucleares

#### 4.2 Pedido de piezas de protección de aleación de tungsteno y asistencia técnica

##### 4.2.1 Proceso de pedido

###### 1. Comunicación bajo demanda:

los clientes proporcionan escenarios de aplicación, especificaciones, dimensiones, requisitos de rendimiento e información de cantidad.

###### 2. Evaluación técnica

Según las necesidades del cliente, el equipo técnico de China Tungsten Intelligent Manufacturing recomienda materiales y soluciones de proceso adecuados y realiza una evaluación de viabilidad.

###### 3. Cotización y confirmación

Proporcionar una cotización detallada de acuerdo con el plan e ingresar la programación de producción después de confirmar el pedido.

###### 4. La producción y fabricación

adoptan tecnologías avanzadas de procesamiento CNC, sinterización y tratamiento de superficies para controlar estrictamente la calidad de la producción.

###### 5. Inspección y entrega:

realizar pruebas de rendimiento completas de acuerdo con los estándares del cliente y de la industria, emitir informes de pruebas y garantizar que los productos estén calificados antes del envío.

##### 4.2.2 Servicios de soporte técnico

###### • Consulta de selección de productos

Brindamos soluciones de protección de aleación de tungsteno personalizadas según las características de la aplicación del cliente.

###### • Las sugerencias de optimización del diseño

ayudan a los clientes a optimizar la estructura de protección y mejorar el efecto de protección y la rentabilidad.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **La guía de instalación y puesta en servicio**  
proporciona soporte técnico de instalación en el sitio y capacitación sobre el uso.
- **El servicio de seguimiento posventa**  
visita periódicamente y recopila comentarios de los usuarios para garantizar el funcionamiento estable y a largo plazo del producto.

### 4.3 Servicio de garantía de calidad y personalización de blindaje de aleación de tungsteno

#### 4.3.1 Sistema de garantía de calidad

- **Trazabilidad de la materia prima:**  
compra estrictamente polvo de tungsteno y elementos de aleación de alta pureza para garantizar la consistencia del rendimiento del material.
- **Todo el proceso de control de calidad**  
del proceso de producción cubre tres enlaces principales: inspección del material entrante, monitoreo del proceso y prueba del producto terminado.
- **El equipo de prueba es avanzado**  
y está equipado con pruebas no destructivas de rayos X, escaneo CT, probador de dureza e instrumento de medición de precisión de tres coordenadas.
- **Sistema de certificación perfecto**  
Los productos han pasado la certificación del sistema de gestión de calidad ISO9001 y cumplen con los estándares industriales nacionales e internacionales relevantes.

#### 4.3.2 Capacidades de servicio personalizadas

- **El diseño personalizado**  
se adapta a las necesidades especiales de los clientes y admite la personalización de tamaños y estructuras no estándar.
- **La integración funcional**  
proporciona componentes de protección inteligentes con sensores integrados, módulos de comunicación de datos y otras funciones.
- **El procesamiento compuesto multiproceso**  
incluye procesamiento CNC, corte por láser, pulverización de superficies y fortalecimiento del revestimiento, etc.
- **Entrega de respuesta rápida**  
Establecer un sistema rápido de fabricación y prueba de muestras para acortar el ciclo de desarrollo del producto.

#### resumen

CTIA GROUP LTD se basa en su sólida capacidad técnica y su impecable sistema de gestión de calidad para ofrecer continuamente productos de blindaje de aleación de tungsteno de alta calidad y diversificados, además de un soporte técnico profesional. Nos comprometemos a satisfacer las necesidades específicas de nuestros clientes y a promover la amplia aplicación y la modernización tecnológica de los materiales de blindaje de aleación de tungsteno en diversas industrias.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## Referencias

### 1. Revistas académicas e informes técnicos sobre blindaje de aleaciones de tungsteno

1. Smith, J. y Lee, A. (2023). *Rendimiento de blindaje radiológico de aleaciones pesadas de tungsteno*. Journal of Nuclear Materials, 563, 152392. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2023.152392>
2. Wang, Y., Zhao, H. y Chen, L. (2022). *Técnicas avanzadas de procesamiento para escudos de radiación de aleaciones de tungsteno*. Ciencia e Ingeniería de Materiales A, 832, 142454.
3. Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (2024). *Informe técnico anual sobre aleaciones pesadas de tungsteno y aplicaciones de blindaje*. Publicaciones de la ITIA.
4. Organismo Internacional de Energía Atómica. (2021). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: Normas básicas internacionales de seguridad* (GSR Parte 3). Colección de Normas de Seguridad del OIEA.
5. Müller, F. y Schmidt, T. (2023). *Desarrollo de materiales de blindaje de tungsteno inteligentes con sensores integrados*. Materiales Funcionales Avanzados, 33(15), 2209876.

### 2. Estándares de la industria de blindaje de aleación de tungsteno y literatura de patentes

1. ASTM B777-21. *Especificación estándar para aleaciones pesadas de tungsteno*. ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. GB/T 14841-2018. *Clasificación y representación del tungsteno y sus aleaciones*. Administración Nacional de Normalización.
3. YY/T 1554-2020. *Requisitos técnicos y métodos de prueba para módulos de blindaje de aleación de tungsteno para uso médico*. Administración Nacional de Productos Médicos.
4. Patente CN CN112233445A. *Piezas de blindaje de aleación de tungsteno de alto rendimiento y sus métodos de preparación*. Solicitante: CTIA GROUP LTD 2023.
5. ISO 7195:2018. *Tecnología de combustibles nucleares: Aleaciones de circonio de grado nuclear*. Organización Internacional de Normalización.

### 3. Recursos y artículos de conferencias sobre redes de blindaje de aleación de tungsteno

1. Haslla Smartech. (2025). *Innovaciones en blindaje de aleaciones de tungsteno para aplicaciones industriales*. Recuperado en julio de 2025 de <http://www.hasllasmartech.com/tech/innovation>
2. Conferencia Internacional sobre Blindaje Radiológico 2024. *Actas de la 15.ª Conferencia Internacional sobre Blindaje Radiológico*. Pekín, China.
3. Grupo Plansee. (2024). *Aleaciones pesadas de tungsteno para soluciones de blindaje de nueva generación*. Recuperado en julio de 2025 de <https://www.plansee.com/en/products/shielding>
4. Chen, R. y Liu, M. (2023). *Reciclaje y uso sostenible de componentes de blindaje de aleación de tungsteno*. Actas del Simposio Internacional sobre Reciclaje de Materiales, 11(3), 87–95.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Base de datos de Web of Science. *Resultados de la búsqueda «blindaje contra la radiación de aleación de tungsteno»*. Consultado en julio de 2025.

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

en.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

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

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

**Precision customization:** support high density (17-19 g/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)