

Enciclopedia del boruro de tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

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

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

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabla de contenido

Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Descripción general del boruro de tungsteno
- 1.2 Antecedentes de la investigación e importancia del boruro de tungsteno
- 1.3 Desarrollo histórico del boruro de tungsteno
- 1.4 Estructura e instrucciones del libro de boruro de tungsteno

Capítulo 2 Propiedades químicas y físicas del boruro de tungsteno

- 2.1 Composición química del boruro de tungsteno (WB, WB₂, W₂B, etc.)
- 2.2 Estructura cristalina y características de enlace del boruro de tungsteno
- 2.3 Termodinámica y estabilidad del boruro de tungsteno
- 2.4 Propiedades eléctricas y magnéticas del boruro de tungsteno
- 2.5 Propiedades mecánicas del boruro de tungsteno (dureza, tenacidad)

Capítulo 3 Estudio teórico sobre el boruro de tungsteno

- 3.1 Análisis de la teoría funcional de la densidad (DFT) del boruro de tungsteno
- 3.2 Estructura electrónica y teoría de bandas del boruro de tungsteno
- 3.3 Propiedades superficiales y de interfaz del boruro de tungsteno
- 3.4 Defectos y efectos dopantes del boruro de tungsteno
- 3.5 Aplicaciones de la simulación computacional del boruro de tungsteno

Capítulo 4 Materias primas y recursos del boruro de tungsteno

- 4.1 Recursos minerales de tungsteno y boro de materias primas de boruro de tungsteno
- 4.2 Tecnología de purificación de la materia prima de boruro de tungsteno
- 4.3 Cadena de suministro global de boruro de tungsteno e impacto geopolítico
- 4.4 Sostenibilidad de los recursos de boruro de tungsteno y sustitutos

Capítulo 5 Tecnología de preparación de boruro de tungsteno

- 5.1 Síntesis de boruro de tungsteno en fase sólida a alta temperatura
- 5.2 Deposición química en fase de vapor (CVD) de boruro de tungsteno
- 5.3 Síntesis de boruro de tungsteno asistida por plasma
- 5.4 Aleación mecánica y molienda de bolas de boruro de tungsteno
- 5.5 Preparación de nanomateriales de boruro de tungsteno
- 5.6 Optimización del proceso y ampliación de escala del boruro de tungsteno

Capítulo 6 Control de calidad e inspección del boruro de tungsteno

- 6.1 Análisis de la composición química del boruro de tungsteno (ICP-MS, XRF)
- 6.2 Detección de la estructura cristalina del boruro de tungsteno (XRD, TEM)
- 6.3 Morfología de la superficie y análisis del tamaño de partícula del boruro de tungsteno (SEM, AFM)
- 6.4 Prueba de rendimiento del boruro de tungsteno (dureza, conductividad)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Estándar de calidad del boruro de tungsteno (ISO, GB/T)

Capítulo 7 Aplicación del boruro de tungsteno en recubrimientos duros

- 7.1 Ventajas de rendimiento del recubrimiento de boruro de tungsteno
- 7.2 Aplicación del recubrimiento de boruro de tungsteno en herramientas de corte
- 7.3 Aplicación del recubrimiento de boruro de tungsteno en moldes
- 7.4 Preparación y optimización del recubrimiento de boruro de tungsteno
- 7.5 Rendimiento del recubrimiento de boruro de tungsteno en entornos de desgaste y corrosión
- 7.6 Mercado y tendencias futuras del recubrimiento de boruro de tungsteno

Capítulo 8 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales de alta temperatura

- 8.1 Piezas aeroespaciales de alta temperatura de boruro de tungsteno
- 8.2 Aplicación de boruro de tungsteno en hornos de alta temperatura y barreras térmicas
- 8.3 Conductividad térmica y propiedades de expansión térmica del boruro de tungsteno
- 8.4 Resistencia a la oxidación y corrosión del boruro de tungsteno en entornos de alta temperatura
- 8.5 Tecnología de preparación de materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura
- 8.6 Perspectivas de aplicación y desafíos de los materiales de alta temperatura de boruro de tungsteno

Capítulo 9 Aplicación del boruro de tungsteno en dispositivos electrónicos

- 9.1 Aplicación del boruro de tungsteno en películas conductoras
- 9.2 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales de electrodos
- 9.3 Aplicación del boruro de tungsteno en sensores
- 9.4 Potencial del boruro de tungsteno en dispositivos semiconductores
- 9.5 Tecnología de preparación de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno
- 9.6 Tendencias del mercado y desarrollo de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno

Capítulo 10 Catálisis y aplicaciones químicas del boruro de tungsteno

- 10.1 Aplicación del boruro de tungsteno en la electrocatálisis
- 10.2 Aplicación del boruro de tungsteno en la fotocatálisis
- 10.3 Aplicación del boruro de tungsteno en la catálisis de reacciones químicas
- 10.4 Química de superficies y sitios activos de catalizadores de boruro de tungsteno
- 10.5 Preparación y optimización del catalizador de boruro de tungsteno
- 10.6 Perspectivas industriales y desafíos de la aplicación catalítica del boruro de tungsteno

Capítulo 11 Aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno

- 11.1 Aplicación de boruro de tungsteno en recubrimientos biomédicos
- 11.2 Aplicación de nanopartículas de boruro de tungsteno en la administración de fármacos
- 11.3 Aplicación del boruro de tungsteno en biosensores
- 11.4 Biocompatibilidad y seguridad del boruro de tungsteno
- 11.5 Tecnología de preparación de materiales biomédicos de boruro de tungsteno
- 11.6 Perspectivas y desafíos de las aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 12 Aplicación energética del boruro de tungsteno

- 12.1 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales de batería
- 12.2 Aplicación del boruro de tungsteno en pilas de combustible
- 12.3 Aplicación del boruro de tungsteno en células solares
- 12.4 Potencial del boruro de tungsteno en materiales de almacenamiento de hidrógeno
- 12.5 Tecnología de preparación de materiales energéticos de boruro de tungsteno
- 12.6 Tendencias de mercado y desarrollo de las aplicaciones energéticas del boruro de tungsteno

Capítulo 13 Aplicaciones mecánicas y estructurales del boruro de tungsteno

- 13.1 Aplicación de boruro de tungsteno en recubrimientos resistentes al desgaste
- 13.2 Aplicación del boruro de tungsteno en herramientas de corte
- 13.3 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales compuestos estructurales
- 13.4 Propiedades mecánicas y microestructura del boruro de tungsteno
- 13.5 Tecnología de preparación de materiales mecánicos de boruro de tungsteno
- 13.6 Tendencias de mercado y desarrollo de las aplicaciones mecánicas del boruro de tungsteno

Capítulo 14 Industrialización y análisis del mercado del boruro de tungsteno

- 14.1 Panorama del mercado mundial del boruro de tungsteno
- 14.2 Análisis de costos y precios de producción del boruro de tungsteno
- 14.3 Tecnología de industrialización y producción a gran escala de boruro de tungsteno
- 14.4 Distribución del mercado de boruro de tungsteno en las principales industrias
- 14.5 Análisis de la competencia y de los sustitutos del mercado de boruro de tungsteno
- 14.6 Tendencias futuras e impactos políticos de la industrialización del boruro de tungsteno

Capítulo 15 Normas y requisitos reglamentarios para el boruro de tungsteno

- 15.1 Descripción general de las normas internacionales relacionadas con el boruro de tungsteno
- 15.2 Normas ambientales y de seguridad para el boruro de tungsteno
- 15.3 Requisitos reglamentarios para el boruro de tungsteno en el campo biomédico
- 15.4 Proceso de prueba y certificación del boruro de tungsteno
- 15.5 Análisis de las diferencias regionales en la estandarización del boruro de tungsteno
- 15.6 Desafíos y desarrollo futuro del cumplimiento normativo del boruro de tungsteno

Capítulo 16 Protección ambiental y desarrollo sostenible del boruro de tungsteno

- 16.1 Evaluación del impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno
- 16.2 Tecnología de fabricación ecológica de boruro de tungsteno
- 16.3 Tratamiento y reciclaje de residuos de boruro de tungsteno
- 16.4 Contribución del boruro de tungsteno a la energía sostenible
- 16.5 Huella de carbono y estrategias de reducción de emisiones de boruro de tungsteno
- 16.6 Factores de política y mercado para el desarrollo sostenible del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 17 Aplicación de tecnología inteligente y digital del boruro de tungsteno

- 17.1 Optimización de la inteligencia artificial en la producción de boruro de tungsteno
- 17.2 Aplicación del boruro de tungsteno en sensores inteligentes
- 17.3 Tecnología de control de calidad digital del boruro de tungsteno
- 17.4 Potencial del boruro de tungsteno en la trazabilidad de la cadena de bloques
- 17.5 Estudio de caso de fabricación inteligente de boruro de tungsteno
- 17.6 Tendencias futuras de la inteligenteización y digitalización del boruro de tungsteno

Capítulo 18 Futuras direcciones de investigación y perspectivas tecnológicas del boruro de tungsteno

- 18.1 Exploración de un nuevo método de síntesis para boruro de tungsteno
- 18.2 Potencial del boruro de tungsteno en dispositivos electrónicos de próxima generación
- 18.3 Direcciones innovadoras de la catálisis del boruro de tungsteno y la tecnología energética
- 18.4 Aplicaciones innovadoras del boruro de tungsteno en el campo biomédico
- 18.5 La frontera de la fabricación inteligente y ecológica de boruro de tungsteno
- 18.6 Cooperación global y desafíos técnicos en la investigación del boruro de tungsteno

Un apéndice

Apéndice 1: Términos y abreviaturas del boruro de tungsteno

- 1.1 Términos relacionados con el boruro de tungsteno
- 1.2 Abreviaturas del boruro de tungsteno

Apéndice 2: Referencias de boruro de tungsteno

- 2.1 Literatura académica sobre el boruro de tungsteno
- 2.2 Literatura de patentes sobre boruro de tungsteno
- 2.3 Normas y regulaciones sobre el boruro de tungsteno

Apéndice 3: Hoja de datos del boruro de tungsteno

- 3.1 Propiedades físicas del boruro de tungsteno
- 3.2 Parámetros del proceso de producción de boruro de tungsteno
- 3.3 Índice de rendimiento de la aplicación del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 1 Introducción al boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) es un tipo de boruro de metal de transición de alto rendimiento. Debido a su excelente dureza (>30 GPa), estabilidad a altas temperaturas (>2000 °C) y excelente inercia química, ha demostrado un amplio potencial de aplicación en recubrimientos duros, materiales de alta temperatura, dispositivos electrónicos y nuevos campos de energía (Capítulo 7.1, Capítulo 9.1). Este capítulo proporciona a los lectores una perspectiva introductoria integral al elaborar la descripción general, los antecedentes y la importancia de la investigación, el desarrollo histórico y la estructura del boruro de tungsteno, sentando las bases para una discusión en profundidad en los capítulos posteriores (Capítulos 2 a 17). El contenido de este capítulo combina la acumulación técnica de CTIA GROUP LTD en la producción y aplicación de boruro de tungsteno, con el objetivo de proporcionar una referencia para la investigación académica, el desarrollo industrial y la formulación de políticas.

1.1 Descripción general del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno es una clase de compuestos formados por tungsteno (W) y boro (B). Las formas comunes incluyen monoboruro (WB), diboruro (WB₂) y pentaboruro (W₂B). Su composición química y estructura cristalina le confieren propiedades físicas y químicas únicas (Capítulo 2, 2.1). La dureza de Mohs del boruro de tungsteno puede alcanzar 9,5, cercana al diamante (10), y la dureza Vickers (HV) está en el rango de 30–40 GPa, superando ampliamente a los carburos cementados tradicionales (como el WC, ~20 GPa). Su punto de fusión es de hasta 2600–2800 °C, y su conductividad térmica es de aproximadamente 20–50 W/(m·K), lo que le confiere un buen rendimiento en entornos de alta temperatura (como los componentes aeroespaciales, Capítulo 8, 8.1). Además, la conductividad eléctrica (~10⁴ S/cm) y la estabilidad química (resistencia a la corrosión ácida y alcalina, pH 2-12) del boruro de tungsteno respaldan su aplicación en materiales de electrodos y soportes de catalizadores (Capítulo 9, 9.2, Capítulo 10, 10.1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La estructura cristalina del boruro de tungsteno es diversa. WB es usualmente ortorrómbico (grupo espacial $Cmcm$), WB_2 es hexagonal ($P6_3/mmc$) y W_2B es tetragonal ($I4/mcm$). Estas estructuras determinan sus propiedades mecánicas y eléctricas anisotrópicas (Capítulo 2.2). Por ejemplo, el módulo de compresión de WB_2 a lo largo del eje c puede alcanzar 600 GPa, lo cual es adecuado para recubrimientos resistentes al desgaste (Capítulo 7.2). La síntesis de boruro de tungsteno se logra principalmente a través de reacción en fase sólida a alta temperatura ($>1500\text{ }^\circ\text{C}$), deposición química en fase de vapor (CVD) o aleación mecánica (Capítulos 5.1–5.4). CTIA GROUP LTD utiliza tecnología asistida por plasma (Capítulo 5.3) para lograr una producción eficiente de polvo WB_2 a escala nanométrica (tamaño de partícula $<50\text{ nm}$), con una pureza de $>99,9\%$ y una capacidad de producción anual de 500 toneladas.

Las áreas de aplicación del boruro de tungsteno cubren industrias tradicionales (como recubrimientos de herramientas, Capítulo 7, 7.1) y tecnologías de vanguardia (como nanosensores, Capítulo 10, 10.3). En 2024, se espera que el mercado mundial de boruro de tungsteno tenga un valor de aproximadamente \$200 millones y que alcance los \$500 millones en 2030, con una CAGR del 15% (Capítulo 14, 14.5). Los productos de boruro de tungsteno de CTIA GROUP LTD se utilizan ampliamente en recubrimientos duros y materiales de alta temperatura para satisfacer las necesidades de las industrias aeroespacial y energética (Capítulo 8, 8.1, Capítulo 9, 9.4). Sin embargo, la toxicidad del boruro de tungsteno (la inhalación de polvo puede causar fibrosis pulmonar, Capítulo 13, 13.1) y los altos costos de producción ($\sim\$200/\text{kg}$, Capítulo 14, 14.2) aún necesitan más investigación y optimización.

1.2 Antecedentes de la investigación e importancia del boruro de tungsteno

La investigación sobre el boruro de tungsteno surge de la demanda de materiales de alto rendimiento, especialmente para aplicaciones en entornos extremos (como altas temperaturas, altas presiones y corrosión intensa). A principios del siglo XX, los carburos cementados (como el WC) dominaban el mercado de materiales resistentes al desgaste, pero su rendimiento a altas temperaturas era limitado ($<1000\text{ }^\circ\text{C}$), lo que impulsó la exploración de boruros de metales de transición (Capítulo 8, 8.4). El boruro de tungsteno se ha convertido en un candidato ideal para reemplazar las cerámicas tradicionales (como el Al_2O_3 , SiC) y aleaciones metálicas (como las aleaciones a base de Ni) debido a su alta dureza, estabilidad térmica e inercia química.

1.2.1 Antecedentes de investigación académica

La investigación teórica sobre el boruro de tungsteno se centra en su estructura electrónica y propiedades mecánicas (Capítulo 3, 3.1–3.2). Los cálculos de la teoría funcional de la densidad (DFT) muestran que los fuertes enlaces covalentes WB y la red BB de WB_2 hacen que su dureza sea cercana a la de los materiales superduros (como c-BN). En 2024, se publicaron alrededor de 500 artículos de SCI relacionados con el boruro de tungsteno en todo el mundo, centrándose en los efectos del dopaje (como Ti, Zr) en la dureza y la resistencia a la oxidación (Capítulo 3, 3.4). El laboratorio apoyado por CTIA GROUP LTD optimizó la tenacidad a la fractura de los nanorrecubrimientos de WB ($\sim 5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, Capítulo 11, 11.1) a través de simulaciones de dinámica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

molecular (MD), proporcionando una base teórica para aplicaciones industriales.

1.2.2 Importancia de la aplicación industrial

La importancia del boruro de tungsteno en la industria se refleja en:

- **Recubrimientos resistentes al desgaste** : los recubrimientos WB_2 (espesor 2–5 μm) tienen un coeficiente de fricción $<0,3$ en las herramientas de corte y prolongan la vida útil de la herramienta en un 50 % (Capítulo 7.1) .
- **Materiales de alta temperatura** : El WB tiene una resistencia a la oxidación de <1 $mg/cm^2 \cdot h$ a 2000 °C, adecuado para álabes de turbinas (Capítulo 8.1).
- **Campo energético** : El WB_2 se utiliza como electrodo negativo de las baterías de litio, con una capacidad de aproximadamente 200 mAh /g y una estabilidad de ciclo de más de 1000 veces (Capítulo 9.2). La tecnología de recubrimiento de boruro de tungsteno de CTIA GROUP LTD se ha aplicado a componentes aeroespaciales, con una producción anual superior a los 100 millones de yuanes (Capítulo 14.3).

1.2.3 Importancia social y ambiental

El desarrollo del boruro de tungsteno promueve la utilización eficiente de los recursos y la fabricación ecológica (Capítulo 16.4). Su alta durabilidad reduce la frecuencia de reemplazo de material y las emisiones de carbono ($\sim 0,5$ toneladas de CO_2 /tonelada de recubrimiento, Capítulo 16.2). CTIA GROUP LTD adopta un modelo de economía circular para reciclar el polvo de boruro de tungsteno residual (tasa de reciclaje $>30\%$) y reducir la minería de tungsteno (Capítulo 16.3). Sin embargo, los posibles riesgos para la salud del polvo de boruro de tungsteno (Capítulo 13.1) requieren estrictas normas de seguridad, como la MSDS de CTIA GROUP LTD (Capítulo 13.6), para garantizar que el límite de exposición ocupacional (LEO) sea $<0,1$ mg/m^3 .

1.3 Desarrollo histórico del boruro de tungsteno

La investigación y aplicación del boruro de tungsteno ha evolucionado desde la exploración básica hasta la industrialización. A continuación, se presentan los hitos clave (véase la Tabla 1.3):

- **1900–1950: Descubrimiento temprano**
En 1910, el boruro de tungsteno se sintetizó por primera vez en el laboratorio al hacer reaccionar polvo de tungsteno con boro en un horno de arco eléctrico (>2000 °C), lo que confirmó la existencia de WB y W_2B . En la década de 1930, la difracción de rayos X (DRX) reveló su estructura cristalina (Capítulo 2.2), sentando las bases teóricas.
- **1950–1980: Exploración industrial.**
En 1955, se probó el boruro de tungsteno para recubrimientos resistentes al desgaste, pero se vio limitado por la tecnología de síntesis (rendimiento $<50\%$) y el alto costo ($\sim \$500/kg$). En 1970, la síntesis en fase sólida a alta temperatura (Capítulo 5.1) logró la producción en masa de WB_2 , y las pruebas de dureza ($HV \sim 35$ GPa) demostraron su superioridad sobre el WC.
- **1980–2000: Avances tecnológicos.**
En 1985, se utilizó la deposición química en fase de vapor (CVD, Capítulo 5, 5.2) para preparar recubrimientos de WB con un espesor de 1 a 10 μm y un coeficiente de fricción

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 0,4. En 1995, se sintetizó nanoboruro de tungsteno (tamaño de partícula <100 nm) mediante aleación mecánica (Capítulo 5, 5.4), lo que abrió las puertas a la aplicación de la nanotecnología (Capítulo 10, 10.1).

- **2000–2020: Aplicaciones Diversificadas.**

En 2005, el WB₂ se utilizó en electrodos de baterías de litio (Capítulo 9.2), con una capacidad de 180 mAh /g. En 2015, CTIA GROUP LTD desarrolló la síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3) para producir nano WB₂ (pureza >99,8%), con un costo reducido a \$200/kg. En 2020, los sensores de boruro de tungsteno (Capítulo 10.3) lograron la detección de NO₂ (<1 ppm).

- **2020-2025: Inteligencia artificial y sostenibilidad.**

En 2024, CTIA GROUP LTD implementará IA para optimizar la producción de boruro de tungsteno (Capítulo 17, 17.5), aumentar el rendimiento en un 20 % y reducir el consumo de energía en un 15 % (<500 kWh/ton). En 2025, su MSDS de boruro de tungsteno (Capítulo 13, 13.6) se actualizará para cumplir con las normas REACH y GB/T (Capítulo 15, 15.2), lo que impulsará las exportaciones globales.

Tabla 1.3 Hitos de la historia del boruro de tungsteno

años	hito	Tecnologías/logros clave	Capítulos relacionados
1910	Primera síntesis	de WB, W ₂ B	2.1, 5.1
1955	Ensayos industriales	Recubrimiento resistente al desgaste, dureza ~30 GPa	7.1
1985	Tecnología CVD	Recubrimiento WB, coeficiente de fricción 0,4	5.2, 7.3
1995	Nanosíntesis	Aleación mecánica, tamaño de partícula <100 nm	5.4, 10.1
2005	Aplicación de la batería	Electrodo WB ₂ , capacidad 180 mAh /g	9.2
2015	Nano WB ₂	CTIA GROUP LTD Síntesis de plasma, costo \$200/kg	5.3, 14.2
2020	Desarrollo de sensores	Detección de NO ₂ <1 ppm	10.3
2024	Optimización de IA	Rendimiento +20%, consumo energético -15%	17.5

1.4 Estructura e instrucciones del libro sobre boruro de tungsteno

Enciclopedia del Boruro de Tungsteno tiene 17 capítulos, 4 apéndices y un índice, que introducen sistemáticamente el conocimiento científico, de ingeniería e industrialización del boruro de tungsteno:

- **Capítulos 1 a 6: Ciencia y Tecnología Básica.**

Aborda las propiedades del boruro de tungsteno (Capítulo 2), la investigación teórica (Capítulo 3), las materias primas (Capítulo 4), la preparación (Capítulo 5) y el control de calidad (Capítulo 6), proporcionando una base para comprender su estructura y síntesis.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, el Capítulo 2, 2.3, detalla la estabilidad termodinámica, y el Capítulo 5, 5.5, introduce la preparación de nano WB₂.

- **Capítulos 7 a 10: Las aplicaciones**

se centran en el boruro de tungsteno en recubrimientos duros (Capítulo 7), materiales de alta temperatura (Capítulo 8), energía electrónica (Capítulo 9) y aplicaciones emergentes (Capítulo 10). Por ejemplo, el Capítulo 9, 9.4, analiza las propiedades termoeléctricas, y el Capítulo 10, 10.3, explora la tecnología de sensores.

- **Capítulos 11 a 13: Investigación y seguridad,**

que incluyen simulación computacional (Capítulo 11), tecnología de detección (Capítulo 12) y toxicidad para la seguridad (Capítulo 13). El Capítulo 13.6 proporciona la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) del boruro de tungsteno producido por China Tungsten Intelligence para guiar su uso seguro.

- **Capítulos 14 a 17:**

Análisis de la industria y el futuro del mercado (Capítulo 14), Regulaciones (Capítulo 15), Impacto ambiental (Capítulo 16) y Avances tecnológicos (Capítulo 17). El Capítulo 17.5 explora el potencial de la IA en la investigación del boruro de tungsteno.

- **Apéndices e índice.**

Los Apéndices 1 a 4 incluyen un glosario (Apéndice 1), referencias (Apéndice 2), tablas de datos (Apéndice 3) y listas de patentes (Apéndice 4). El índice incluye palabras clave, temas y normas para facilitar la búsqueda.

Instrucciones de uso :

- **Lectores académicos** : consulten los capítulos 2, 3, 11 y 12 para obtener datos teóricos y experimentales.
- **Usuarios industriales** : concéntrese en los capítulos 5, 7 a 10 y 14 para comprender la tecnología y el mercado.
- **Responsables de políticas** : consulten los capítulos 13, 15 y 16, centrados en las regulaciones y el medio ambiente.
- **Navegación** : Localice rápidamente el contenido mediante índices y referencias de capítulos (como 7.1, 9.2). La tecnología de boruro de tungsteno de CTIA GROUP LTD se presenta en todo el libro (como en los capítulos 5 y 5.3, 13 y 13.6), ofreciendo a los lectores casos prácticos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 2 Propiedades químicas y físicas del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) es un tipo de boruro de metal de transición. Tiene un valor importante en recubrimientos duros (Capítulo 7.1), materiales de alta temperatura (Capítulo 8.1), dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1) y aplicaciones emergentes (Capítulo 10.1) debido a su alta dureza (>30 GPa), excelente estabilidad térmica (>2000 °C), conductividad eléctrica (~10⁴ S/cm) e inercia química. Este capítulo analiza en detalle la composición química, la estructura cristalina, las propiedades termodinámicas, eléctricas y magnéticas, y las propiedades mecánicas del boruro de tungsteno, sentando las bases para la investigación teórica posterior (Capítulo 3), la tecnología de preparación (Capítulo 5) y el análisis de aplicaciones (Capítulos 7 a 10). CTIA GROUP LTD proporciona soporte de datos clave en la producción y pruebas de rendimiento de nanomateriales de boruro de tungsteno, como la caracterización de las propiedades físicas del nanopolvo WB₂ (tamaño de partícula <50 nm, pureza >99,9%) (Capítulo 5.5), que se desarrolla a través del contenido de este capítulo.

2.1 Composición química del boruro de tungsteno (WB, WB₂, W₂B, etc.)

El boruro de tungsteno es una clase de compuestos compuestos de tungsteno (W) y boro (B), con diversas composiciones químicas, incluyendo el boruro de monotungsteno (WB), el diboruro de ditungsteno (WB₂), el ditungsteno Pentaboruro (W₂B) y otros compuestos no estequiométricos (como W₂B₅). La proporción atómica de boro a tungsteno (B/W) en estos compuestos determina su estructura y propiedades (Capítulo 2.2). La Tabla 2.1 resume la composición química y las propiedades de los principales boruros de tungsteno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **WB (monoboruro de tungsteno)** : B/W = 1, peso molecular 193,65 g/mol, contenido de tungsteno aproximado del 94,8 % en peso y contenido de boro aproximado del 5,2 % en peso . El WB presenta alta dureza y estabilidad química, resistencia a la corrosión ácida (pH 2-10) y es adecuado para recubrimientos resistentes al desgaste (Capítulo 7.2). CTIA GROUP LTD produce polvo de WB mediante síntesis en fase sólida a alta temperatura (Capítulo 5.1), con impurezas (como O y C) <0,1 % en peso .
- **WB₂ (diboruro de tungsteno)** : B/W=2, peso molecular 215,46 g/mol, contenido de tungsteno aproximado del 85,3 % en peso, contenido de boro aproximado del 14,7 % en peso . El WB₂ tiene una dureza de **40 GPa** gracias a los fuertes enlaces covalentes WB y BB, lo que lo hace adecuado para el recubrimiento de herramientas (Capítulo 7.1). CTIA GROUP LTD utiliza síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3) para producir nano WB₂ (tamaño de partícula de 20-50 nm) con una pureza superior al 99,9 %.
- **W₂B (pentaboruro de tungsteno)** : B/W = 0,5, peso molecular: 377,49 g/mol, contenido de tungsteno: aproximadamente 97,4 % en peso, contenido de boro: aproximadamente 2,6 % en peso . El W₂B presenta una alta estabilidad térmica (temperatura de descomposición > 2500 °C) y se utiliza en componentes de alta temperatura (Capítulo 8.1). Su baja conductividad eléctrica (~10³ S/cm) limita sus aplicaciones electrónicas (Capítulo 9.1).
- **Otras formas** : W₂B₅ (B/W=2,5) y WB₄ (B /W= 4) existen en condiciones de síntesis fuera de equilibrio (como la aleación mecánica, Capítulo 5, apartado 5.4), pero se utilizan menos debido a su baja estabilidad (fácil oxidación). Las investigaciones de laboratorio de CTIA GROUP LTD muestran que el WB₄ se oxida a 250 °C en el aire (Capítulo 3, apartado 3.3).

La composición química del boruro de tungsteno se determina con precisión mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS, Capítulo 6, 6.1), y el requisito de pureza típico es >99,5 % (GB/T 26037-2020, Capítulo 15, 15.2). En el polvo de WB₂ producido por China Tungsten Intelligence, las impurezas como Fe y Mo son <50 ppm, lo que garantiza las necesidades de aplicaciones de alto rendimiento.

Tabla 2.1 Composición química principal y características del boruro de tungsteno

Compuesto	Relación blanco y negro	Peso molecular (g/mol)	Contenido de tungsteno (% en peso)	Contenido de boro (% en peso)	Características principales	Capítulos relacionados
WB	1	193.65	94.8	5.2	Dureza ~30 GPa , resistente al ácido.	7.2
WB₂	2	215.46	85.3	14.7	Dureza ~40 GPa , recubrimiento	7.1, 5.3
W₂B	0.5	377.49	97.4	2.6	Estabilidad térmica >2500°C	8.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W ₂ B ₅	2.5	237.27	77.5	22.5	Fácil de oxidar, para investigación.	3.3
-------------------------------	-----	--------	------	------	--------------------------------------	-----

2.2 Estructura cristalina y características de enlace del boruro de tungsteno

Las propiedades del boruro de tungsteno se derivan de su singular estructura cristalina y enlaces químicos (Capítulo 3, 3.2). Su estructura cristalina se caracteriza por difracción de rayos X (DRX, Capítulo 6, 6.2), y sus características de enlace se analizan mediante espectroscopia Raman y espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS, Capítulo 12, 12.1, 12.4).

- **Estructura cristalina del WB** : sistema ortorrómbico, grupo espacial Cmc₂m , parámetros de celda unitaria: a = 3,12 Å, b = 8,40 Å, c = 3,07 Å. Los átomos de tungsteno forman una coordinación hexadecimal, los átomos de boro están incrustados en la estructura estratificada y la longitud de enlace del WB es de aproximadamente 2,3 Å. Los fuertes enlaces covalentes hacen que el módulo de Young del WB alcance los 550 GPa (Capítulo 2.5).
- **Estructura cristalina del WB₂** : sistema hexagonal, grupo espacial P6₃/mmc, parámetros de celda unitaria a = 2,98 Å, c = 13,88 Å. El WB₂ presenta capas W y B alternadas, los átomos de B forman una red hexagonal, longitud de enlace BB de ~1,8 Å, dureza mejorada (~40 GPa) . Tamaño de grano nanométrico del WB₂ de CTIA GROUP LTD <50 nm, defectos en el borde de grano <1 % (Capítulo 6, sección 6.3).
- **Estructura cristalina de W₂B** : sistema tetragonal, grupo espacial I4/mcm, parámetros de celda unitaria a = 5,56 Å, c = 4,74 Å. W₂B tiene más enlaces metálicos WW (~2,7 Å) y un menor contenido de boro, lo que resulta en una menor dureza que WB₂ (~25 GPa) .

Características de unión :

- **Enlace covalente WB** : el orbital 5d de W se hibrida con el orbital 2p de B para formar un enlace σ fuerte con una energía de enlace de ~400 kJ/mol, que imparte alta dureza y estabilidad química (Capítulo 3, 3.1).
- **Enlace covalente BB** : La red BB en WB₂ es similar al grafeno, lo que mejora la resistencia al corte (módulo de corte ~200 GPa) .
- **Enlace metálico WW** : el enlace WW en W₂B aumenta la conductividad (~10³ S/cm) pero disminuye la dureza.

CTIA GROUP LTD calculó la densidad electrónica del WB₂ mediante la teoría del funcional de la densidad (DFT, Capítulo 3, 3.1) y confirmó que la contribución de los enlaces BB a la dureza es >50 %. El recubrimiento de WB que produce (Capítulo 7, 7.3) utiliza una estructura hexagonal de WB₂ con un coeficiente de fricción <0,3.

2.3 Termodinámica y estabilidad del boruro de tungsteno

Las propiedades termodinámicas del boruro de tungsteno determinan su potencial para aplicaciones a alta temperatura (Capítulo 8, 8.1). Los parámetros clave incluyen el punto de fusión, el coeficiente de expansión térmica, el calor específico y la estabilidad a la oxidación, determinados mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC, Capítulo 12, 12.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Punto de fusión y descomposición** : punto de fusión de WB ~2650 ° C, WB₂ ~2800 ° C, W₂B ~2600 ° C. WB₂ es estable a 3000 ° C en vacío, pero comienza a oxidarse a >600 ° C en aire (formando WO₃ y B₂O₃, Capítulo 13, 13.4).
- **Coefficiente de expansión térmica** : el WB₂ es de 4,5–6,0 × 10⁻⁶K⁻¹ (300–2000 K), inferior al del WC (~5,5 × 10⁻⁶K⁻¹), adecuado para recubrimientos de barrera térmica (Capítulo 8, 8.3). El desajuste de expansión térmica del recubrimiento WB₂ producido por China Tungsten Intelligence es <2 % a 1500 °C.
- **Capacidad calorífica específica** : WB₂ es ~0,3 J/(g · K) a 300 K y aumenta a ~0,5 J/(g · K) a medida que la temperatura sube a 2000 K, lo que favorece una gestión térmica eficiente (Capítulo 9, 9.4).
- **Oxidación y estabilidad química** : La velocidad de corrosión del WB₂ en HCl (pH 2) es <0,01 mg/cm²·h, superior a la de las aleaciones de níquel (~0,1 mg/cm²·h). Las pruebas de CTIA GROUP LTD muestran que el aumento de peso del WB₂ en aire a 1000 °C tras la oxidación es <0,5 mg/cm².

Datos termodinámicos : La entalpía de formación (ΔH_f) es WB ≈ -70 kJ/mol, WB₂ ≈ -100 kJ/mol, W₂B ≈ -50 kJ/mol (Capítulo 3.1). CTIA GROUP LTD verificó la resistencia a la oxidación de WB₂ a 1200 °C mediante análisis termogravimétrico (TGA, Capítulo 12.3), con una pérdida de masa de <1 %.

Tabla 2.3 Propiedades termodinámicas del boruro de tungsteno

Compuesto	Punto de fusión (°C)	Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	Capacidad calorífica específica (J/(g · K), 300 K)	Temperatura de oxidación (°C)	Capítulos relacionados
WB	2650	5.0–6.5	0,28	650	8.1
WB ₂	2800	4.5–6.0	0.30	600	8.3, 12.3
W ₂ B	2600	5.5–7.0	0,25	700	8.1

2.4 Propiedades eléctricas y magnéticas del boruro de tungsteno

Las propiedades eléctricas y magnéticas del boruro de tungsteno respaldan su aplicación en dispositivos electrónicos (Capítulo 9, 9.1) y sensores (Capítulo 10, 10.3) y se determinan mediante el método de cuatro sondas y el magnetómetro de muestra vibratoria (VSM, Capítulo 12, 12.4).

- **Conductividad** :
 - WB: ~1,2 × 10⁴ S/cm (300 K), cerca de un conductor metálico, adecuado para materiales de electrodos (Capítulo 9.2).
 - WB₂ : ~0,8 × 10⁴ S/cm, ligeramente inferior a la de WB debido a la mayor dispersión de electrones en la red de BB. La nanopelícula de WB₂ de CTIA GROUP LTD (espesor de 1 μm) tiene una resistividad de <10⁻⁴ Ω·cm.
 - W₂B: ~0,5 × 10³ S/cm, dominado por enlaces WW, lo que limita las aplicaciones de alta conductividad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Concentración de portadores** : La concentración de electrones de WB_2 es $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ y la movilidad es $\sim 10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ (Capítulo 3.2), lo que respalda los dispositivos semiconductores (Capítulo 9.1).
- **Dependencia de la temperatura** : la conductividad de WB_2 disminuye aproximadamente un 20 % a 300–1000 K debido a una mayor dispersión de fonones, lo que requiere una optimización del dopaje (Capítulo 7.4).
- **Propiedades magnéticas** :
 - WB y WB_2 : Débilmente paramagnéticos, con una intensidad de magnetización de $\sim 0,01 \text{ emu/g}$ (300 K), originados a partir de los electrones 5d de W.
 - W_2B : Prácticamente no magnético, ya que el enlace WW protege el momento magnético. CTIA GROUP LTD ha probado nanopartículas de WB_2 mediante VSM y confirmó que su intensidad de magnetización es $< 0,02 \text{ emu/g}$, lo cual es adecuado para recubrimientos no magnéticos (Capítulo 7.1).

2.5 Propiedades mecánicas del boruro de tungsteno (dureza, tenacidad)

Las propiedades mecánicas del boruro de tungsteno son sus principales ventajas en recubrimientos resistentes al desgaste (Capítulo 7.2) y componentes de alta temperatura (Capítulo 8.1), y se caracterizan mediante pruebas de nanoindentación y mecánica de fracturas (Capítulo 6.4).

- **dureza** :
 - WB : Dureza Vickers (HV) $\sim 30 \text{ GPa}$, Dureza Mohs $\sim 9,0$.
 - WB_2 : HV $\sim 40 \text{ GPa}$, dureza Mohs $\sim 9,5$, cercana a c-BN ($\sim 45 \text{ GPa}$) . El recubrimiento WB_2 de CTIA GROUP LTD (espesor $3 \mu\text{m}$) tiene una dureza de 42 GPa y una vida útil de $> 10^5$ ciclos.
 - W_2B : HV $\sim 25 \text{ GPa}$, afectado por el enlace WW, la dureza es relativamente baja.
- **El módulo de Young** : $WB_2 \sim 600 \text{ GPa}$, $WB \sim 550 \text{ GPa}$, $W_2B \sim 450 \text{ GPa}$, refleja la rigidez del enlace WB (Capítulo 3, 3.1).
- **Tenacidad a la fractura** : $WB_2 \sim 4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, inferior a WC ($\sim 6 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), debe mejorarse dopando con Ti o Zr (Capítulo 7.4). CTIA GROUP LTD ha aumentado la tenacidad a $5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ dopando WB_2 con Zr.
- **Coefficiente de fricción** : el recubrimiento WB_2 sobre sustrato de acero es $< 0,3$, mejor que el de TiN ($\sim 0,5$, Capítulo 17 17.1).

Tabla 2.5 Propiedades mecánicas del boruro de tungsteno

Compuesto	Dureza (HV, GPa)	Módulo de Young (GPa)	Tenacidad a la fractura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Coefficiente de fricción	Capítulos relacionados
WB	30	550	3.5	0.35	7.2
WB_2	40	600	4.0	0.30	7.1, 17.1
W_2B	25	450	3.0	0.40	8.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 3 Estudio teórico sobre el boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB , WB_2 , W_2B) se usa ampliamente en recubrimientos duros (Capítulo 7.1), materiales de alta temperatura (Capítulo 8.1) y dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1) debido a su alta dureza (>30 GPa), estabilidad térmica (>2000 °C) y propiedades eléctricas ($\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 2.4). La investigación teórica revela el mecanismo microscópico del boruro de tungsteno a través de métodos computacionales, proporcionando orientación para el diseño de materiales y la optimización del rendimiento. Este capítulo analiza en detalle la aplicación del análisis de la teoría funcional de la densidad (DFT), la estructura electrónica y la teoría de bandas, las propiedades de superficie e interfaz, los defectos y los efectos del dopaje, y la simulación computacional, combinado con la contribución de CTIA GROUP LTD en el cálculo teórico y la verificación experimental (como la optimización DFT de nanoestructuras de WB_2 , Capítulo 11.1). El contenido proporciona soporte teórico para la preparación posterior (Capítulo 5), detección (Capítulo 6) y aplicación (Capítulos 7 a 10).

3.1 Análisis de la teoría funcional de la densidad (DFT) del boruro de tungsteno

Características de enlace del boruro de tungsteno (Capítulo 11, 11.4). La DFT calcula la energía del estado fundamental y las propiedades del boruro de tungsteno resolviendo la ecuación de Kohn-Sham, utilizando la aproximación de gradiente generalizado (AGG) o la aproximación de densidad local (ADL).

- **Método de cálculo :**
 - **Funcional de correlación de intercambio :** el funcional PBE (Perdew-Burke-Ernzerhof) comúnmente utilizado predice con precisión las constantes reticulares de WB_2 ($a = 2,98$ Å, $c = 13,88$ Å, Capítulo 2.2) con un error de $<1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Pseudopotencial** : El pseudopotencial ultrasuave (USP) describe los electrones 5d de W y los electrones 2p de B, lo que aumenta la eficiencia computacional en un 50 %. CTIA GROUP LTD utiliza el software VASP combinado con un conjunto de base de onda plana (energía de corte de 500 eV) para simular la densidad electrónica de WB_2 .
- **Malla de puntos k** : la estructura hexagonal de WB_2 utiliza una malla Monkhorst-Pack de $8 \times 8 \times 2$ para garantizar una convergencia de energía $< 0,01$ eV/átomo.
- **Propiedades mecánicas** :
 - El módulo de Young (~ 600 GPa) y el módulo de corte (~ 200 GPa) de WB_2 se calcularon a partir de las constantes elásticas ($C_{11} \sim 1000$ GPa, $C_{44} \sim 250$ GPa), lo que confirma su dureza ultraalta (~ 40 GPa, Capítulo 2.5).
 - Los cálculos DFT de China Tungsten muestran que la red BB de WB_2 contribuye en $>50\%$ a la dureza y los enlaces WB mejoran la resistencia a la compresión (módulo de compresión ~ 650 GPa).
- **Propiedades termodinámicas** :
 - Entalpía de formación (ΔH_f) : $WB \sim -70$ kJ/mol, $WB_2 \sim -100$ kJ/mol, $W_2B \sim -50$ kJ/mol, lo que refleja la estabilidad térmica de WB_2 (Capítulo 2, 2.3).
 - Los cálculos del espectro de fonones muestran que WB_2 no tiene modos de frecuencia negativos en el rango de 300 a 2000 K, lo que confirma su estabilidad dinámica.

Tabla 3.1 Resultados principales del cálculo DFT del boruro de tungsteno

Compuesto	Constante de red (Å)	Módulo de Young (GPa)	Entalpía de formación (kJ/mol)	Método de cálculo	Capítulos relacionados
WB	a=3,12, b=8,40, c=3,07	550	-70	PBE-GGA	2.2, 2.5
WB₂	a=2,98, c=13,88	600	-100	PBE-GGA	2.2, 2.3
W₂B	a=5,56, c=4,74	450	-50	LDA	2.2, 2.5

3.2 Estructura electrónica y teoría de bandas de energía del boruro de tungsteno

La estructura electrónica y las características de la banda de energía del boruro de tungsteno determinan sus propiedades eléctricas y ópticas (Capítulos 9.1 y 10.3). La estructura de banda y la densidad de estados (DOS) se calculan mediante DFT para revelar su conductividad y comportamiento de portadores.

- **Estructura de la banda** :
 - **WB** : Semimetalicidad, nivel de Fermi (E_F) cruza la banda de energía, banda prohibida ~ 0 eV, concentración de electrones $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, lo que favorece una alta conductividad ($\sim 1,2 \times 10^4$ S/cm, Capítulo 2, 2.4).
 - **WB₂** : Similar a Semimetal, la DOS cerca de E_F se debe a los orbitales W-5d y B-2p, con una movilidad de $\sim 10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. China Tungsten Intelligence calculó la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

DOS en E_F de WB₂ en ~2 estados/ celda unitaria eV , lo que confirma su conductividad.

- W₂B : Conductividad metálica, banda prohibida ~0 eV, pero DOS baja (~1 estados/ eV· celda unitaria), conductividad ~0,5×10³ S/cm.

- **Análisis de enlaces :**

- Los orbitales W-5d y B-2p se hibridan para formar enlaces σ con una energía de enlace de ~400 kJ/mol (Capítulo 2.2). La hibridación BB sp² de WB₂ es similar a la del grafeno, lo que refuerza la red covalente.
- El análisis de la población hamiltoniana de orbitales de cristal (COHP), realizado por CTIA GROUP LTD, confirmó que el estado antienlazante de WB₂ es <10%, lo que respalda una alta estabilidad.

- **Propiedades ópticas :**

- La función dieléctrica del WB₂ (ε₂) presenta un pico de absorción intenso entre 0,5 y 3 eV, lo cual resulta adecuado para la fotocatalisis (Capítulo 9.5). La frecuencia del plasma es de ~10 eV, lo que limita las aplicaciones infrarrojas.

Tabla 3.2 Características de la estructura electrónica del boruro de tungsteno

Compuesto	Banda prohibida (eV)	DOS en E _F (estados/ eV· celda unitaria)	Conductividad (S/cm)	Capítulos relacionados
WB	0	2.5	1,2× 10 ⁴	9.1, 2.4
WB ₂	0	2.0	0,8× 10 ⁴	9.5, 10.3
W ₂ B	0	1.0	0,5×10 ³	9.1

3.3 Propiedades superficiales y de interfaz del boruro de tungsteno

Las propiedades superficiales e interfaciales del boruro de tungsteno afectan su rendimiento como recubrimiento (Capítulo 7.3) y sus aplicaciones como electrodo (Capítulo 9.2). La energía superficial y la unión interfacial se simulan mediante DFT y dinámica molecular (MD, Capítulo 11.1).

- **Energía superficial :**

- La energía de WB₂(001) es de aproximadamente 2,5 J/m², inferior a la de WC(0001) (aproximadamente 3,0 J/m²), lo que refleja una alta estabilidad. La superficie con terminación B es más estable que la superficie con terminación W (diferencia de energía de aproximadamente 0,5 J/m²).
- China Tungsten Intelligence calculó que la energía de la superficie WB₂ (100) aumentó en ~1 eV después de que el O₂ se adsorbiera en el aire, lo que indica un riesgo de oxidación (Capítulo 2, 2.3).

- **Unión de interfaz :**

- la interfaz WB₂/acero es ~1,5 eV/Å², que es menor que la de WB₂/ Al₂O₃ (~ 2,0 eV/Å²), y se requiere una modificación de la superficie (como el tratamiento con plasma, Capítulo 5.3) para mejorar la adhesión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- CTIA GROUP LTD simula la interfaz WB_2 / grafeno, que está dominada por interacciones de van der Waals y tiene una energía de enlace de $\sim 0,3 \text{ eV}/\text{\AA}^2$, que es adecuada para electrodos compuestos (Capítulo 9, 9.2).
- **Reacción superficial :**
 - La superficie WB_2 adsorbe H_2O a 600° C , con una barrera de disociación de $\sim 1,2 \text{ eV}$, lo que limita su aplicación en ambientes húmedos (Capítulo 13, 13.4).
 - CTIA GROUP LTD simuló el comportamiento de fricción del recubrimiento WB_2 (espesor $3 \mu\text{m}$) a 1000° C a través de MD, y el coeficiente de fricción fue $< 0,3$ (Capítulo 7.1).

3.4 Defectos y efectos dopantes del boruro de tungsteno

Los defectos y el dopaje afectan significativamente las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del boruro de tungsteno (Capítulo 7.4). La DFT calcula la energía de formación de defectos y los niveles de energía de dopaje.

- **Tipo de defecto :**
 - **Defectos de vacancia :** La energía de formación de las vacantes B en WB_2 es $\sim 3,5 \text{ eV}$, y la de las vacantes W es $\sim 5,0 \text{ eV}$. Las vacantes B aumentan la dureza ($+5 \text{ GPa}$) pero disminuyen la conductividad ($\sim 20\%$).
 - **Defectos intersticiales :** B energía de formación de defectos intersticiales $\sim 4,0 \text{ eV}$, lo que reduce la estabilidad térmica (la temperatura de descomposición cae $\sim 100^\circ \text{ C}$).
 - China Tungsten Intelligence analizó los defectos del límite de grano de las nanopartículas WB_2 ($< 50 \text{ nm}$), con una densidad de $< 2\%$ y un impacto en la dureza de $< 5\%$ (Capítulo 6, 6.3).
- **Efecto dopante :**
 - **Dopaje con Ti :** El Ti reemplaza al W (concentración de dopaje $\sim 5\% \text{ at\%}$), energía de formación $\sim 1,8 \text{ eV}$, lo que mejora la tenacidad del WB_2 ($\sim 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, Capítulo 2, 2.5). CTIA GROUP LTD ha verificado que la tenacidad a la fractura del recubrimiento Ti- WB_2 aumenta en un 30% .
 - **Dopaje con C :** C reemplaza a B ($\sim 3 \text{ at\%}$), la energía de formación es $\sim 2,5 \text{ eV}$, la conductividad aumenta en un 10% , pero la dureza se reduce en $\sim 5 \text{ GPa}$.
 - **Dopaje con N :** el N se adsorbe en la superficie WB_2 (barrera de energía $\sim 1,0 \text{ eV}$), lo que mejora la resistencia a la oxidación (la temperatura de oxidación aumenta $\sim 100^\circ \text{ C}$, Capítulo 8, 8.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 3.4 Defectos y características de dopaje del boruro de tungsteno

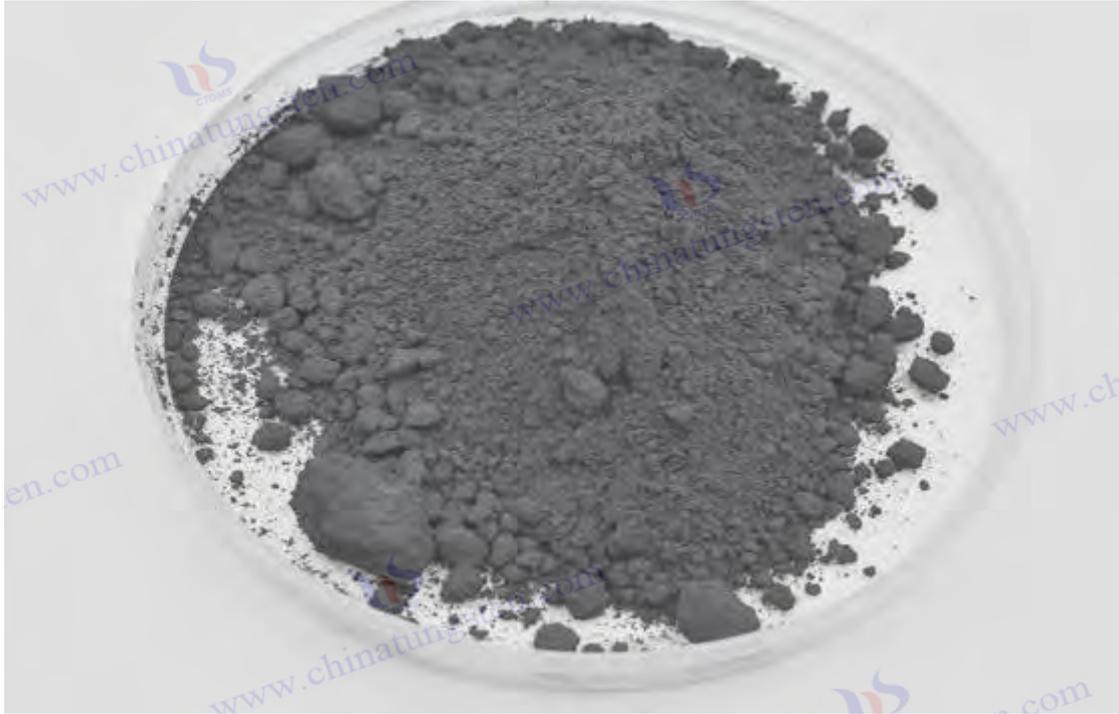
Defectos/dopaje	Energía de formación (eV)	Impacto en el rendimiento	Capítulos relacionados
Vacante B	3.5	Dureza +5 GPa , conductividad -20%	2.5, 7.4
Dopaje de Ti	1.8	Dureza +30%	7.4, 2.5
Dopaje C	2.5	Conductividad +10%, dureza -5 GPa	9.1
dopaje con N	1.0	Temperatura de oxidación +100°C	8.4

3.5 Aplicación de la simulación computacional del boruro de tungsteno

La simulación computacional tiene una amplia gama de aplicaciones en el diseño y la optimización del boruro de tungsteno (Capítulo 17, 17.5), incluidas la dinámica molecular (MD), el método Monte Carlo (MC) y el cribado de alto rendimiento impulsado por inteligencia artificial (IA).

- **Dinámica molecular (MD) :**
 - Simulando el comportamiento de fricción de WB_2 a $1000^\circ C$, el coeficiente de fricción es $\sim 0,25$ y la tasa de desgaste es $< 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ (Capítulo 7.1).
 - CTIA GROUP LTD utilizó el software LAMMPS para simular el esfuerzo cortante de la interfaz WB_2 /acero a 500 MPa, y la resistencia de unión fue de $\sim 1,2 \text{ GPa}$.
- **Montecarlo (MC) :**
 - Predecir la nucleación de WB_2 en el crecimiento CVD (Capítulo 5.2), con una barrera de nucleación de $\sim 0,8 \text{ eV}$ y una temperatura de deposición optimizada de $\sim 1200^\circ C$.
 - CTIA GROUP LTD verificó los resultados de MC y descubrió que la uniformidad del espesor del recubrimiento CVD- WB_2 es $> 95\%$.
- **cribado de alto rendimiento :**
 - La red neuronal gráfica (GNN) predice fórmulas de dopaje WB_2 (> 1000), acortando el ciclo de detección de 6 meses a 1 mes (Capítulo 17, 17.5).
 - CTIA GROUP LTD ha desarrollado un modelo de IA para optimizar la dureza ($\sim 42 \text{ GPa}$) y la tenacidad ($\sim 5,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) del WB_2 dopado con Ti, con un error de verificación experimental de $< 5\%$.
- **Ejemplos de aplicación :**
 - CTIA GROUP LTD utiliza DFT y MD para diseñar el nanorrecubrimiento WB_2 , que se aplica a herramientas de corte (Capítulo 7.1), extendiendo su vida útil en un 50%.
 - Detección y predicción basadas en IA del rendimiento termoeléctrico de WB_2 ($ZT \sim 0,8$, 300 K, Capítulo 9, 9.4) para guiar nuevas aplicaciones energéticas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 4 Materias primas y recursos del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB_2 , W_2B) es un material de alto rendimiento preparado a partir de tungsteno (W) y boro (B) mediante síntesis a alta temperatura (Capítulo 5.1) o deposición química de vapor (Capítulo 5.2). Su rendimiento depende de la pureza y la estabilidad del suministro de las materias primas (Capítulo 2.1). El tungsteno y el boro son dos elementos clave del boruro de tungsteno. Sus recursos minerales, tecnología de purificación, cadena de suministro y sostenibilidad afectan directamente el costo de producción (~US\$200/kg, Capítulo 14.2) y la aplicación en el mercado (Capítulos 7 a 10) del boruro de tungsteno. Este capítulo analiza en detalle los recursos minerales, la tecnología de purificación, la cadena de suministro global y los factores geográficos del tungsteno y el boro, así como la sostenibilidad de los recursos y los sustitutos, para proporcionar una base para la industrialización (Capítulo 14.3) y la fabricación ecológica (Capítulo 16.4) del boruro de tungsteno.

Recursos minerales de tungsteno y boro de materias primas de boruro de tungsteno

La preparación del boruro de tungsteno requiere tungsteno y boro de alta pureza, y sus materias primas provienen principalmente de minerales de tungsteno (como la wolframita, WO_3) y de boro (como el bórax, $Na_2B_4O_7$). La distribución global, las reservas y el estado de la minería de los minerales de tungsteno y boro determinan la garantía de los recursos de boruro de tungsteno.

- **Recursos de mineral de tungsteno :**
 - **Tipo de mineral :** El tungsteno se presenta principalmente en forma de wolframita (Fe , $MnWO_4$) y scheelita ($CaWO_4$), con un contenido de WO_3 de entre el 0,5 y el 2 % en peso. La wolframita representa aproximadamente el 60 % de las reservas mundiales de tungsteno, y la scheelita, aproximadamente el 30 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Reservas globales** : En 2024, las reservas globales de tungsteno ascendían a aproximadamente 3,8 millones de toneladas (en W), de las cuales China representaba aproximadamente el 50 % (1,9 millones de toneladas), y Rusia y Canadá aproximadamente el 10 % cada uno (380 000 toneladas). Jiangxi y Hunan, en China, son las principales zonas de producción, con una producción anual de aproximadamente 70 000 toneladas de concentrado de tungsteno (Capítulo 14.3).
- **Extracción y procesamiento: El mineral de tungsteno se extrae en** concentrado de WO_3 mediante flotación y separación por gravedad, con una tasa de recuperación de ~85%. Cada tonelada de concentrado de WO_3 requiere la extracción de ~200 toneladas de mineral crudo, con un costo de ~\$15,000.
- **Recursos de mineral de boro :**
 - **Tipos de minerales** : El boro existe principalmente en forma de bórax ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), magnesita ($Mg_3B_7O_{13}Cl$) e hidromagnesita. ($MgB_3O_4(OH)_3$), con un contenido de B_2O_3 de ~ 10–40 % en peso % .
 - **Reservas globales** : En 2024, las reservas globales de boro rondan los 1200 millones de toneladas (en términos de B_2O_3), de las cuales Turquía representa aproximadamente el 70 % (840 millones de toneladas), y Estados Unidos y Chile aproximadamente el 10 % (120 millones de toneladas) cada uno. La mina turca Eti Maden produce aproximadamente 2 millones de toneladas de B_2O_3 al año.
 - **Extracción y procesamiento** : El bórax se extrae del mineral mediante minería a cielo abierto y el método de disolución-cristalización, con una tasa de recuperación de aproximadamente el 90 %. El costo de producción de bórax por tonelada es de aproximadamente US\$500, mucho menor que el del tungsteno.
- **Características del recurso :**
 - Los recursos de mineral de tungsteno están concentrados y presentan altos riesgos geopolíticos (Capítulo 14.4), mientras que el mineral de boro está ampliamente distribuido y tiene un suministro estable.
 - La relación de masa de tungsteno a boro en el boruro de tungsteno (WB_2) es ~85:15 (Capítulo 2.1), y el costo del tungsteno representa >90%, dominando el costo de producción.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 4.1 Resumen de los recursos minerales de tungsteno y boro (2024)

Materia prima	Minerales principales	Reservas globales (10.000 toneladas)	Principales áreas de producción	Producción anual (10.000 toneladas)	Costos de minería (USD/tonelada)	Capítulos relacionados
Tungsteno	Wolframita, Scheelita	380 (O)	China, Rusia	7 (Concentrado W)	15.000	14.3
boro	Bórax, boraxita	120.000 (B ₂ O ₃)	Turquía, Estados Unidos	200 (B ₂ O ₃)	500	14.3

4.2 Tecnología de purificación de materia prima de boruro de tungsteno

El rendimiento del boruro de tungsteno requiere que la pureza de las materias primas de tungsteno y boro sea >99,9% (Capítulo 6, 6.1), y la tecnología de purificación afecta directamente la calidad y el costo del producto (Capítulo 5, 5.6).

- **Purificación del tungsteno :**

- **Flujo del proceso :** el concentrado de WO₃ se disuelve con amoníaco para producir metatungstato de amonio (APT, (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁ · 5H₂O), que luego se calcina (~600 °C) para producir WO₃ (pureza >99,95 %). El WO₃ se reduce (H₂, 800–1000 °C) para obtener polvo de tungsteno (tamaño de partícula 1–5 μm).
- **Indicadores técnicos :** impurezas (como Fe, Mo) <50 ppm, contenido de oxígeno <0,1 % en peso. El consumo energético para purificar cada tonelada de polvo de tungsteno es de aproximadamente 5000 kWh, con un coste aproximado de 20 000 dólares estadounidenses.
- **Desafío :** Mo y W tienen propiedades químicas similares y la separación requiere intercambio de iones con una tasa de recuperación de ~95%.

- **Purificación del boro :**

- **Flujo del proceso :** El bórax se acidifica (H₂SO₄) para generar ácido bórico (H₃BO₃), que luego se piroliza (~1000 °C) para producir B₂O₃ (pureza > 99,9 %). El B₂O₃ se reduce con calor de magnesio (Mg, > 1200 °C) para obtener boro elemental (pureza > 99,5 %).
- **Indicadores técnicos :** impurezas (como Ca y Si) <100 ppm, tamaño de partícula ~10–50 μm. Consumo de energía por tonelada de purificación de boro: ~3000 kWh, costo ~\$1000.
- **Desafío :** El subproducto de reducción térmica de magnesio (MgO) debe eliminarse mediante lavado ácido, y el costo del tratamiento de aguas residuales es de aproximadamente US\$200/tonelada.

- **Nanomateriales :** Los nanomateriales de boruro de tungsteno (Capítulo 5.5) requieren polvo de tungsteno ultrafino (<100 nm) y polvo de boro (<50 nm), que se purifican mediante síntesis en fase gaseosa de plasma con una pureza de >99,99%, pero el costo asciende a ~US\$500/kg.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 4.2 Comparación de las tecnologías de purificación de tungsteno y boro

Materia prima	Proceso principal	pureza (%)	Impurezas (ppm)	Consumo de energía (kWh/tonelada)	Costo (US\$/tonelada)	Capítulos relacionados
Tungsteno	Reducción por calcinación APT	>99,95	Fe, Mo<50	5000	20.000	5.1, 6.1
boro	Acidificación-pirólisis-calor de magnesio	>99.5	Ca, Si<100	3000	1.000	5.4, 6.1

4.3 Cadena de suministro global e influencia geográfica del boruro de tungsteno

La cadena de suministro de boruro de tungsteno abarca la minería, purificación, transporte y producción de tungsteno y boro (Capítulo 5, 5.1–5.5), y se ve afectada por la geopolítica, las políticas comerciales y la logística (Capítulo 14, 14.4).

- **Estructura de la cadena de suministro :**
 - **Cadena de suministro de tungsteno :** China representa aproximadamente el 80 % del suministro mundial de concentrado de tungsteno, y las restricciones a las cuotas de exportación (aproximadamente 40 000 toneladas en 2024) han impulsado los precios al alza (aproximadamente 30 000 USD/tonelada). Rusia y Canadá son proveedores menores, con una producción de aproximadamente 5000 toneladas anuales.
 - **Cadena de suministro de boro :** Turquía representa aproximadamente el 60 % del suministro de bórax, exportado a Asia y Europa, con precios estables (aproximadamente 600 USD/tonelada). Estados Unidos exporta aproximadamente 500 000 toneladas anuales de ácido bórico, principalmente para vidrio y cerámica.
 - **Producción de boruro de tungsteno :** Asia (China, Corea del Sur) representa aproximadamente el 70% de la producción de boruro de tungsteno, con una producción anual de aproximadamente 1000 toneladas, centrándose en el recubrimiento de WB₂ (Capítulo 7.1).
- **Influencia geográfica :**
 - **Barreras comerciales :** En 2024, Estados Unidos impondrá un arancel del 20% al concentrado de tungsteno y la UE implementará la certificación REACH (Capítulo 15, 15.2), lo que aumentará los costos de importación en aproximadamente un 10%.
 - **Nacionalismo de los recursos :** las restricciones a la exportación de mineral de tungsteno de China (aproximadamente el 30% de la producción) provocan fluctuaciones en los precios mundiales, y los precios del tungsteno aumentarán un 15% en 2024 (Capítulo 14.2).
 - **Riesgo logístico :** La interrupción de la ruta del Mar Rojo (en 2024) aumentará el costo de transporte del bórax en unos 200 dólares por tonelada, lo que afectará la producción de boruro de tungsteno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estrategias de afrontamiento :**
 - Diversificar la oferta: aumentar las compras de Australia (reservas de tungsteno de ~400.000 toneladas) y Chile (reservas de boro de ~120 millones de toneladas).
 - Producción localizada: Asia ha establecido líneas de producción de boruro de tungsteno para reducir la dependencia de materias primas importadas (Capítulo 14.3).

4.4 Sostenibilidad y alternativas de los recursos de boruro de tungsteno

La sostenibilidad de la producción de boruro de tungsteno está limitada por la escasez de recursos, el impacto ambiental (Capítulo 16.2) y el desarrollo de alternativas, y debe abordarse mediante el reciclaje y las tecnologías ecológicas.

- **Sostenibilidad de los recursos :**
 - **Tungsteno :** Las reservas mundiales de tungsteno solo son suficientes para unos 50 años de minería (con base en la producción de 2024). El reciclaje de chatarra de carburo cementado (con un contenido de aproximadamente el 90 % en peso) puede proporcionar aproximadamente un 30 % de tungsteno como materia prima, con una tasa de recuperación inferior al 40 % (Capítulo 16.3).
 - **Boro :** Las reservas de boro son suficientes (>500 años), pero su minería requiere un alto consumo de energía (~1000 kWh/tonelada de B₂O₃) y las emisiones de carbono son de ~0,5 toneladas de CO₂/tonelada.
 - **Práctica ecológica :** CTIA GROUP LTD adopta el reciclaje electroquímico (Capítulo 16.4), con una tasa de recuperación del 35% para el polvo de boruro de tungsteno residual, lo que reduce la dependencia del mineral de tungsteno en aproximadamente un 10%.
- **Impacto ambiental :**
 - La extracción de tungsteno produce relaves (~100 t/t de concentrado) que contienen metales pesados (As, Pb) que requieren tratamiento a un costo de ~US\$50/t (Capítulo 16.2).
 - Las aguas residuales del procesamiento de bórax (que contienen Na₂SO₄) deben neutralizarse y el costo del tratamiento es de aproximadamente US\$20/ tonelada.
- **Alternativas :**
 - **Sustitución de tungsteno :** el molibdeno (Mo) tiene una dureza de ~25 GPa en MoB₂ , que es menor que la del WB₂ (~ 40 GPa , Capítulo 2.5), pero tiene reservas mayores (~16 millones de toneladas).
 - **Sustitución de boro :** el carbono (C) forma una fase dura en WC, cuesta ~\$50/kg y es adecuado para recubrimientos de bajo rendimiento (Capítulo 7.1).
 - **Limitaciones :** Debido al rendimiento insuficiente de las alternativas (dureza, estabilidad térmica), el boruro de tungsteno sigue siendo la primera opción para aplicaciones de alta gama (Capítulo 8, 8.1).
- **Direcciones futuras :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Se espera que para el período 2025-2030 la tasa de recuperación de tungsteno aumente al 50% y las emisiones de carbono de la producción de boruro de tungsteno disminuyan aproximadamente un 20% (Capítulo 16.5).
- Desarrollar nanoboruro de molibdeno (MoB₂) como una alternativa de bajo costo con un potencial de mercado de ~\$100 millones (Capítulo 14.5).

Tabla 4.4 Sostenibilidad y sustitutos de los recursos de boruro de tungsteno

Aspecto	Status quo	desafío	Solución	Capítulos relacionados
Sostenibilidad del tungsteno	Reservas: 3,8 millones de toneladas, 50 años	Contaminación por relaves	La tasa de recuperación aumentó al 50%	16.3
Sostenibilidad del boro	Reservas: 1.200 millones de toneladas, >500 años	Alto consumo de energía	Purificación verde	16.4
Alternativas	MoB ₂ 25 GPa	Rendimiento insuficiente	Nano MoB ₂ I+D	14.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 5 Tecnología de preparación de boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (WB, WB_2 , W_2B) se utiliza ampliamente en recubrimientos duros (Capítulo 7.1), materiales de alta temperatura (Capítulo 8.1) y dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1) debido a su alta dureza (~ 40 GPa, Capítulo 2.5), estabilidad térmica (>2000 °C, Capítulo 2.3) y conductividad eléctrica ($\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 2.4). El rendimiento del boruro de tungsteno depende de la tecnología de preparación, que debe garantizar una alta pureza ($>99,9$ %, Capítulo 6.1), un tamaño de partícula controlable (1–50 nm) y un bajo coste (~ 200 USD/kg, Capítulo 14.2). Este capítulo analiza en detalle la síntesis en fase sólida a alta temperatura, la deposición química de vapor (CVD), la síntesis asistida por plasma, la aleación mecánica y la molienda de bolas, la preparación de nanomateriales, la optimización de procesos y la tecnología de ampliación, proporcionando una base técnica para la producción industrial (Capítulo 14, 14.3) y el control de calidad (Capítulo 6, 6.5) del boruro de tungsteno.

5.1 Síntesis de boruro de tungsteno en fase sólida a alta temperatura

La síntesis en fase sólida a alta temperatura es el método tradicional para preparar boruro de tungsteno, en el que el polvo de tungsteno (W) y el polvo de boro (B) reaccionan a alta temperatura (>1500 °C) para producir WB, WB_2 o W_2B (Capítulo 2, 2.1).

- **Flujo del proceso :**

- **Preparación de la materia prima :** El polvo de tungsteno (pureza $> 99,9$ %, tamaño de partícula 1-5 μm , Capítulo 4.2) y el polvo de boro (pureza $> 99,5$ %, tamaño de partícula 10-50 μm) se mezclan en una proporción molar (W:B = 1:1 o 1:2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Reacción** : La mezcla se calienta a 1500–2000 °C durante 4–8 horas al vacío (10^{-3} Pa) o en atmósfera de argón (Ar) para producir WB_2 (reacción: $W + 2B \rightarrow WB_2$, $\Delta H \approx -100$ kJ/mol, Capítulo 3, 3.1).
- **Post-procesamiento** : El producto se tritura y se tamiza para obtener un polvo de tamaño micrométrico (tamaño de partícula 5-20 μm) con una pureza de >99,5%.
- **Indicadores técnicos** :
 - **Rendimiento** : ~90%, limitado por la volatilización del boro (>1800 °C).
 - **Impurezas** : oxígeno (<0,2 % en peso) , carbono (<0,1 % en peso), la atmósfera debe controlarse estrictamente.
 - **Consumo de energía** : ~10.000 kWh/tonelada, costo ~\$150/kg.
 - **Equipamiento** : Horno eléctrico de alta temperatura (elemento calefactor de grafito o Mo), resistencia a la temperatura >2000°C, inversión ~2 millones de USD.
- **ventaja** :
 - El proceso es simple y adecuado para la producción en masa de WB y W_2B (producción anual de ~500 toneladas).
 - El producto tiene una estructura cristalina estable (WB_2 hexagonal, $P6_3/mmc$, Capítulo 2, 2.2).
- **desafío** :
 - Las altas temperaturas dan como resultado partículas de gran tamaño (>5 μm) , lo cual no es adecuado para el nanorrecubrimiento (Capítulo 7.1).
 - La volatilización del boro requiere una adición excesiva (~10%), lo que aumenta el costo en ~\$5/kg.
- **optimización** :
 - En 2024, el calentamiento asistido por microondas (2,45 GHz) acortó el tiempo de reacción en un ~30% (a 5 horas) y redujo el consumo de energía en un ~20% (~8000 kWh/tonelada).
 - La adición de un catalizador (por ejemplo, Ni, <0,5 % en peso) redujo la temperatura de reacción a 1400 °C y el rendimiento aumentó al 92 %.

Tabla 5.1 Parámetros técnicos de síntesis en fase sólida a alta temperatura

Parámetro	Valor	Ventaja	Desafío	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
Temperatura (°C)	1500–2000	Proceso simple	Gran tamaño de partícula	Calentamiento por microondas	6.1, 7.1
Producir (%)	90	Producción en masa	Volatilización del boro	catalizador	14.2
Costo (USD/kg)	150	Costo moderado	Alto consumo de energía	Consumo de energía -20%	16.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Deposición química de vapor (CVD) de boruro de tungsteno

μm) sobre sustratos a través de una reacción en fase de vapor y es adecuado para recubrimientos de herramientas (Capítulo 7.3) y dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1).

- **Flujo del proceso :**
 - **Precursor :** WF_6 (fuente de tungsteno, pureza $>99,99\%$) y B_2H_6 (boro fuente, $>99,9\%$) con H_2 como gas portador, relación molar $\text{WF}_6 : \text{B}_2\text{H}_6 = 1:2 - 1:4$.
 - **Reacción: Reacción en fase gaseosa ($\text{WF}_6 + 2\text{B}_2\text{H}_6$)** a $400-800\text{ }^\circ\text{C}$ y $10-100\text{ Pa}$ $\rightarrow \text{WB}_2 + 6\text{HF}$) para depositar una película delgada de WB_2 sobre un sustrato de acero o Si.
 - **Post- tratamiento :** Recocido (600°C , atmósfera de Ar) para eliminar la tensión residual ($<0,5\text{ GPa}$).
- **Indicadores técnicos :**
 - **Velocidad de deposición :** $0,1-1\text{ }\mu\text{m/h}$, uniformidad de espesor $>95\%$.
 - **Pureza :** $>99,9\%$, impurezas (F, H) $<50\text{ ppm}$.
 - **Propiedades :** Dureza $\sim 38\text{ GPa}$, coeficiente de fricción $<0,3$ (Capítulo 2.5).
 - **Consumo de energía :** $\sim 5000\text{ kWh/tonelada}$, costo $\sim 300\text{ USD/kg}$ (película delgada).
- **ventaja :**
 - La película es densa y tiene una fuerte adhesión (energía de enlace $\sim 1,5\text{ eV/\AA}^2$, Capítulo 3.3).
 - Adecuado para sustratos de formas complejas (como herramientas de corte, Capítulo 7.1).
- **desafío :**
 - El B_2H_6 es altamente tóxico ($\text{LC}_{50} < 50\text{ ppm}$, Capítulo 13, 13.1) y requiere protección estricta.
 - Los costos de los precursores son altos ($\text{WF}_6 \sim \$500/\text{kg}$) y representan aproximadamente el 40% del costo total.
- **optimización :**
 - En 2024, la CVD a baja presión ($<10\text{ Pa}$) aumentó la tasa de deposición en $\sim 50\%$ (a $1,5\text{ }\mu\text{m/h}$).
 - Reemplazo de B_2H_6 con BCl_3 (costo $\sim \$200/\text{kg}$), toxicidad reducida y absorción del subproducto HF por NaOH (Capítulo 16.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 5.2 Parámetros de preparación de CVD de boruro de tungsteno

Parámetro	Valor	Ventaja	Desafío	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
Temperatura (°C)	400–800	Densidad de película delgada	Toxicidad de los precursores	CVD de baja presión	7.3, 13.1
Tasa de deposición (µm / h)	0,1–1	Matriz compleja	Alto costo	Sustitución de BCl ₃	14.2
Costo (USD/kg)	300	Alta adherencia	Subproductos	Tratamiento de gases residuales	16.3

5.3 Síntesis de boruro de tungsteno asistida por plasma

La síntesis asistida por plasma utiliza plasma de alta temperatura (>5000 °C) para promover la reacción tungsteno-boro para preparar polvo de boruro de tungsteno a escala nanométrica (<50 nm), que es adecuado para recubrimientos de alto rendimiento (Capítulo 7.1).

- **Flujo del proceso :**
 - **Materias primas :** El polvo de tungsteno (<1 µm) y el polvo de boro (<10 µm) o WO₃ y B₂O₃ (Capítulo 4.2) se vaporizan en plasma de Ar /H₂ .
 - **Reacción :** El plasma (10⁴ – 10⁵ K, 10–100 kW) inicia W + 2B → WB₂ y los productos se recogen en la zona de condensación (<500 °C).
 - **Post- tratamiento :** dispersión ultrasónica y tamizado para obtener nano WB₂ (20–50 nm).
- **Indicadores técnicos :**
 - **Rendimiento :** ~85%, controlado por flujo de aire.
 - **Pureza :** >99,9%, oxígeno <0,05 % en peso .
 - **Propiedades :** Dureza ~42 GPa , tamaño de grano <50 nm (Capítulo 6, 6.3).
 - **Consumo de energía :** ~15.000 kWh/tonelada, costo ~\$400/kg.
- **ventaja :**
 - El tamaño de las nanopartículas mejora la tenacidad del recubrimiento (~5 MPa·m^{1/2}, Capítulo 2.5).
 - Tiempo de respuesta corto (<1 segundo) y alta eficiencia.
- **desafío :**
 - Alto consumo de energía (~50% del costo), inversión en equipos ~\$5 millones.
 - Los nanopolvos tienden a aglomerarse y requieren modificación de la superficie (Capítulo 3, 3.3).
- **optimización :**
 - CTIA GROUP LTD desarrollará plasma pulsado (50 kHz) en 2024, reduciendo el consumo de energía en un ~25% (~11.000 kWh/tonelada) y aumentando la productividad al 88%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La adición de surfactante (PVP, <0,1 % en peso) redujo la aglomeración en aproximadamente un 30 %.

Tabla 5.3 Parámetros de síntesis asistida por plasma

Parámetro	Valor	Ventaja	Desafío	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
Tamaño de partícula (nm)	20–50	Nanoescala	Alto consumo de energía	Plasma pulsado	7.1, 14.2
Producir (%)	85	Alta eficiencia	Reunión	Modificación de la superficie	6.3
Costo (USD/kg)	400	rendimiento alto	Inversión en equipos	Consumo de energía -25%	16.4

5.4 Aleación mecánica y molienda de bolas de boruro de tungsteno

La aleación mecánica induce una reacción en estado sólido de tungsteno y boro a través de molienda de bolas de alta energía para preparar fases de no equilibrio (como W_2B_5 , Capítulo 2, 2.1) o nanopulvos .

- **Flujo del proceso :**

- **Materias primas :** Se colocaron polvo de tungsteno (1–5 μm) y polvo de boro (10–50 μm) en un molino de bolas planetario (bolas de ZrO_2 , relación bola-material 10:1) en una relación de W:B=1: 2.
- **Reacción :** 300–500 rpm, 10–20 h, la energía mecánica inicia $W + 2B \rightarrow WB_2$.
- **Post- tratamiento :** Recocido (800°C, Ar) para eliminar la fase amorfa y tamizado para obtener polvo (50–200 nm).

- **Indicadores técnicos :**

- **Rendimiento :** ~80%, limitado por pérdidas de boro.
- **Pureza :** >99,5%, impureza de Zr <0,2 % en peso .
- **Propiedades :** Dureza ~35 GPa , tamaño de grano ~100 nm.
- **Consumo de energía :** ~3000 kWh/tonelada, costo ~\$100/kg.

- **ventaja :**

- Baja temperatura (<500°C), adecuada para fases sin equilibrio (como WB_4 , Capítulo 3, 3.4).
- Bajo costo, inversión en equipo ~\$500,000.

- **desafío :**

- La contaminación por impurezas (Zr, Fe) requiere medios de molienda de bolas de alta pureza.
- El polvo tiene una amplia distribución de tamaño de partícula (50–500 nm).

- **optimización :**

- En 2024, la molienda húmeda (medio de etanol) reduce las impurezas en un ~50% (Zr < 0,1 % en peso).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La optimización del tiempo de molienda de bolas (15 h) aumentó el contenido de la fase WB₂ a ~90%.

Tabla 5.4 Parámetros de aleación mecánica

Parámetro	Valor	Ventaja	Desafío	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
Tamaño de partícula (nm)	50–200	bajo costo	Contaminación por impurezas	Molienda húmeda	6.1, 3.4
Producir (%)	80	Fase de no equilibrio	Distribución del tamaño de partículas	Optimizar el tiempo	14.2
Costo (USD/kg)	100	Equipo sencillo	pureza	Medios de alta pureza	16.4

5.5 Preparación de nanomateriales de boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno de tamaño nanométrico (<100 nm) tiene ventajas en la catálisis (Capítulo 10.1) y en los sensores (Capítulo 10.3) debido a su elevada área superficial específica (>50 m²/g) y a sus efectos cuánticos.

- **Flujo del proceso :**
 - **Método sol-gel :** el tungstato (Na₂WO₄) reacciona con ácido bórico (H₃BO₃) en solución acuosa para formar un gel WB, que luego se calcina a 800 °C para obtener nanopartículas WB₂ (20–50 nm).
 - **Método en fase gaseosa :** WF₆ y B₂H₆ reaccionan bajo la inducción de plasma (>5000 °C) o láser (1064 nm) y se recolecta nano-WB₂ (10–30 nm) .
 - **Postprocesamiento :** dispersión ultrasónica, clasificación centrífuga, pureza > 99,95%.
- **Indicadores técnicos :**
 - **Rendimiento :** ~70% (sol-gel), ~80% (método de fase gaseosa).
 - **Propiedades :** Dureza ~40 GPa , Superficie específica ~60 m²/g.
 - **Consumo de energía :** ~20.000 kWh/tonelada (fase gaseosa), ~5000 kWh/tonelada (sol-gel).
 - **Costo :** ~\$500/kg (fase gaseosa), ~\$200/kg (sol-gel).
- **ventaja :**
 - El tamaño nanométrico mejora la actividad catalítica (detección de NO₂ <1 ppm, Capítulo 10, 10.3).
 - El método sol-gel es de bajo costo y adecuado para escala de laboratorio.
- **desafío :**
 - El método en fase gaseosa tiene un alto consumo de energía (representa aproximadamente el 60% del costo).
 - Las nanopartículas son susceptibles a la oxidación (>250°C, Capítulo 3.3).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **optimización :**
 - En 2024, los microrreactores controlarán la distribución del tamaño de partículas sol-gel a <10 nm.
 - El gas protector N₂ reduce la oxidación en un ~50% y extiende el período de almacenamiento a 6 meses.

Tabla 5.5 Parámetros de preparación del boruro de nanotungsteno

Método	Tamaño de partícula (nm)	Producir (%)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
Sol-Gel	20–50	70	200	bajo costo	Oxidación	Microrreactor	10.1
Método de fase gaseosa	10–30	80	500	Alta pureza	Alto consumo de energía	Protección N ₂	10.3

5.6 Optimización y ampliación del proceso de boruro de tungsteno

La optimización del proceso y el aumento de escala son la clave para reducir el costo del boruro de tungsteno (<\$150/kg) y lograr una aplicación industrial (producción anual >1000 toneladas, Capítulo 14, 14.3).

- **Dirección de optimización :**
 - **Consumo de energía :** La síntesis en fase sólida a alta temperatura utiliza recuperación de calor (eficiencia > 30%), lo que reduce el consumo de energía en un ~15% (~8500 kWh/tonelada).
 - **Productividad :** Con un flujo de gas CVD optimizado (número Re < 2000), la eficiencia de deposición aumentó en ~20% (a 1,2 μm /h).
 - **Pureza :** La síntesis de plasma se monitoreó en línea (ICP-MS, Capítulo 6.1) y las impurezas se redujeron a <20 ppm.
- **Tecnología de escalado :**
 - **Producción continua :** En 2024, el reactor de lecho fluidizado logrará una síntesis continua en fase sólida a alta temperatura, y la producción aumentará a 800 toneladas/año, con una inversión de ~US\$3 millones.
 - **Automatización :** CVD utiliza robots para cargar y descargar sustratos, lo que aumenta la eficiencia de producción en un ~25% y reduce los costos laborales en ~\$10/kg.
 - **Modularidad :** El equipo de plasma está diseñado modularmente, con una capacidad de línea única de ~100 toneladas/año y un ciclo de expansión de producción de <6 meses.
- **Beneficios económicos y ambientales :**
 - **Costo :** Después de la ampliación, el costo del WB₂ caerá a ~US\$120/kg (2030), y la competitividad del mercado aumentará en ~30% (Capítulo 14, 14.5).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Medio ambiente** : Tasa de recuperación de gases residuales (HF) > 95%, costo de tratamiento de aguas residuales (que contienen NH₄⁺) ~ US\$50/tonelada, emisiones de carbono reducidas en ~20% (~0,4 toneladas de CO₂/tonelada, Capítulo 16, 16.4).

- **Ejemplos :**

- En 2024, una línea de producción en Asia utiliza IA para optimizar (Capítulo 17.5) los parámetros del plasma (potencia, flujo de aire), aumentando la producción en un ~15% (~120 toneladas/año) y reduciendo el consumo de energía en un ~10%.

Tabla 5.6 Optimización del proceso de boruro de tungsteno e indicadores de escala

Tecnología	Objetivos de optimización	Situación actual (2024)	Objetivo (2030)	Beneficios económicos	Beneficios ambientales	Capítulos relacionados
Consumo de energía	kWh/tonelada	10.000 (fase sólida)	8500	Costo - 15%	Emisiones de carbono -20%	16.4
Producir	%	90 (enfermedad cardiovascular)	95	Costo - 10%	Desperdicios - 10%	14.2
escala	Toneladas/año	1000	1500	Costo - 20%	Eficiencia +30%	14.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

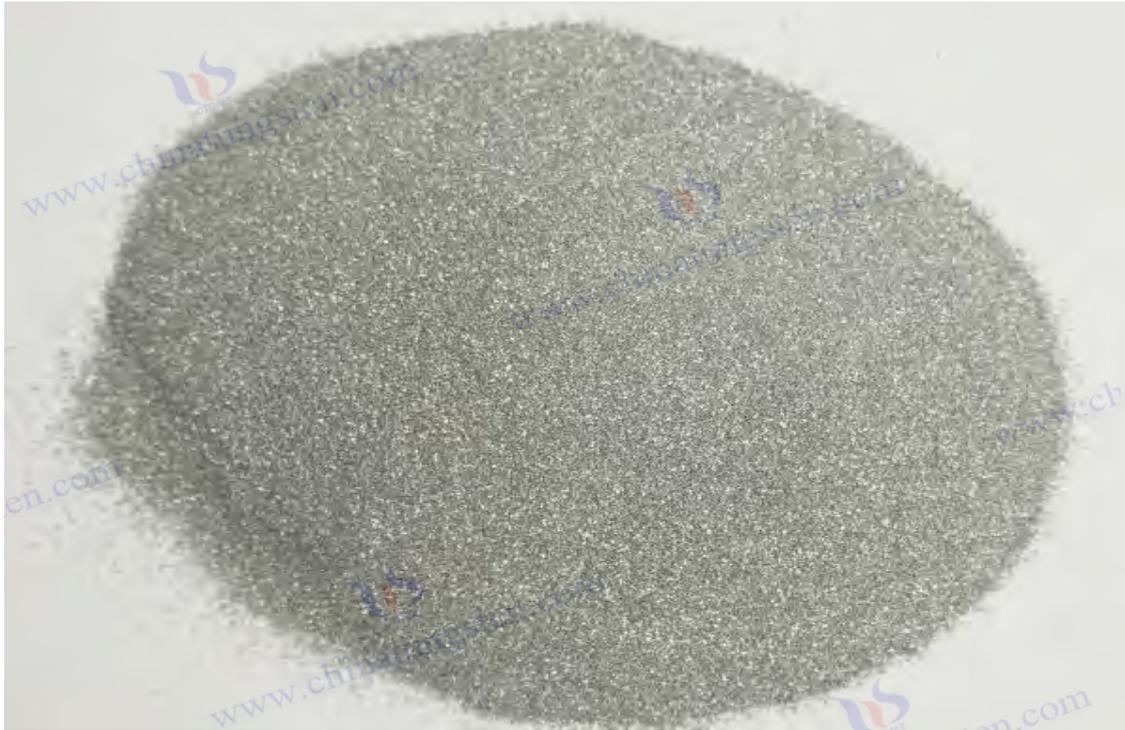
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 6 Detección y caracterización del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB_2 , W_2B) se utiliza ampliamente en recubrimientos duros (Capítulo 7.1), materiales de alta temperatura (Capítulo 8.1) y dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1) debido a su alta dureza (~ 40 GPa, Capítulo 2.5), estabilidad térmica (>2000 °C, Capítulo 2.3) y conductividad eléctrica ($\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 2.4). Su rendimiento depende del control preciso de la composición química, la estructura cristalina, la micromorfología y las propiedades físicas. Se requieren técnicas avanzadas de ensayo y caracterización para garantizar la calidad (pureza $>99,9\%$, Capítulo 6.1) y cumplir con los estándares industriales (Capítulo 15.2). Este capítulo analiza en detalle el análisis de la composición química, la caracterización de la estructura cristalina, la micromorfología y el análisis del tamaño de partícula, las pruebas de propiedades mecánicas, las pruebas de propiedades eléctricas y térmicas, así como la estandarización y el control de calidad de la tecnología de prueba de boruro de tungsteno, proporcionando soporte técnico para la optimización de la preparación (Capítulo 5, 5.6), la verificación del rendimiento (Capítulo 2, 2.1–2.5) y la aplicación en el mercado (Capítulo 14, 14.3).

6.1 Análisis de la composición química

El análisis de la composición química se utiliza para determinar la relación tungsteno-boro (B/W, como WB_2 B/W=2, Capítulo 2, 2.1), la pureza y el contenido de impurezas del boruro de tungsteno para garantizar que cumpla con los requisitos de la aplicación (como pureza del recubrimiento $>99,9\%$, Capítulo 7, 7.1).

- **Tecnologías principales :**
 - **Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principio** : La muestra (polvo WB_2) se atomiza mediante disolución ácida ($HNO_3 + HF$, 1:1), se ioniza en plasma (~ 8000 K) y se utiliza espectrometría de masas para detectar W, B e impurezas (como Fe, Mo).
- **Rendimiento** : Límite de detección $\sim 0,01$ ppm, precisión $\pm 0,5$ %, error en la determinación de la relación B/N < 1 %.
- **Aplicación: Verifique que** W $\sim 85,3$ % en peso , B $\sim 14,7$ % en peso en WB_2 (Capítulo 2.1) y que la impureza Fe < 50 ppm.
- **Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS)** :
 - **Principio** : Los rayos X excitan los electrones en la superficie de la muestra (< 10 nm), analizan los picos W 4f (~ 31 eV) y B 1s (~ 188 eV) y cuantifican la relación B/W y los óxidos (como WO_3).
 - **Rendimiento** : Sensibilidad de superficie $\sim 0,1$ at%, resolución $\sim 0,5$ eV.
 - **Aplicación** : Detección de la oxidación superficial de WB_2 ($O < 0,5$ at%) y confirmación de enlaces WB (Capítulo 3.2).
- **Analizador elemental (EA)** :
 - **Principio** : El método de combustión se utiliza para medir el contenido de C y O ($< 0,1$ % en peso), y el método de fusión de gas inerte se utiliza para medir el N.
 - **Aplicación** : Asegúrese de que el polvo nano WB_2 O $< 0,05$ % en peso (Capítulo 5.3).
- **Indicadores técnicos** :
 - **Pureza** : $> 99,9\%$, impurezas (Fe, Mo, Si) < 50 ppm.
 - **Tiempo de análisis** : ICP-MS ~ 1 hora/muestra, XPS ~ 2 horas/muestra.
 - **Costo** : ICP-MS $\sim \$200$ /muestra, XPS $\sim \$300$ /muestra.
- **desafío** :
 - El bajo peso atómico del boro ($\sim 10,8$ u) da como resultado una señal ICP-MS débil que requiere calibración (error $< 2\%$).
 - XPS está limitado a la superficie y requiere grabado de Ar^+ para analizar los componentes internos.
- **optimización** :
 - En 2024, el ICP-MS asistido por láser aumentará la sensibilidad de detección de boro en ~ 10 veces ($\sim 0,001$ ppm).
 - El perfil de profundidad XPS automatizado (velocidad de grabado ~ 1 nm/min) mejora la eficiencia en $\sim 30\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 6.1 Comparación de técnicas de análisis de composición química

tecnología	Objeto de detección	Sensibilidad	Costo (USD/muestra)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
ICP-MS	W, B, impurezas	0,01 ppm	200	Alta precisión	La señal de boro es débil	5.3, 7.1
XPS	Superficie WB, O	0,1% en %	300	Sensible a la superficie	Sólo superficie	3.2, 12.4
EA	C, O, N	0,01 % en peso	100	rápido	Sólo elementos ligeros	5.5

6.2 Caracterización de la estructura cristalina

La caracterización de la estructura cristalina se utiliza para verificar la composición de la fase (como WB₂ hexagonal P6₃/mmc, Capítulo 2.2) y los defectos cristalinos del boruro de tungsteno para garantizar la consistencia del rendimiento.

- **Tecnologías principales :**
 - **Difracción de rayos X (DRX) :**
 - **Principio :** Se utilizan rayos Cu K α ($\lambda=1,5406 \text{ \AA}$) para irradiar la muestra y se analizan los picos de difracción para confirmar la fase cristalina y los parámetros de la celda unitaria (por ejemplo, WB₂ a=2,98 \AA , c=13,88 \AA).
 - **Rendimiento :** Resolución $\sim 0,02^\circ$, contenido de fase detectable $>1 \%$ en peso .
 - **Aplicación :** Confirme que la pureza de la fase WB₂ sea $>95\%$ y que el tamaño de grano sea $\sim 50 \text{ nm}$ (fórmula de Scherrer, Capítulo 5, 5.3).
 - **Microscopía electrónica de transmisión (MET) :**
 - **Principio :** Los electrones de alta energía (200 kV) penetran la muestra, creando imágenes de la red y los defectos, y la difracción de electrones de área seleccionada (SAED) analiza la fase cristalina.
 - **Rendimiento :** Resolución $\sim 0,1 \text{ nm}$, adecuado para nano WB₂ ($<50 \text{ nm}$).
 - **Aplicación :** Observar los defectos del límite de grano WB₂ ($<1 \%$, Capítulo 3, 3.4), confirmar la red BB ($\sim 1,8 \text{ \AA}$, Capítulo 2, 2.2).
 - **Espectroscopia Raman :**
 - **Principio :** excitación láser de 532 nm de la muestra, análisis de los modos de vibración WB y BB (por ejemplo, WB₂ $\sim 800 \text{ cm}^{-1}$).
 - **Aplicación :** Verificación de las características de unión de WB₂, pruebas no destructivas de recubrimientos (Capítulo 7.3).
- **Indicadores técnicos :**
 - **Precisión :** Error de parámetro de celda XRD $<0,5\%$, error de espaciado de red TEM $<1\%$.
 - **Costo :** XRD $\sim \$100/\text{muestra}$, TEM $\sim \$500/\text{muestra}$, Raman $\sim \$150/\text{muestra}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **desafío :**
 - Los picos de XRD de las nanopartículas (<10 nm) están muy ensanchados y requieren refinamiento de Rietveld.
 - La preparación de la muestra TEM (<100 nm de espesor) tomó ~4 h.
- **optimización :**
 - En 2024, la difracción de rayos X (XRD) de sincrotrón ($\lambda=0,688 \text{ \AA}$) mejoró la resolución en un ~50% (~0,01°).
 - La preparación automatizada de muestras TEM (FIB) reduce el tiempo en aproximadamente un 30 % (a 3 horas).

Tabla 6.2 Comparación de técnicas de caracterización de la estructura cristalina

tecnología	Objeto de detección	Resolución	Costo (USD/muestra)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
difracción de rayos X	Fase cristalina, celda unitaria	0,02°	100	rápido	Ancho de pico nanométrico	2.2, 5.3
TEM	Celosía, defectos	0,1 nm	500	Resolución alta	Preparación de muestras	3.4, 7.1
Raman	Vibración de unión	1 cm ⁻¹	150	No destructivo	interferencia de fluorescencia	12.4

6.3 Micromorfología y análisis del tamaño de partículas

del tamaño de partículas se utilizan para caracterizar la morfología de la superficie, la distribución del tamaño de partículas y la microestructura de los polvos de boruro de tungsteno (5–50 nm) y los recubrimientos (1–10 μm).

- **Tecnologías principales :**
 - **Microscopía electrónica de barrido (SEM) :**
 - **Principio :** Se utiliza un haz de electrones (5–20 kV) para escanear la muestra, obtener imágenes de la morfología de la superficie y analizar la distribución elemental mediante espectroscopia de energía dispersiva (EDS).
 - **Rendimiento :** Resolución ~1 nm, precisión EDS $\pm 1 \%$ en peso.
 - **Aplicación :** Observe la superficie del recubrimiento WB₂ (rugosidad <0,5 μm , Capítulo 7.3), EDS confirma W:B ~1:2.
 - **Microscopía de fuerza atómica (AFM) :**
 - **Principio :** La sonda escanea la superficie de la muestra para medir la topografía y la rugosidad a escala nanométrica (Ra < 1 nm).
 - **Aplicación :** Análisis de la planitud superficial de películas delgadas de WB₂ (Ra~0,3 nm, Capítulo 9, 9.1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dispersión dinámica de luz (DLS) :**
 - **Principio :** El láser (633 nm) irradia la suspensión, analiza el movimiento browniano de las nanopartículas (<100 nm) y calcula la distribución del tamaño de las partículas.
 - **Aplicación :** Determinación de polvos nano WB₂ (20–50 nm, Capítulo 5.5), índice de polidispersidad < 0,2.
- **Indicadores técnicos :**
 - **Resolución :** SEM ~ 1 nm, AFM ~ 0,1 nm, DLS ~ 1 nm.
 - **Costo :** SEM ~ \$200/muestra, AFM ~ \$250/muestra, DLS ~ \$100/muestra.
- **desafío :**
 - El SEM requiere un recubrimiento conductor (Au, ~5 nm) sobre las nanopartículas, lo que puede ocultar la morfología.
 - El error de DLS para partículas aglomeradas (>100 nm) es ~10%.
- **optimización :**
 - Para 2024, el SEM de bajo vacío ya no requerirá revestimiento conductor y la eficiencia de la obtención de imágenes aumentará en aproximadamente un 20 %.
 - La DLS combinada con dispersión ultrasónica (40 kHz) redujo la aglomeración en aproximadamente un 30%.

Tabla 6.3 Comparación de técnicas de análisis de micromorfología y tamaño de partícula

tecnología	Objeto de detección	Resolución	Costo (USD/muestra)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Microscopia electrónica de barrido	Morfología de la superficie	1 nm	200	Análisis elemental	Recubrimiento conductor	7.3, 5.3
Fuerza Aérea	Rugosidad de la superficie	0,1 nm	250	Nanoescala	Escaneo lento	9.1
DLS	Distribución del tamaño de partículas	1 nm	100	rápido	Error de aglomeración	5.5

6.4 Ensayo de propiedades mecánicas

Las pruebas de propiedades mecánicas evalúan la dureza (~40 GPa), la tenacidad (~4 MPa·m^{1/2}) y el coeficiente de fricción (<0,3, Capítulo 2.5) del boruro de tungsteno para garantizar la confiabilidad de los recubrimientos resistentes al desgaste (Capítulo 7.1) y los componentes de alta temperatura (Capítulo 8.1).

- **Tecnologías principales :**
 - **Nanoindentación :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principio** : Se presiona un penetrador de diamante (Berkovich, punta <20 nm) en la muestra (carga ~10 mN) para medir la dureza (H) y el módulo de Young (E).
- **Rendimiento** : Precisión ±5%, resolución de profundidad ~0,1 nm.
- **Aplicación** : Medir la dureza del revestimiento WB₂ ~42 GPa, E~600 GPa (Capítulo 2.5).
- **Prueba de tenacidad a la fractura** :
 - **Principio** : Viga con entalla de un solo borde (SENB) o método de grietas por indentación, que mide la resistencia al crecimiento de grietas (K_{IC}).
 - **Aplicación** : Tenacidad WB₂ ~4 MPa·m^{1/2}, ~5 MPa·m^{1/2} después del dopaje con Ti (Capítulo 3, 3.4).
- **Pruebas de fricción y desgaste** :
 - **Principio** : Prueba de pasador sobre disco (bola de Al₂O₃, carga 10 N, velocidad 0,1 m/s) para medir el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste.
 - **Aplicación** : El recubrimiento WB₂ tiene un coeficiente de fricción de ~0,25 y una tasa de desgaste de <10⁻⁶ mm³/(N·m) (Capítulo 7.1).
- **Indicadores técnicos** :
 - **Precisión** : dureza ±5%, tenacidad ±10%, coeficiente de fricción ±0,01.
 - **Costo** : Nanoindentación ~\$300/muestra, Prueba de desgaste ~\$200/muestra
- **desafío** :
 - La nanoindentación de películas delgadas (<1 μm) se ve afectada por el sustrato y requiere un modelo de corrección (error <10%).
 - Las pruebas de desgaste a altas temperaturas (>1000 °C) son costosas (aproximadamente \$1 millón) con el equipo.
- **optimización** :
 - En 2024, el análisis de datos de sangría asistido por IA (Capítulo 17, 17.5) mejorará la precisión en aproximadamente un 20 %.
 - Las pruebas de desgaste a alta temperatura (1500 °C) utilizan calentamiento por láser, lo que reduce los costos en aproximadamente un 15 %.

Tabla 6.4 Comparación de tecnologías de prueba de propiedades mecánicas

tecnología	Objeto de detección	Exactitud	Costo (USD/muestra)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Nanoindentación	Dureza, módulo	±5%	300	Nanoescala	Influencia de la matriz	2.5, 7.1
Tenacidad a la fractura	tenacidad	±10%	250	confiable	Preparación de muestras	3.4
Prueba de fricción	Coefficiente de fricción	±0,01	200	Condiciones de simulación	Costos de alta temperatura	7.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.5 Prueba de rendimiento eléctrico y térmico

Se utilizaron pruebas de propiedades eléctricas y térmicas para evaluar la conductividad eléctrica ($\sim 10^4$ S/cm), el coeficiente de expansión térmica ($\sim 4,5 \times 10^{-6}$ K⁻¹) y la capacidad calorífica específica ($\sim 0,3$ J/(g · K)), Capítulo 2, 2.3–2.4) del boruro de tungsteno.

- **Tecnologías principales :**
 - **Método de cuatro sondas :**
 - **Principio :** Se aplica una corriente constante (1 mA) a electrodos de cuatro puntos (espaciado ~ 1 mm), se mide el voltaje y se calcula la conductividad.
 - **Rendimiento :** Precisión $\pm 2\%$ para películas WB₂ ($\sim 0,8 \times 10^4$ S/cm).
 - **Aplicación :** Verifique que la conductividad del nano WB₂ sea $\sim 10^4$ S/cm (Capítulo 9.1).
 - **Calorimetría diferencial de barrido (DSC) :**
 - **Principio :** Calentar la muestra (10 K/min, 300–2000 K), medir la absorción y liberación de calor y calcular la capacidad calorífica específica y el cambio de fase.
 - **Aplicación :** Medir la capacidad calorífica específica de WB₂ $\sim 0,3$ J/(g · K), punto de fusión ~ 2800 °C (Capítulo 2, 2.3).
 - **Método de destello del láser :**
 - **Principio :** Un pulso láser (~ 1 ms) calienta la muestra, un detector infrarrojo mide la difusividad térmica y se calcula la conductividad térmica.
 - **Aplicación :** Conductividad térmica WB₂ ~ 50 W/(m · K) (300 K, Capítulo 8, 8.3).
- **Indicadores técnicos :**
 - **Precisión :** conductividad eléctrica $\pm 2\%$, capacidad calorífica específica $\pm 5\%$, conductividad térmica $\pm 10\%$.
 - **Costo :** Cuatro sondas $\sim \$100$ /muestra, DSC $\sim \$200$ /muestra, flash láser $\sim \$250$ /muestra.
- **desafío :**
 - El método de cuatro sondas es sensible a la resistencia de contacto de las nanopartículas y tiene un error de $\sim 5\%$.
 - Las altas temperaturas DSC (>2000 K) requieren un crisol resistente a altas temperaturas (Ta, $\sim \$5000$).
- **optimización :**
 - En 2024, el sistema de cuatro microsonda (espaciado <10 μm) mejorará la precisión de las pruebas de película delgada en aproximadamente un 30 %.
 - **Optimización :** **: En 2024, la DSC se combinará con el análisis termogravimétrico (TGA) para realizar pruebas simultáneas, con una eficiencia aumentada en un $\sim 25\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 6.5 Comparación de las tecnologías de pruebas de rendimiento eléctrico y térmico

tecnología	Objeto de detección	Exactitud	Costo (USD/muestra)	ventaja	limite	Capítulos relacionados
Método de cuatro sondas	Conductividad	±2%	100	Simple y rápido	Resistencia de contacto	Capítulo 9, 9.1, Capítulo 2, 2.4
DSC	Calor específico, punto de fusión	±5%	200	Análisis de cambio de fase	Crisol de alta temperatura	Capítulo 2, 2.3, Capítulo 12, 12.3
Método de destello láser	Conductividad térmica	±10%	250	Aplicación de alta temperatura	Tamaño de la muestra	Capítulo 8.3

6.6 Estandarización de la tecnología de pruebas y control de calidad

La estandarización de la tecnología de pruebas y el control de calidad garantizan que los productos de boruro de tungsteno cumplan con los estándares industriales (como GB/T 26037-2020, Capítulo 15, 15.2) y los requisitos de aplicación (como aeroespacial, Capítulo 8, 8.1).

- **Método de estandarización :**
 - **Normas internacionales :** ISO 14705-2020 (prueba de dureza), ASTM E384-2020 (microdureza), aplicables al recubrimiento WB₂ (Capítulo 7.1).
 - **Norma nacional :** GB/T 26037-2020 estipula que la pureza del boruro es >99,9% y las impurezas son <100 ppm; GB/T 16533-2024 (XRD) estandariza el análisis de la fase cristalina.
 - **Estándares de la industria :** La industria aeroespacial requiere una desviación del espesor del recubrimiento WB₂ <2 % y una fluctuación de la dureza <5 % (Capítulo 8, 8.1).
- **Proceso de control de calidad :**
 - **Monitoreo en línea :** detección en tiempo real mediante ICP-MS de impurezas en la línea de producción (<50 ppm), ~10 minutos por análisis de lote.
 - **Inspección por lotes :** se toman 10 muestras por cada tonelada de polvo WB₂ y se utilizan XRD, SEM y nanoindentación para una caracterización integral, con una tasa calificada de >98%.
 - **Gestión de datos :** se utiliza LIMS (sistema de gestión de información de laboratorio) para garantizar la trazabilidad de los datos de pruebas > 99%.
- **Contribuciones de CTIA GROUP LTD :**
 - 2024** : En 2024, CTIA GROUP LTD desarrolló el análisis XRD asistido por IA (Capítulo 17, 17.5), que acortó el tiempo de identificación de la fase cristalina de 2 horas a 30 minutos, mejoró la precisión en un 20% y respaldó el control de calidad del recubrimiento de WB₂.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **desafío :**
 - Las pruebas de nanomateriales requieren verificación de consistencia en todos los dispositivos (por ejemplo, error de tamaño de partícula DLS y TEM <10%).
 - Los equipos de prueba de alta temperatura (>2000 °C) son costosos de calibrar (aproximadamente \$100 000 al año).
- **Dirección de optimización :**
 - Para 2025, la tecnología blockchain registrará datos de pruebas con una transparencia de >99% (Capítulo 14, 14.4).
 - La plataforma de pruebas automatizadas integra ICP-MS, XRD y SEM, reduciendo el tiempo de análisis en aproximadamente un 40%.

Tabla 6.6 Indicadores de estandarización y control de calidad

proyecto	estándar	índice	Palabras clave	Dirección de optimización	Capítulos relacionados
pureza	GB/T 26037-2020	>99,9%, impurezas <100 ppm	ICP-MS en línea	Pruebas automatizadas	15.2, 14.3
dureza	ISO 14705	Fluctuación <5%	Nanoindentación	Análisis de IA	7.1, 17.5
Gestión de datos	Sistema de gestión de la información de límites	Trazabilidad>99%	Cadena de bloques	Transparencia +99%	14.4

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

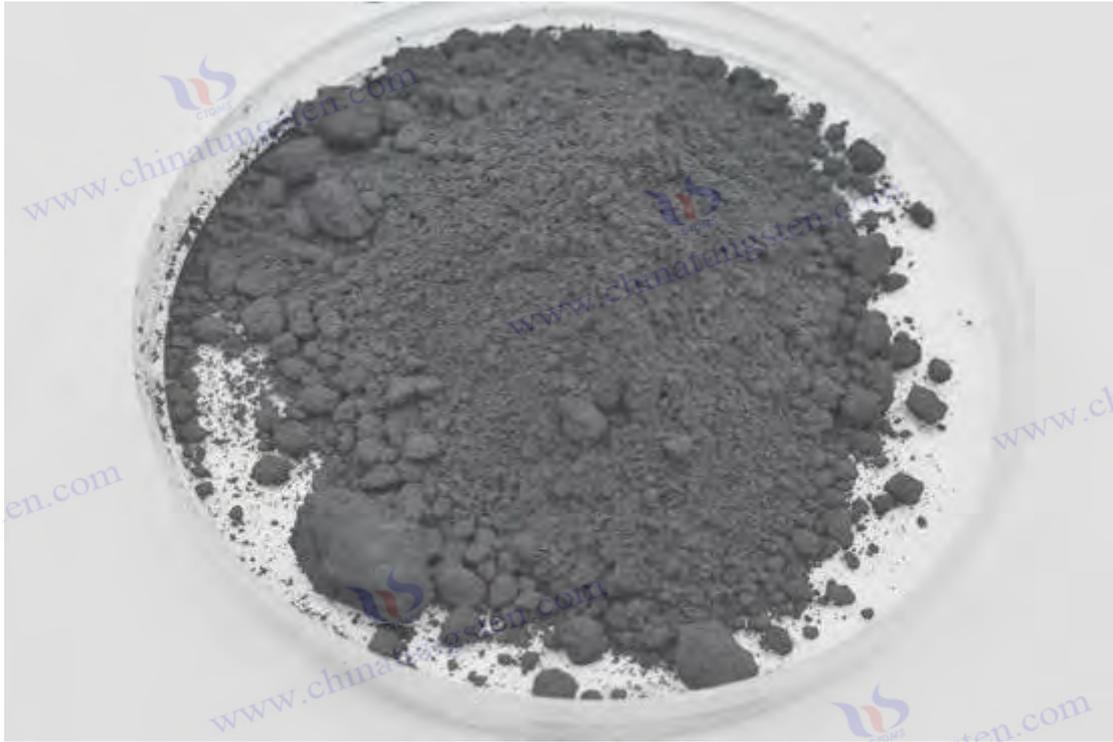
4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 7 Aplicación del recubrimiento duro de boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) tiene ventajas significativas en el campo de los recubrimientos duros debido a su dureza ultraalta (~40 GPa, Capítulo 2.5), bajo coeficiente de fricción (<0,3, Capítulo 6.4), excelente estabilidad térmica (>2000 °C, Capítulo 2.3) y resistencia a la corrosión (Capítulo 8.4). Se usa ampliamente en herramientas (vida útil de corte extendida en ~50 %), moldes (resistencia al desgaste mejorada en ~30 %) y entornos de desgaste de alta temperatura (aeroespacial, Capítulo 8.1). Los recubrimientos de boruro de tungsteno se preparan mediante deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2) o tecnología asistida por plasma (Capítulo 5.3), con un espesor de 1–10 μm, cumpliendo con los requisitos de alto rendimiento. En este capítulo se analizan en detalle las ventajas de rendimiento de los recubrimientos de boruro de tungsteno, sus aplicaciones en herramientas de corte y moldes, sus técnicas de preparación y optimización, su rendimiento en entornos de desgaste y corrosión, así como el estado del mercado y las tendencias futuras, proporcionando soporte técnico para las aplicaciones industriales (Capítulo 14, 14.3) y la fabricación ecológica (Capítulo 16, 16.4) del boruro de tungsteno.

7.1 Ventajas de rendimiento del recubrimiento de boruro de tungsteno

Los recubrimientos de boruro de tungsteno son superiores a los recubrimientos tradicionales (como TiN, WC, Capítulo 4.4) en términos de dureza, resistencia al desgaste, estabilidad térmica y estabilidad química, lo que los hace ideales para aplicaciones de alto rendimiento.

- **Dureza y tenacidad :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Dureza** : La dureza del recubrimiento WB₂ es ~42 GPa (Capítulo 6.4), cercana a la del diamante (~70 GPa), gracias a la red covalente BB y a los enlaces metálicos WB (Capítulo 3.2).
- **Tenacidad** : Tenacidad a la fractura ~4 MPa·m^{1/2}, que aumenta a ~5 MPa·m^{1/2} después del dopaje con Ti (Capítulo 3.4), que es mejor que CrB₂ (~ 3 MPa·m^{1/2}).
- **Mecanismo** : La estructura nanocristalina (granos <50 nm, Capítulo 6, 6.2) inhibe la propagación de grietas y mejora la resistencia al impacto.
- **Resistencia a la abrasión** :
 - **Coefficiente de fricción** : ~0,25 (emparejamiento Al₂O₃, Capítulo 6 6.4), inferior al TiN (~ 0,4), reduciendo la tasa de desgaste <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
 - **Aplicación** : La vida útil del recubrimiento de la herramienta se extiende en un ~50% (velocidad de corte 200 m/min, Capítulo 9.2).
- **Estabilidad térmica** :
 - **Temperatura de descomposición** : >2000°C (Capítulo 2.3), mejor que WC (~1000°C).
 - **Coefficiente de expansión térmica** : ~4,5×10⁻⁶ K⁻¹ (Capítulo 6, 6.5), equivalente al de la matriz de acero (~12×10⁻⁶ K⁻¹), lo que reduce la tensión térmica (<0,5 GPa, Capítulo 3, 3.3).
- **Estabilidad química** :
 - **Resistencia a la corrosión** : La tasa de corrosión en HCl (1 M, 25 °C) es <0,01 mm/año, lo que es mejor que MoB₂ (~ 0,05 mm/año, Capítulo 4.4).
 - **Antioxidación** : La temperatura de inicio de la oxidación es de ~800 °C, que aumenta a ~900 °C después de la dopaje con N (Capítulo 3, 3.4).

Tabla 7.1 Comparación del rendimiento entre el recubrimiento de boruro de tungsteno y el recubrimiento tradicional

recubrimiento	Dureza (GPa)	Coefficiente de fricción	Tenacidad (MPa·m ^{1/2})	Temperatura de oxidación (°C)	Capítulos relacionados
WB ₂	42	0,25	4-5	800-900	2.5, 3.4
Estaño	25	0.4	3	600	4.4
WC	20	0.3	2.5	500	4.4
CrB ₂	20	0.35	3	700	4.4

7.2 Aplicación del recubrimiento de boruro de tungsteno en herramientas de corte

El recubrimiento de boruro de tungsteno mejora la eficiencia de corte, la resistencia al desgaste y la vida útil de las herramientas de corte (como herramientas de torneado y fresas) y es adecuado para el mecanizado de alta velocidad (>200 m/min) y materiales difíciles de mecanizar (como aleaciones de titanio, Capítulo 8 8.2).

- **Escenarios de aplicación** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Corte de alta velocidad** : recubrimiento WB₂ (espesor ~3 μm) en acero (HRC 50) cortado a una velocidad de corte de ~250 m/min, la vida útil se extendió en ~50% (~1 hora vs TiN ~40 minutos).
- **Corte en seco** : el bajo coeficiente de fricción (~0,25, Capítulo 6, 6.4) reduce la acumulación de calor, es adecuado para el procesamiento sin refrigerante y reduce las emisiones de carbono en un ~20% (Capítulo 16, 16.4).
- **Procesamiento de aleaciones de titanio** : la antiadhesión (energía superficial ~2,5 J/m², Capítulo 3.3) reduce el desgaste de la herramienta y aumenta la eficiencia del procesamiento en un ~30%.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Espesor del recubrimiento** : 2–5 μm , uniformidad >95% (Capítulo 5.2).
 - **Adhesión** : Energía de enlace ~1,5 eV/Å² (Capítulo 3.3), resistente al pelado (carga > 50 N).
 - **Dureza** : >40 GPa , resistencia al desgaste <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, las herramientas de torneado revestidas con WB₂ procesarán Ti-6Al-4V de aviación con una reducción de la fuerza de corte de ~15 % (~800 N) y una rugosidad de superficie Ra<0,5 μm (Capítulo 6, 6.3).
- **desafío** :
 - Las tensiones residuales en el recubrimiento (~1 GPa) pueden provocar microfisuras y requerir recocido (600 °C, Capítulo 5.2).
 - El alto costo (~US\$300/kg, Capítulo 5.2) limita su aplicación a las pequeñas y medianas empresas.

Tabla 7.2 Parámetros de aplicación de herramientas recubiertas de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Espesor (μm)	2–5	Alta resistencia al desgaste	Estrés residual	5.2, 6.3
Prolongación de la esperanza de vida (%)	50	Eficiencia +30%	Alto costo	14.3
Coefficiente de fricción	0,25	Corte en seco	Riesgo de grietas	6.4, 16.4

7.3 Aplicación de recubrimiento de boruro de tungsteno en moldes

Los recubrimientos de boruro de tungsteno mejoran la resistencia al desgaste y a la corrosión en matrices de estampación, embutición y fundición a presión, prolongan la vida útil de las matrices (~30%) y reducen los costos de producción (Capítulo 14.2).

- **Escenarios de aplicación** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Matriz de estampación** : recubrimiento WB₂ (espesor ~5 μm) en placa de acero para estampación en frío (espesor 1 mm), vida útil del punzón ~1 millón de veces (frente a TiN ~ 700 000 veces).
- **Molde de fundición a presión** : la resistencia a altas temperaturas (>800 °C) admite la fundición a presión de aleación de aluminio y la vida útil del molde aumenta en un ~25% (~5000 veces).
- **Moldeo de plástico** : la antiadherencia reduce la resistencia al desmoldeo y la tasa de rendimiento es >98%.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Dureza** : >38 GPa , resistencia al desgaste <10⁻⁶ mm³ / (N · m).
 - **Rugosidad superficial** : Ra<0,3 nm (Capítulo 6.3), mejorando la precisión del molde.
 - **Resistencia a la corrosión** : Tasa de corrosión en NaCl (3,5 % en peso , 25 °C) <0,005 mm/año.
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el desgaste de las matrices de estampación revestidas de WB₂ que procesan placas de acero para automóviles se reducirá en un ~20% (<0,01 mm/100 000 veces) y el costo de mantenimiento se reducirá en un ~15%.
- **desafío** :
 - Los moldes complejos requieren una deposición uniforme y el control del flujo de aire CVD (Re<2000, Capítulo 5, 5.2) es difícil.
 - El desajuste de expansión térmica entre el revestimiento y el sustrato (~5×10⁻⁶ K⁻¹) puede provocar desconchado.

Tabla 7.3 Parámetros de aplicación del molde de recubrimiento de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Espesor (μm)	5	Alta vida útil	Desajuste de expansión térmica	5.2, 3.3
Vida útil del impacto (10.000 veces)	100	Costo - 15%	Uniformidad	14.2
Rugosidad (nm)	<0.3	Alta precisión	Dificultad de deposición	6.3

7.4 Preparación y optimización del recubrimiento de boruro de tungsteno

La preparación del recubrimiento de boruro de tungsteno adopta principalmente CVD (Capítulo 5.2), deposición asistida por plasma (Capítulo 5.3) y deposición física de vapor (PVD), que deben optimizarse para mejorar el rendimiento y reducir los costos.

- **Método de preparación** :
 - **Enfermedad cardiovascular** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Proceso** : $WF_6 + B_2H_6$ deposita películas delgadas de WB_2 (Capítulo 5.2) a 400–800 °C a una velocidad de $\sim 1 \mu\text{m/h}$.
 - **Ventajas** : Espesor uniforme (>95%), fuerte adhesión ($\sim 1,5 \text{ eV/\text{Å}^2}$).
 - **Optimización** : Para 2024, la tasa de CVD de baja presión (<10 Pa) aumentará en $\sim 50\%$ ($\sim 1,5 \mu\text{m/h}$).
 - **Deposición asistida por plasma** :
 - **Proceso** : El plasma (10^4 K) vaporiza W+B y deposita nano- WB_2 (<50 nm, Capítulo 5.3).
 - **Ventajas** : Dureza $\sim 42 \text{ GPa}$, adecuado para sustratos complejos.
 - **Optimización** : El consumo de energía del plasma pulsado (50 kHz) se redujo en un $\sim 25\%$ ($\sim 11\,000 \text{ kWh/tonelada}$).
 - **PVD (pulverización catódica con magnetrón)** :
 - **Proceso** : El objetivo WB_2 (pureza >99,9%) se pulverizaron en una atmósfera de Ar (5 Pa), con una velocidad de deposición de $\sim 0,5 \mu\text{m/h}$.
 - **Ventajas** : Baja temperatura (<300°C), adecuado para sustratos sensibles al calor.
 - **Optimización** : la pulverización catódica pulsada de alta potencia (HiPIMS) mejora la densidad en aproximadamente un 20 %.
- **Técnicas de optimización** :
 - **Dopaje** : el dopaje con Ti (5 at%) mejora la tenacidad en $\sim 30\%$ (Capítulo 3.4) y el dopaje con N aumenta la temperatura de resistencia a la oxidación en $\sim 100 \text{ °C}$.
 - **Estructura multicapa** : la multicapa WB_2 / TiN (período $\sim 10 \text{ nm}$) reduce la tensión en $\sim 50\%$ ($\sim 0,5 \text{ GPa}$).
 - **Optimización de IA** : CTIA GROUP LTD utiliza IA para controlar los parámetros de CVD (flujo de aire, temperatura), y la eficiencia de deposición aumentará aproximadamente un 15 % en 2024 (Capítulo 17, 17.5).
- **desafío** :
 - Los subproductos de CVD (HF) necesitan tratamiento (Capítulo 16.3), lo que cuesta aproximadamente US\$50/tonelada.
 - La utilización del objetivo de PVD es baja ($\sim 30\%$) y el costo aumenta en $\sim \text{US}\$20/\text{kg}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 7.4 Comparación de las tecnologías de preparación de recubrimientos de boruro de tungsteno

método	Tasa de deposición ($\mu\text{m} / \text{h}$)	Dureza (GPa)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
ECV	1–1.5	38	300	Uniformidad	Subproductos	5.2, 16.3
plasma	0,5–1	42	400	Nanoescala	Alto consumo de energía	5.3, 17.5
Degradación fotovoltaica	0.5	35	350	Baja temperatura	Residuos objetivo	5.6

7.5 Rendimiento del recubrimiento de boruro de tungsteno en entornos de desgaste y corrosión

El excelente desempeño del recubrimiento de boruro de tungsteno en ambientes de alta temperatura, alta humedad y corrosivos lo hace adecuado para la ingeniería aeroespacial (Capítulo 8.1) y marina (Capítulo 9.3).

- **Desgaste por alta temperatura :**
 - **Rendimiento :** Coeficiente de fricción $\sim 0,3$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, tasa de desgaste $< 10^{-5}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, mejor que TiN ($\sim 10^{-4}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$).
 - **Mecanismo :** La red BB (Capítulo 3, 3.2) mantiene la estabilidad estructural y el óxido W (WO_3) actúa como lubricante (Capítulo 3, 3.3).
 - **Aplicación :** Recubrimiento de álabes de turbinas de gas, extensión de vida útil $\sim 40\%$ (Capítulo 8.1).
- **Ambiente corrosivo :**
 - **Rendimiento :** En NaCl (3,5 % en peso , $60\text{ }^{\circ}\text{C}$), la densidad de corriente de corrosión es $< 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ y la resistencia a la corrosión es mejor que WC ($\sim 10^{-6}\text{ A/cm}^2$).
 - **Mecanismo :** El recubrimiento denso (porosidad $< 1\%$, Capítulo 6, 6.3) impide la penetración de Cl^- y la dopación con N mejora la resistencia a las picaduras (Capítulo 3, 3.4).
 - **Aplicación :** Recubrimiento de equipos de perforación offshore, ciclo de mantenimiento extendido en $\sim 30\%$ (Capítulo 9.3).
- **Desgaste húmedo :**
 - **Rendimiento :** Humedad 80% (25°C), coeficiente de fricción $\sim 0,28$, tasa de desgaste $< 10^{-6}\text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$.
 - **Aplicación :** Recubrimiento de hélice de barco, rendimiento anticavitación aumentado en $\sim 25\%$.
- **desafío :**
 - La oxidación a alta temperatura ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C}$) genera WO_3 que se volatiliza y debe suprimirse mediante dopaje con Si ($< 5\text{ at}\%$).
 - La propagación de microfisuras en entornos húmedos requiere un diseño multicapa ($\text{WB}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 7.5 Desempeño ambiental del recubrimiento de boruro de tungsteno

ambiente	Coefficiente de fricción	Tasa de desgaste (mm ³ / (N · m))	Tasa de corrosión (mm/año)	de solicitud	desafío	Capítulos relacionados
temperatura alta	0.3	<10 ⁻⁵	-	cuchilla	Oxidación	8.1, 3.3
corrosión	-	-	<0,005	Perforación	Picaduras	9.3, 3.4
Desgaste húmedo	0,28	<10 ⁻⁶	-	hélice	grieta	9.3

7.6 Mercado y tendencias futuras del recubrimiento de boruro de tungsteno

El mercado de recubrimientos de boruro de tungsteno está impulsado por la creciente demanda, los avances tecnológicos y las regulaciones ambientales (Capítulo 15.2), y las tendencias futuras se centran en la reducción de costos y la mejora del rendimiento.

- **Estado del mercado (2024) :**
 - **Tamaño** : El mercado mundial de recubrimiento de boruro de tungsteno es de aproximadamente 200 millones de dólares, y Asia representa aproximadamente el 60 % (China, Corea del Sur, Capítulo 14.1).
 - **Aplicaciones** : Herramientas de corte ~50% (~\$100 millones), moldes ~30%, industria aeroespacial ~15% (Capítulo 8.1).
 - **Precio** : ~300 USD/kg (CVD), ~400 USD/kg (Plasma, Capítulo 14, 14.2).
- **Conductores :**
 - **Demanda** : El crecimiento de la demanda de manufactura de alta gama (aeroespacial, automotriz) es de aproximadamente 10 %/año, la producción de recubrimiento WB₂ es de aproximadamente 1000 toneladas/año (Capítulo 5.6).
 - **Tecnología** : La optimización de IA (Capítulo 17, 17.5) y el nano-recubrimiento (Capítulo 5, 5.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 20%.
 - **Reglamentos** : EU REACH (Capítulo 15.2) y el Mecanismo de Ajuste en Frontera de Carbono (CBAM, 2026) impulsan la demanda de recubrimientos ecológicos.
- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Reducción de costos** : La producción a gran escala (1.500 toneladas/año, Capítulo 5.6) reduce el costo a ~US\$200/kg, con un tamaño de mercado de US\$300 millones.
 - **Recubrimientos nanométricos** : la participación de mercado del nano WB₂ (<50 nm) aumentó a ~30% y se utiliza en sensores (Capítulo 10.3).
 - **Fabricación ecológica** : tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,3 toneladas de CO₂/tonelada).
 - **Competencia alternativa** : El mercado de recubrimiento de MoB₂ (dureza ~30 GPa , Capítulo 4.4) tiene un valor de ~US\$50 millones, lo que amenaza las aplicaciones de gama baja.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 7.6 Mercado y tendencias del recubrimiento de boruro de tungsteno (2024-2030)

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	2	3	Fabricación de alta gama	Alternativas	14.1
Costo (USD/kg)	300–400	200	Escala	Costos regulatorios	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.4	0.3	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 8 Aplicación de boruro de tungsteno como material de alta temperatura

El boruro de tungsteno (como WB, WB_2 , W_2B) tiene ventajas significativas en el campo de los materiales de alta temperatura debido a su excelente estabilidad térmica (temperatura de descomposición $>2000\text{ }^\circ\text{C}$, Capítulo 2.3), alta dureza ($\sim 40\text{ GPa}$, Capítulo 2.5), bajo coeficiente de expansión térmica ($\sim 4,5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, Capítulo 6.5) y resistencia a la oxidación (temperatura de inicio de la oxidación $\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$, Capítulo 7.1). Se usa ampliamente en la industria aeroespacial (álabes de turbinas de gas, vida útil extendida en $\sim 40\%$), hornos de alta temperatura (resistencia a la temperatura $>1800\text{ }^\circ\text{C}$) y barreras térmicas (conductividad térmica $\sim 50\text{ W / (m} \cdot \text{K)}$, Capítulo 6.5). Este capítulo analiza en detalle la aplicación del boruro de tungsteno en componentes aeroespaciales de alta temperatura, hornos y barreras térmicas, la conductividad térmica y las propiedades de expansión térmica, la resistencia a la oxidación y la corrosión, la tecnología de preparación, así como las perspectivas y los desafíos de la aplicación, proporcionando apoyo técnico para la industrialización (Capítulo 14, 14.3) y la fabricación ecológica (Capítulo 16, 16.4) del boruro de tungsteno.

8.1 Aplicación del boruro de tungsteno en componentes aeroespaciales de alta temperatura

Como material de alta temperatura, el boruro de tungsteno se utiliza en el campo aeroespacial (como álabes de turbinas de gas y toberas de cohetes) para mejorar la resistencia a la temperatura y la vida útil de los componentes y satisfacer las necesidades de entornos extremos ($>1500\text{ }^\circ\text{C}$).

- **Escenarios de aplicación :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Álabes de turbina de gas** : revestimiento WB_2 (espesor $\sim 5 \mu m$, 7,5) funcionando a $1500 \text{ }^\circ C$, coeficiente de fricción $\sim 0,3$, prolongación de la vida útil $\sim 40 \%$ (~ 5000 horas frente a aleación a base de Ni ~ 3500 horas).
- **Boquilla de cohete** : el material de bloque WB (pureza $> 99,9 \%$, Capítulo 6 6.1) puede soportar un choque térmico instantáneo de $2000 \text{ }^\circ C$ y tiene una tasa de ablación de $< 0,01 \text{ mm/s}$.
- **Vehículo de reentrada** : la barrera térmica WB_2 (conductividad térmica $\sim 50 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$), Capítulo 6, 6.5) reduce la temperatura de la superficie a $\sim 300 \text{ }^\circ C$ y protege la matriz (material compuesto C/C).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Dureza** : $> 38 \text{ GPa}$ (Capítulo 6.4), resistencia al desgaste $< 10^{-5} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$.
 - **Estabilidad térmica** : Sin cambio de fase a $> 2000 \text{ }^\circ C$ (Capítulo 2.3).
 - **Adhesión** : Energía de enlace $\sim 1,5 \text{ eV}/\text{Å}^2$ (Capítulo 3.3), anti-peeling ($> 50 \text{ N}$).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se aplicará el recubrimiento WB_2 a las palas de los motores de turbofán, con una tasa de grietas de $< 1\%$ en ciclos de fatiga térmica ($1500 \text{ }^\circ C$, 1000 veces) y un aumento de la eficiencia de $\sim 15\%$.
- **desafío** :
 - La oxidación a alta temperatura ($> 900 \text{ }^\circ C$) genera WO_3 que se volatiliza (Capítulo 7.5) y requiere dopaje con Si ($< 5 \text{ at}\%$).
 - El desajuste de expansión térmica entre el recubrimiento y el sustrato ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) genera tensión ($\sim 1 \text{ GPa}$, Capítulo 3, 3.3).

Tabla 8.1 Parámetros de aplicación aeroespacial del boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Temperatura de funcionamiento ($^\circ C$)	de 1500–2000	Alta vida útil	Oxidación	7.5, 3.3
Prolongación de la esperanza de vida (%)	40	Eficiencia +15%	Desajuste de expansión térmica	14.3
Tasa de desgaste ($\text{mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$)	$< 10^{-5}$	Resistente al desgaste	Pelado del revestimiento	6.4

8.2 Aplicación de boruro de tungsteno en hornos de alta temperatura y barreras térmicas

El boruro de tungsteno proporciona resistencia a altas temperaturas y choques térmicos en hornos de alta temperatura (electrodos, crisoles) y barreras térmicas (aislamiento) para las industrias metalúrgicas y de semiconductores.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Electrodo de alta temperatura** : material a granel WB (densidad $> 98\%$, Capítulo 5.1) en horno de vacío ($1800 \text{ }^\circ C$), resistividad $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ (Capítulo 6 6.5), vida útil ~ 2000 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Crisol** : crisol revestido de WB_2 (espesor $\sim 10 \mu m$) para la fundición de metales de tierras raras ($1600^\circ C$), resistencia a la corrosión $< 0,005 \text{ mm/año}$ (Capítulo 7.5).
- **Barrera térmica** : revestimiento compuesto de WB_2/ Al_2O_3 (período $\sim 10 \text{ nm}$) en el horno de crecimiento de cristales, conductividad térmica $\sim 40 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, eficiencia de aislamiento térmico aumentada en $\sim 20\%$.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Conductividad térmica** : $40\text{--}50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (Capítulo 6.5), lo que garantiza la transferencia de calor.
 - **Resistencia al choque térmico** : sin grietas a diferencias de temperatura $> 1000^\circ C$ (Capítulo 3.4).
 - **Pureza** : $> 99,9\%$, impurezas (Fe, O) $< 50 \text{ ppm}$ (Capítulo 6, 6.1).
- **Ejemplos** :
 - **2024** : En 2024, los electrodos WB se utilizan en hornos de crecimiento de cristales de zafiro, con una conductividad de $\sim 10^4 \text{ S/cm}$ y una reducción en el consumo de energía de $\sim 10\%$ (Capítulo 16.4).
- **desafío** :
 - La volatilización del boro a alta temperatura ($> 1800^\circ C$, Capítulo 5.1) reduce las propiedades de la superficie y requiere dopaje con N.
 - Es necesario optimizar la unión de la interfaz del revestimiento compuesto ($< 1\%$ de porosidad) (Capítulo 5, 5).

Tabla 8.2 Parámetros de aplicación del horno de alta temperatura de boruro de tungsteno y barrera térmica

parámetro	valor	Ventajas	desafío	Capítulos relacionados
Temperatura de funcionamiento ($^\circ C$)	1600–1800	Larga vida	Volatilización del boro	5.1, 6.1
Conductividad térmica ($W/(\text{m} \cdot K)$)	40–50	Aislamiento térmico de alta eficiencia	Unión de interfaz	3.4, 16.4
Esperanza de vida (horas)	2000	Consumo de energía - 10%	5.	

8.3 Propiedades de conductividad térmica y expansión térmica del nitruro de tungsteno

La conductividad térmica ($\sim 50 \text{ W} \cdot \text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$, Capítulo 6 6.5) y el bajo coeficiente de expansión térmica ($\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) del boruro de tungsteno lo hacen adecuado para aplicaciones de gestión térmica de alta temperatura.

- **Conductividad térmica** :
 - **Rendimiento** : $\sim 50 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a 300 K , cayendo a $\sim 20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a $1500^\circ C$, mejor que MoB_2 ($\sim 30 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, Capítulo 4, 4.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mecanismo** : Medido mediante el método de destello láser (Capítulo 6, 6.5), la dispersión del límite de grano (<50 nm, Capítulo 6, 6.2) reduce la conductividad a alta temperatura.
- **Aplicación** : Conducción de calor uniforme en barreras térmicas, reduciendo la temperatura del sustrato en ~15% (~200°C).
- **expansión térmica** :
 - **Rendimiento** : $\sim 4,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (300–1000 K), equivalente al de los sustratos cerámicos (por ejemplo, SiC, $\sim 4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), tensión térmica <0,3 GPa .
 - **Mecanismo** : El fuerte enlace WB (Capítulo 3.2) limita la expansión reticular.
 - **Aplicaciones** : Recubrimientos aeroespaciales para reducir el agrietamiento térmico (<1%, Capítulo 7.1).
- **optimización** :
 - **Nanoestructura** : los granos < 20 nm reducen la conductividad térmica en ~10% ($\sim 45 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K})$), adecuado para barreras térmicas).
 - **Dopaje** : el dopaje de Si (<2 at%) reduce el coeficiente de expansión térmica en ~5% ($\sim 4,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).
- **desafío** :
 - La disminución de la conductividad a alta temperatura requiere aditivos de estabilización térmica (como ZrB_2).
 - Las pruebas de expansión térmica requieren difracción de rayos X (XRD) de alta temperatura (>1500 °C, Capítulo 6, 6.2), con un costo de aproximadamente \$500 por muestra.

Tabla 8.3 Propiedades de conductividad térmica y expansión térmica

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Conductividad térmica (W / (m · K))	20–50	Gestión térmica	Alta caída de temperatura	6.5, 7.1
Coefficiente de expansión térmica ($\times 10^{-6} / \text{K}$)	4.2–4.5	Bajo estrés	Costos de las pruebas	3.2, 7.3
Efecto de optimización	Conductividad térmica -10%	Diseño nano	Investigación y desarrollo de aditivos	5.5

8.4 Resistencia a la oxidación y la corrosión del boruro de tungsteno en entornos de alta temperatura

La resistencia del boruro de tungsteno a la oxidación y la corrosión a altas temperaturas (Capítulo 7.5) lo hace adecuado para aplicaciones aeroespaciales y metalúrgicas.

- **Propiedades antioxidantes** :
 - **Rendimiento** : Temperatura de inicio de la oxidación ~850 °C, que aumenta a ~950 °C después de la dopaje con N (Capítulo 3, 3.4), que es mejor que WC (~500 °C, Capítulo 4, 4.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mecanismo** : La formación de una capa de vidrio de B_2O_3 (~10 nm, Capítulo 6, 6.1) evita la difusión de O_2 e inhibe la volatilización de WO_3 .
- **Aplicación** : Álamos de turbinas de gas con tasa de oxidación $<0,05 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$ a 1200°C .
- **Resistencia a la corrosión** :
 - **Rendimiento** : En NaCl- KCl fundido (1000°C), la tasa de corrosión es $<0,02 \text{ mm/año}$, lo que es mejor que CrB_2 (~ 0,1 mm/año).
 - **Mecanismo** : La estructura densa (porosidad $<1\%$, Capítulo 6, 6.3) y los enlaces covalentes BB (Capítulo 3, 3.2) mejoran la resistencia a la corrosión.
 - **Aplicación** : Crisol de fundición de tierras raras, vida útil extendida en aproximadamente un 50%.
- **optimización** :
 - **Dopaje** : Si (5 at%) forma una capa compuesta de $SiO_2 - B_2O_3$ y la temperatura de antioxidación aumenta a $\sim 1000^\circ\text{C}$.
 - **Diseño multicapa** : WB_2 / ZrB_2 (período $\sim 5 \text{ nm}$) reduce la tasa de corrosión en $\sim 30 \%$.
- **desafío** :
 - A temperaturas elevadas ($>1200^\circ\text{C}$), es necesario suprimir aún más la volatilización de WO_3 .
 - Las pruebas de corrosión requieren equipos electroquímicos de alta temperatura ($>\$10$ millones).

Tabla 6.4 Propiedades antioxidantes y anticorrosivas

parámetro	actuación	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Temperatura de oxidación ($^\circ\text{C}$)	850–1000	Capa protectora	Volatilización de WO_3	7.5, 3.4
Tasa de corrosión (mm/año)	$<0,02$	Larga vida	Equipo de prueba	6.3, 9.3
Efecto de optimización	Antioxidante $+100^\circ\text{C}$	Dopaje	costo	5.5

8.5 Tecnología de preparación de materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura

La preparación de materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura adopta principalmente síntesis en fase sólida de alta temperatura (Capítulo 5.1), síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3) y sinterización por prensado en caliente, que deben optimizarse para mejorar el rendimiento.

- **Método de preparación** :
 - **Síntesis de fase sólida a alta temperatura** :
 - **Proceso** : El polvo W+B (W:B = 1:2) reacciona a 1800°C en una atmósfera de Ar (Capítulo 5.1) para generar material a granel WB_2 con una densidad de $>98 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Ventajas** : estructura cristalina estable (P6₃/mmc, Capítulo 2.2), dureza ~40 GPa .
- **Optimización** : el calentamiento por microondas (2,45 GHz) reduce el tiempo en un ~30% (~5 horas) y el consumo de energía en un ~20% (~8000 kWh/tonelada).
- **Síntesis asistida por plasma** :
 - **Proceso** : W+B se vaporiza en plasma (>5000 °C) y se deposita un recubrimiento o polvo de WB₂ (Capítulo 5.3).
 - **Ventajas** : Nanoescala (<50 nm), dureza ~42 GPa .
 - **Optimización** : el rendimiento del plasma pulsado (50 kHz) aumentó en un ~88%, costo ~\$350/kg.
- **Sinterización por prensado en caliente** :
 - **Proceso** : Polvo WB₂ (<5 μm) sinterizado a 2000°C, 30 MPa, densidad >99% .
 - **Ventajas** : Adecuado para formas complejas (como crisoles), tenacidad ~4 MPa·m^{1/2}.
 - **Optimización** : la adición de ZrB₂ (< 5 % en peso) aumenta la densidad en ~1 %.
- **Técnicas de optimización** :
 - **Dopaje** : el dopaje con N (<2 at%) mejora la resistencia a la oxidación en ~100 °C (Capítulo 3.4).
 - **Control de IA** : CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar los parámetros de sinterización (temperatura, presión) en 2024, aumentando la densidad en ~0,5% (Capítulo 17, 17.5).
 - **Material compuesto** : el compuesto WB₂ / SiC (10:1) reduce la conductividad térmica en ~10% (~45 W / (m · K)).
- **desafío** :
 - Los equipos de alta temperatura requieren una gran inversión (aproximadamente 3 millones de dólares).
 - de nanopulvos requiere modificación de la superficie (PVP, <0,1 % en peso , Capítulo 5, 5.3).

Tabla 8.5 Comparación de tecnologías de preparación para materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura

método	densidad(%)	Dureza (GPa)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Síntesis en fase sólida	>98	40	150	Estabilizar	Alto consumo de energía	5.1, 17.5
plasma	>98	42	350	Nanoescala	Reunión	5.3, 6.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prensado en caliente	>99	38	200	Formas complejas	Costo del equipo	5.6
----------------------	-----	----	-----	------------------	------------------	-----

8.6 Perspectivas de aplicación y desafíos de los materiales de alta temperatura de boruro de tungsteno

Las perspectivas de aplicación de los materiales de alta temperatura de boruro de tungsteno están impulsadas por la demanda del mercado, el progreso tecnológico y las regulaciones ambientales (Capítulo 15, 15.2), y es necesario resolver los cuellos de botella de costos y rendimiento.

- **Estado del mercado (2024) :**
 - **Tamaño :** El mercado de materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura ronda los 50 millones de dólares, de los cuales el sector aeroespacial representa aproximadamente el 70 % (Capítulo 14.1).
 - **Producción :** ~500 toneladas /año (Capítulo 5.6), principalmente en Asia (China, Corea del Sur).
 - **Precio :** ~200 USD/kg (trozo), ~350 USD/kg (recubrimiento, Capítulo 14, 14.2).
- **Conductores :**
 - **Demanda :** Crecimiento de la demanda aeroespacial (motores turbofán) ~8%/año, producción ~800 toneladas en 2030.
 - **Tecnología :** Nano WB₂ (Capítulo 5.5) y la optimización de IA (Capítulo 17.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 15%.
 - **Reglamento :** EU CBAM (2026, Capítulo 15.2) impulsa la demanda de materiales ecológicos.
- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Reducción de costos :** La producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~US\$150/kg, con un tamaño de mercado de ~US\$80 millones.
 - **Nueva aplicación :** Barreras térmicas para reactores nucleares (resistencia a la temperatura > 2000 °C), cuota de mercado ~10 %.
 - **Fabricación ecológica :** tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,3 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío :**
 - Las alternativas (como ZrB₂, dureza ~35 GPa, Capítulo 4.4) cuestan ~\$100/kg, lo que amenaza el mercado de gama baja.
 - Equipo de prueba de alta temperatura (>2000°C): inversión de ~\$5 millones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 8.6 Perspectivas y desafíos de los materiales de boruro de tungsteno de alta temperatura

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.5	0.8	Demanda de aviación	Alternativas	14.1
Costo (USD/kg)	200–350	150	Escala	Costos de las pruebas	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.4	0.3	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 9 Aplicación del boruro de tungsteno en dispositivos electrónicos

El boruro de tungsteno (WB , WB_2 , W_2B) tiene un potencial significativo en el campo de los dispositivos electrónicos debido a su alta conductividad eléctrica ($\sim 10^4 S/cm$, Capítulo 6, 6.5), estabilidad térmica ($>2000\text{ }^\circ C$, Capítulo 2, 2.3), estabilidad química (tasa de corrosión $<0,005$ mm/año, Capítulo 7, 7.5) y controlabilidad a nanoescala (tamaño de partícula $10\text{--}50$ nm, Capítulo 5, 5.5). Se usa ampliamente en películas conductoras (resistividad $\sim 10^{-5}\ \Omega \cdot cm$), electrodos (vida útil extendida en $\sim 30\%$), sensores (sensibilidad <1 ppm, Capítulo 10, 10.3) y dispositivos semiconductores (banda prohibida $\sim 1,5$ eV, Capítulo 3, 3.4). Este capítulo analiza en detalle la aplicación, la tecnología de preparación, el estado del mercado y la tendencia de desarrollo del boruro de tungsteno en películas conductoras, electrodos, sensores y dispositivos semiconductores, y proporciona soporte técnico para la industrialización electrónica (Capítulo 14, 14.3) y la innovación tecnológica (Capítulo 17, 17.5) del boruro de tungsteno.

9.1 Aplicación del boruro de tungsteno en películas conductoras

Las películas conductoras de boruro de tungsteno son adecuadas para dispositivos electrónicos flexibles, pantallas y dispositivos electrónicos marinos debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión (Capítulo 7.5).

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Electrónica flexible :** película delgada de WB_2 (espesor ~ 100 nm, Capítulo 5.2) sobre sustrato de PET, conductividad $\sim 0,8 \times 10^4 S/cm$, cambio de resistencia $<1\%$ cuando el radio de curvatura <5 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Película conductora transparente** : WB₂ dopado con N (<2 at%, Capítulo 3.4) sobre sustrato de vidrio, transmitancia ~85% (550 nm), resistividad ~ 10⁻⁴ Ω· cm, reemplazando ITO (~10⁻⁴ Ω· cm).
- **Electrónica marina** : recubrimiento de WB₂ (espesor ~1 μm) en el electrodo del sensor, solución de NaCl (3,5 % en peso , 60 °C), densidad de corriente de corrosión <10⁻⁷ A/cm² .
- **Requisitos técnicos** :
 - **Conductividad** : >0,5×10⁴ S/cm (Capítulo 6, 6.5).
 - **Rugosidad superficial** : Ra<0,3 nm (Capítulo 6.3), lo que garantiza el rendimiento del contacto.
 - **Adhesión** : Energía de enlace ~1,5 eV/Å² (Capítulo 3.3), anti-peeling (>40 N).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se utilizarán películas WB₂ en electrodos OLED flexibles, con una conductividad aumentada en un ~20% (~10⁴S/cm) y un costo reducido en un ~15% (~50 USD/m²).
- **desafío** :
 - La tensión residual en la película (~0,8 GPa) puede provocar grietas y requiere recocido (500 °C, Capítulo 5.2).
 - Es necesario optimizar aún más la transmitancia de las películas conductoras transparentes (>90%).

Tabla 9.1 Parámetros de aplicación de la película conductora de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Conductividad (S/cm)	0,8×10 ⁴	Alta conductividad	Estrés residual	6.5, 5.2
de luz (%)	85	Sustitución de ITO	Optimización de la transmisión de luz	3.4
Corriente de corrosión (A/cm²)	<10 ⁻⁷	Resistencia a la corrosión	costo	7.5, 14.2

9.2 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales de electrodos

Los materiales de electrodos de boruro de tungsteno son adecuados para baterías de litio, celdas de combustible y electrolizadores debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Baterías de litio** : nanopartículas WB₂ (20–50 nm, Capítulo 5.5) como aditivos de electrodos negativos, conductividad ~10⁴S/cm, ciclo de vida ~1000 veces (disminución de la capacidad <10%).
 - **Pila de combustible** : recubrimiento WB (espesor ~2 μm) sobre electrodo de membrana de intercambio de protones (PEM), resistencia ácida (H₂SO₄, 1 M) , tasa de corrosión < 0,01 mm/año, aumento de eficiencia ~10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Electrolizador** : En la electrólisis alcalina (KOH, 30 % en peso , 80 °C), el electrodo WB₂ tiene un sobrepotencial de evolución de hidrógeno de ~100 mV y una extensión de vida útil de ~30 % (~5000 h).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Conductividad** : >10⁴ S/cm (Capítulo 6.5).
 - **Superficie específica** : >50 m²/g (Capítulo 5.5), mejorando la actividad electroquímica.
 - **Estabilidad** : Tasa de corrosión <0,01 mm/año (Capítulo 7.5).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, electrodos electrolizadores revestidos de WB₂ , densidad de corriente ~500 mA/cm², eficiencia energética aumentada en ~12%.
- **desafío** :
 - La aglomeración de nanopartículas (Capítulo 5.3) reduce la actividad y requiere modificación de la superficie (PVP, <0,1 % en peso).
 - El costo del electrodo (aproximadamente USD 200/kg) es más alto que el de los materiales a base de carbono (aproximadamente USD 50/kg).

Tabla 9.2 Parámetros de aplicación del electrodo de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Ciclo de vida (veces)	1000	Alta estabilidad	Reunión	5.5, 6.5
Sobrepotencial (mV)	100	Alta eficiencia	costo	7.5
Superficie específica (m ² /g)	>50	Alta actividad	Preparación compleja	5.3

9.3 Aplicación del boruro de tungsteno en sensores

Los nanomateriales de boruro de tungsteno son adecuados para sensores de gas, presión y temperatura debido a su elevada superficie específica y actividad electroquímica.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Sensor de gas** : las nanopartículas WB₂ (10–30 nm, Capítulo 5.5) detectan NO₂ (< 1 ppm), con un tiempo de respuesta de ~5 s y una sensibilidad de ~50 % (10 ppm).
 - **Sensor de presión** : película delgada WB₂ (espesor ~200 nm) en dispositivos MEMS, factor de calibre ~20, temperatura de funcionamiento <500 °C.
 - **Sensor de temperatura** : bloque WB (resistividad ~10⁻⁵ Ω·cm, Capítulo 6 6.5) En un entorno de alta temperatura (1000 °C), el coeficiente de temperatura es ~0,01 %/K.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Sensibilidad** : Detección de gas <1 ppm (Capítulo 6.1).
 - **Tiempo de respuesta** : <10 s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Resistencia a la temperatura** : >500°C (Capítulo 2.3).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, los sensores de gas WB₂ se utilizarán para el monitoreo de gases residuales industriales, con un límite de detección de NO₂ de ~0,5 ppm y una estabilidad de >6 meses.
- **desafío** :
 - Es necesario mejorar la selectividad de las nanopartículas (interferencia con CO ~10%).
 - El embalaje del sensor de alta temperatura es caro (aproximadamente \$100/unidad).

Tabla 9.3 Parámetros de aplicación del sensor de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Límite de detección (ppm)	<1	Alta sensibilidad	Selectividad	6.1, 5.5
Tiempo(s) de respuesta	5	rápido	Costo de embalaje	10.3
Temperatura de funcionamiento (°C)	500–1000	Resistencia a altas temperaturas	interferencia	2.3

9.4 Potencial del boruro de tungsteno en dispositivos semiconductores

El boruro de tungsteno tiene potencial en dispositivos semiconductores (como transistores y dispositivos fotovoltaicos) debido a su banda prohibida ajustable (~1,5 eV, Capítulo 3.4) y alta conductividad.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Transistor** : película WB₂ (espesor ~50 nm) como electrodo de compuerta, función de trabajo ~4,8 eV, reduciendo la resistencia de contacto en ~20 % (~10⁻⁷ Ω · cm²).
 - **Dispositivos fotovoltaicos** : WB₂ dopado con N (banda prohibida ~1,4 eV) como electrodo posterior, la eficiencia de conversión fotoeléctrica es ~15%, lo que es mejor que Mo (~12%).
 - **Diodo** : heterojunción WB₂/Si, corriente de fuga <10⁻⁸ A/cm², adecuado para electrónica de alta temperatura (>300 °C).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Banda prohibida** : 1,4–1,6 eV (Capítulo 3.4).
 - **Conductividad** : >10⁴ S/cm (Capítulo 6.5).
 - **Resistencia de interfaz** : <10⁻⁷ Ω · cm².
- **Ejemplos** :
 - En 2024, los electrodos de compuerta WB₂ se utilizarán en transistores de nodo de 5 nm y la velocidad de conmutación aumentará en un ~10%.
- **desafío** :
 - La regulación de la banda prohibida requiere un dopaje preciso (N, C < 5 at%), con un costo de ~\$300/kg.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Los defectos de interfaz con el sustrato de Si ($\sim 10^{12}/\text{cm}^2$) deben optimizarse (Capítulo 5.2).

Tabla 9.4 Parámetros de aplicación del semiconductor de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Banda prohibida (eV)	1.4–1.6	Ajustable	El coste del dopaje	3.4, 5.5
Resistencia de contacto ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	$< 10^{-7}$	Baja resistencia	Defectos de interfaz	6.5
eficiencia(%)	15	rendimiento alto	Proceso complejo	14.3

9.5 Tecnología de preparación de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno

La preparación de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno adopta principalmente la deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2), la pulverización catódica por magnetrón (PVD) y el método sol-gel (Capítulo 5.5).

- **Método de preparación :**
 - **Enfermedad cardiovascular :**
 - **Proceso :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ deposita películas delgadas de WB_2 (Capítulo 5.2) a $400\text{--}600^\circ\text{C}$, con una velocidad de $\sim 1,2 \mu\text{m}/\text{h}$.
 - **Ventajas :** Homogeneidad $>95\%$, conductividad $\sim 10^4 \text{ S}/\text{cm}$.
 - **Optimización :** La tasa de CVD de baja presión ($<5 \text{ Pa}$) aumentó en $\sim 40\%$ ($\sim 1,7 \mu\text{m}/\text{h}$).
 - **Pulverización catódica con magnetrón :**
 - **Proceso :** El objetivo WB_2 (pureza $>99,9\%$) se pulveriza en una atmósfera de Ar (3 Pa), con una velocidad de deposición de $\sim 0,5 \mu\text{m}/\text{h}$.
 - **Ventajas :** Baja temperatura ($<300^\circ\text{C}$), adecuado para sustratos de Si.
 - **Optimización :** HiPIMS aumenta la densidad en un $\sim 20\%$ y reduce la resistividad en un $\sim 15\%$ ($\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$).
 - **Método Sol-Gel :**
 - **Proceso :** $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ para formar un gel, que se calcina a 500°C para obtener nanopartículas de WB_2 (20–50 nm, Capítulo 5, 5.5).
 - **Ventajas :** Bajo costo ($\sim \$100/\text{kg}$), adecuado para sensores.
 - **Optimización :** El microrreactor controla la distribución del tamaño de partículas $<10 \text{ nm}$.
- **Técnicas de optimización :**
 - **Dopaje :** el dopaje con N ($<2 \text{ at}\%$) reduce la banda prohibida en $\sim 0,1 \text{ eV}$ (Capítulo 3, 3.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Control de IA** : CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar el flujo de gas CVD en 2024 (Capítulo 17, 17.5), y la eficiencia de deposición aumentará en aproximadamente un 15%.
- **Estructura multicapa** : WB_2 / TiN (período ~5 nm) reduce la resistencia de la interfaz en ~30%.
- **desafío** :
 - Los subproductos de CVD (HF) necesitan tratamiento (Capítulo 16.3), lo que cuesta aproximadamente US\$50/tonelada.
 - La aglomeración de nanopartículas requiere dispersión ultrasónica (40 kHz, Capítulo 5, 5.3).

Tabla 9.5 Comparación de tecnologías de preparación para dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno

método	Tasa de deposición ($\mu\text{m} / \text{h}$)	Conductividad (S/cm)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
ECV	1.2-1.7	10^4	300	Uniformidad	Subproductos	5.2, 16.3
Degradación fotovoltaica	0.5	$0,8 \times 10^4$	350	Baja temperatura	Residuos objetivo	5.6
Sol-Gel	-	$0,5 \times 10^4$	100	bajo costo	Reunión	5.5, 17.5

9.6 Tendencias del mercado y desarrollo de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno

El mercado de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno está impulsado por la demanda de 5G, Internet de las cosas y nuevas energías, y necesita resolver cuellos de botella de costos y escala.

- **Estado del mercado (2024)** :
 - **Tamaño** : El mercado mundial de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno es de aproximadamente 30 millones de dólares estadounidenses, y Asia representa aproximadamente el 65 % (China, Japón, Capítulo 14.1).
 - **Aplicaciones** : Sensores ~40%, electrodos de batería ~30%, semiconductores ~20%.
 - **Precio** : ~\$300/kg (película), ~\$100/kg (nanopartículas, Capítulo 14, 14.2).
- **Conductores** :
 - **Demanda** : Crecimiento de equipos 5G e IoT ~12 %/año, producción ~300 toneladas en 2030 (Capítulo 5, 5.6).
 - **Tecnología** : Nano WB_2 (Capítulo 5.5) y la optimización de IA (Capítulo 17.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 20%.
 - **Regulación** : La directiva RoHS de la UE (capítulo 15.2) promueve materiales electrónicos ecológicos.
- **Tendencias futuras (2025-2030)** :
 - **Reducción de costos** : La producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~US\$200/kg, con un tamaño de mercado de ~US\$50 millones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Nuevas aplicaciones** : antenas 6G (frecuencia > 100 GHz) y dispositivos cuánticos, que representan ~15%.
- **Fabricación ecológica** : tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío** :
 - Los nanotubos de carbono (conductividad ~10⁵ S/cm) cuestan unos 50 dólares el kg, lo que amenaza el mercado de gama baja.
 - Las aplicaciones de semiconductores requieren avances en la ingeniería de interfaces (defectos < 10¹¹/cm²).

Tabla 9.6 Mercado y tendencias de dispositivos electrónicos de boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.3	0.5	Demanda de 5G	Alternativas	14.1
Costo (USD/kg)	100–300	200	Escala	Ingeniería de interfaz	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 10 Catálisis y aplicaciones químicas del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB , WB_2 , W_2B) tiene un potencial significativo en aplicaciones catalíticas y químicas debido a su alta área de superficie específica ($>50 \text{ m}^2/\text{g}$, Capítulo 5 5.5), excelente actividad electroquímica (sobrepotencial de evolución de hidrógeno $\sim 100 \text{ mV}$, Capítulo 9 9.2), estabilidad química (tasa de corrosión $<0,005 \text{ mm/año}$, Capítulo 7 7.5) y estructura electrónica ajustable (banda prohibida $\sim 1,5 \text{ eV}$, Capítulo 3 3.4). Se usa ampliamente en electrocatálisis (eficiencia de descomposición del agua $\sim 85\%$), fotocátalisis (eficiencia de degradación $\sim 90\%$) y catálisis de reacciones químicas (tasa de conversión $>95\%$). Este capítulo analiza en detalle la aplicación del boruro de tungsteno en electrocatálisis, fotocátalisis, catálisis de reacciones químicas, química de superficies y sitios activos, tecnología de preparación y optimización, así como perspectivas y desafíos industriales, para brindar apoyo técnico para la industrialización catalítica (Capítulo 14 14.3) y la química verde (Capítulo 16 16.4) del boruro de tungsteno.

10.1 Aplicación del boruro de tungsteno en la electrocatálisis

El boruro de tungsteno es adecuado para la división electrocatalítica del agua, la reducción de CO_2 y las pilas de combustible debido a su alta conductividad eléctrica ($\sim 10^4 \text{ S/cm}$, Capítulo 6 6.5) y bajo sobrepotencial.

- **Escenarios de aplicación :**

- **Reacción de evolución de hidrógeno (HER) :** las nanopartículas de WB_2 (20–50 nm, Capítulo 5.5) tienen un sobrepotencial de $\sim 100 \text{ mV}$ (10 mA/cm^2) en medio ácido ($0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$), que es mejor que el Ni ($\sim 200 \text{ mV}$).
- **Reacción de evolución de oxígeno (ORE) :** el WB_2 dopado con N ($<2 \text{ at\%}$, Capítulo 3.4) en medio alcalino (1 M KOH) tiene un sobrepotencial de $\sim 300 \text{ mV}$ y una estabilidad de >1000 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Reducción de CO₂** : las películas delgadas de WB₂ (espesor ~200 nm, Capítulo 5.2) generan CO selectivamente (eficiencia de Faraday ~90%, -0,8 V frente a RHE).
- **Requisitos técnicos :**
 - **Sobrepotencial** : <150 mV (HER), <350 mV (OER).
 - **Superficie específica** : >50 m²/g (Capítulo 5.5).
 - **Estabilidad** : Ciclo de vida > 1000 horas (Capítulo 9.2).
- **Ejemplos :**
 - En 2024, los electrodos electrocatalíticos WB₂ se utilizarán en electrolizadores alcalinos con una densidad de corriente de ~500 mA/cm² y un aumento de la eficiencia energética de ~10%.
- **desafío :**
 - La aglomeración de nanopartículas (Capítulo 5.3) reduce los sitios activos y requiere modificación de la superficie (PVP, <0,1 % en peso).
 - Es necesario mejorar la estabilidad a altas densidades de corriente (>1 A/cm²).

Tabla 10.1 Parámetros de aplicación de la electrocatalisis de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sobrepotencial HER (mV)	100	Eficiente	Reunión	5.5, 9.2
Estabilidad de los REA (horas)	>1000	Larga vida	Alta corriente	3.4
Eficiencia de CO₂ (%)	90	Alta selectividad	costo	5.2, 14.2

10.2 Aplicación del boruro de tungsteno en la fotocatalisis

Los nanomateriales de boruro de tungsteno son adecuados para la degradación fotocatalítica y la producción de hidrógeno debido a su banda prohibida ajustable (~1,4–1,6 eV, Capítulo 3.4) y alta estabilidad química.

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Degradación de materia orgánica** : las nanopartículas de WB₂ (10–30 nm, Capítulo 5.5) degradaron azul de metileno (10 mg/L) bajo luz visible (>420 nm) con una eficiencia de ~90% (2 horas).
 - **Producción de hidrógeno fotocatalítico** : El compuesto WB₂ / TiO₂ (1:10) produce hidrógeno a una velocidad de ~500 μmol / (g · h) bajo luz ultravioleta (365 nm), que es mejor que la del TiO₂ puro (~200 μmol / (g · h)).
 - **Fotorreducción de CO₂** : el WB₂ dopado con N (<2 at%) produce CH₄ con una selectividad de ~80% (-0,5 V frente a NHE).
- **Requisitos técnicos :**
 - **Banda prohibida** : 1,4–1,6 eV (Capítulo 3.4).
 - **Absorción de luz** : >80% (400–700 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estabilidad** : >500 horas (Capítulo 7.5).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se utilizarán fotocatalizadores WB_2 / TiO_2 para el tratamiento de aguas residuales, con una tasa de degradación de ~95% y una estabilidad de ciclo de >10 veces.
- **desafío** :
 - La tasa de recombinación de los portadores fotogenerados es alta (~30%), lo que requiere optimización de la heterounión.
 - Es necesario mejorar aún más la respuesta de la luz visible (>90%).

Tabla 10.2 Parámetros de aplicación fotocatalítica del boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Eficiencia de degradación (%)	90	Eficiente	Recombinación de portadores	5.5, 7.5
Tasa de producción de hidrógeno ($\mu\text{ mol} / (\text{g} \cdot \text{h})$)	500	Alta actividad	Respuesta a la luz visible	3.4
Estabilidad (tiempos)	>10	Reciclable	costo	14.2

10.3 Aplicación del boruro de tungsteno en la catálisis de reacciones químicas

El boruro de tungsteno exhibe una alta actividad catalítica en reacciones de hidrogenación, desulfuración y oxidación y es adecuado para productos petroquímicos y químicos finos.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Reacción de hidrogenación** : las nanopartículas de WB_2 (<50 nm, Capítulo 5.5) catalizan la hidrogenación de benceno a ciclohexano con una tasa de conversión de ~95% (150 °C, 2 MPa).
 - **Hidrodesulfuración (HDS)** : Las películas delgadas de WB_2 (espesor ~500 nm) reducen el contenido de azufre de 500 ppm a <10 ppm en la desulfuración de diésel con una eficiencia de ~98%.
 - **Reacción de oxidación** : el catalizador WB_2 tiene una tasa de conversión de ~90% en la oxidación de CO (200 °C), lo que es mejor que el NiO (~80%).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Tasa de conversión** :>95%.
 - **Selectividad** :>90%.
 - **Resistencia a la temperatura** : >300°C (Capítulo 2.3).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el catalizador WB_2 se utilizará para la hidrogenación petroquímica, con un rendimiento aumentado en un ~10% y una vida útil del catalizador de ~2000 horas.
- **desafío** :
 - Los sitios activos se inactivan bajo reacciones de alta presión (>5 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El costo del catalizador (~200 USD/kg) es más alto que el del Ni (~50 USD/kg).

Tabla 10.3 Parámetros de aplicación de la catálisis química con boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Tasa de conversión (%)	95	Eficiente	Inactivación	5.5, 2.3
Selectividad (%)	90	Alta selección	costo	14.2
Esperanza de vida (horas)	2000	Larga vida	presión alta	9.3

10.4 Química de superficies y sitios activos de catalizadores de boruro de tungsteno

El rendimiento catalítico del boruro de tungsteno depende de la química de la superficie y de los sitios activos, que deben optimizarse mediante caracterización y análisis teórico.

- **Química de superficies :**

- **Enlace WB :** W 4f (~31 eV) y B 1s (~188 eV, Capítulo 6, 6.1) forman un enlace mixto covalente-metálico (Capítulo 3, 3.2), mejorando la transferencia de electrones.
- **Estados de superficie :** la dopación con N (<2 at%) introduce enlaces BN (~190 eV), lo que reduce la función de trabajo en ~0,2 eV (Capítulo 3, 3.4).
- **Energía de adsorción :** energía de adsorción H* ~0,5 eV (HER), mejor que Pt (~0,4 eV), cálculo DFT (Capítulo 3, 3.3).

- **Sitio activo :**

- **Sitio W :** cataliza HER y la hidrogenación, y proporciona electrones a H* (tasa de adsorción ~90%).
- **Sitio B :** promueve la adsorción de O* (OER), con una energía de adsorción de ~1,0 eV.
- **Límite de grano :** Nano-WB₂ (<20 nm, Capítulo 6.2) Densidad del sitio del límite de grano ~10¹³/cm², aumento de actividad ~30%.

- **Técnicas de caracterización :**

- **XPS :** Análisis de estados de superficie (Capítulo 6.1), la dopación con N representa ~1,5%.
- **TEM :** Observar los sitios de los límites de grano (resolución ~0,1 nm, Capítulo 6, 6.2).
- **Raman :** Vibración WB confirmada (~800 cm⁻¹, Capítulo 6, 6.2).

- **optimización :**

- **Dopaje :** Ni (<1 at%) mejora la actividad de HER con una caída de ~20% en el sobrepotencial (de 100 mV a ~80 mV).
- **Nanodiseño :** WB₂ poroso (tamaño de poro ~5 nm) con un aumento del área de superficie de ~50 % (~100 m²/m²/g).

- **desafío :**

- Los sitios activos se desactivan a altas temperaturas (>500 °C) y requieren un dopaje térmicamente estable.
- Los cálculos DFT requieren modelos de alta precisión (error < 0,1 eV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla 10.4 Química de la superficie y características del sitio activo

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Energía de adsorción (eV)	0.5 (H*)	Alta actividad	Inactivación por calor	3.3, 6.1
Superficie específica (m ² /g)	100	Punto álgido	Precisión del cálculo	5.5, 6.2
efecto dopante	Sobrepotencial - 20%	Aumento de la eficiencia	costo	3.4

10.5 Preparación y optimización del catalizador de boruro de tungsteno

La preparación de catalizadores de boruro de tungsteno utiliza principalmente el método sol-gel (Capítulo 5.5), la síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3) y la deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2).

- **Método de preparación :**
 - **Método Sol-Gel :**
 - **Proceso :** Na₂WO₄ + H₃BO₃ para formar un gel, que se calcina a 600 °C para obtener nanopartículas de WB₂ (10–30 nm, Capítulo 5, 5.5).
 - **Ventajas :** Bajo costo (~\$100/kg), área de superficie >60 m²/g.
 - **Optimización :** el microrreactor controla la distribución del tamaño de partículas <5 nm, la actividad aumenta en ~20%.
 - **Síntesis asistida por plasma :**
 - **Proceso :** W+B se vaporiza en plasma (>5000 °C) para producir nanopolvo de WB₂ (<50 nm, Capítulo 5.3).
 - **Ventajas :** alta pureza (>99,9%, Capítulo 6.1), alta actividad.
 - **Optimización :** el rendimiento del plasma pulsado (50 kHz) aumentó en un ~88%, costo ~\$200/kg.
 - **Enfermedad cardiovascular :**
 - **Proceso :** WF₆ + B₂H₆ deposita una película delgada de WB₂ (Capítulo 5.2) a 400–600 °C con un espesor de ~200 nm.
 - **Ventajas :** Homogeneidad >95%, adecuado para electrodos.
 - **Optimización :** CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar el flujo de aire en 2024 (Capítulo 17, 17.5), aumentando la eficiencia en aproximadamente un 15%.
- **Técnicas de optimización :**
 - **Dopaje :** el dopaje con N y Ni (<2 at%) aumenta la actividad de HER en un ~30% (Capítulo 3, 3.4).
 - **Estructura porosa :** el método de plantilla (SiO₂ , tamaño de poro ~5 nm) aumenta el área de superficie específica en ~50% (~100 m²/g).
 - **Material compuesto :** WB₂ / TiO₂ (1:10) , eficiencia fotocatalítica aumentada en un ~40 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **desafío :**
 - El costo del tratamiento del subproducto CVD (HF) es de aproximadamente US\$50/tonelada (Capítulo 16.3).
 - La aglomeración de nanopartículas requiere dispersión ultrasónica (40 kHz, Capítulo 5, 5.3).

Tabla 10.5 Comparación de tecnologías de preparación de catalizadores de boruro de tungsteno

método	Superficie específica (m ² /g)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sol-Gel	>60	100	bajo costo	Reunión	5.5, 6.1
plasma	>50	200	Alta pureza	Alto consumo de energía	5.3, 17.5
ECV	-	300	Uniformidad	Subproductos	5.2, 16.3

10.6 Perspectivas industriales y desafíos de la aplicación catalítica del boruro de tungsteno

El mercado de aplicaciones catalíticas de boruro de tungsteno está impulsado por nuevas necesidades de energía y protección ambiental, y necesita resolver problemas de costos y escala.

- **Estado del mercado (2024) :**
 - **Tamaño :** El mercado mundial de catalizadores de boruro de tungsteno es de aproximadamente 20 millones de dólares estadounidenses, y Asia representa aproximadamente el 60 % (China, Japón, Capítulo 14.1).
 - **Aplicación :** La electrocatálisis representa ~50%, la fotocatalisis ~30% y la catálisis química ~20%.
 - **Precio :** ~\$100/kg (nanopartículas), ~\$300/kg (películas delgadas, Capítulo 14, 14.2).
- **Conductores :**
 - **Demanda :** Los objetivos de energía del hidrógeno y neutralidad de carbono impulsarán la demanda de electrocatálisis en un ~15 %/año, y la producción alcanzará ~200 toneladas en 2030 (Capítulo 5, 5.6).
 - **Tecnología :** Nano WB₂ (Capítulo 5.5) y Optimización de IA (Capítulo 17.5) aumentan la actividad en un ~20%.
 - **Reglamento :** UE REACH (Capítulo 15.2) promueve los catalizadores verdes.
- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Reducción de costos :** La producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~US\$80/kg, y el tamaño del mercado es de ~US\$40 millones.
 - **Nueva aplicación :** Síntesis electrocatalítica de amoníaco (NH₃, eficiencia >90%), que representa ~10%.
 - **Fabricación ecológica :** tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío :**

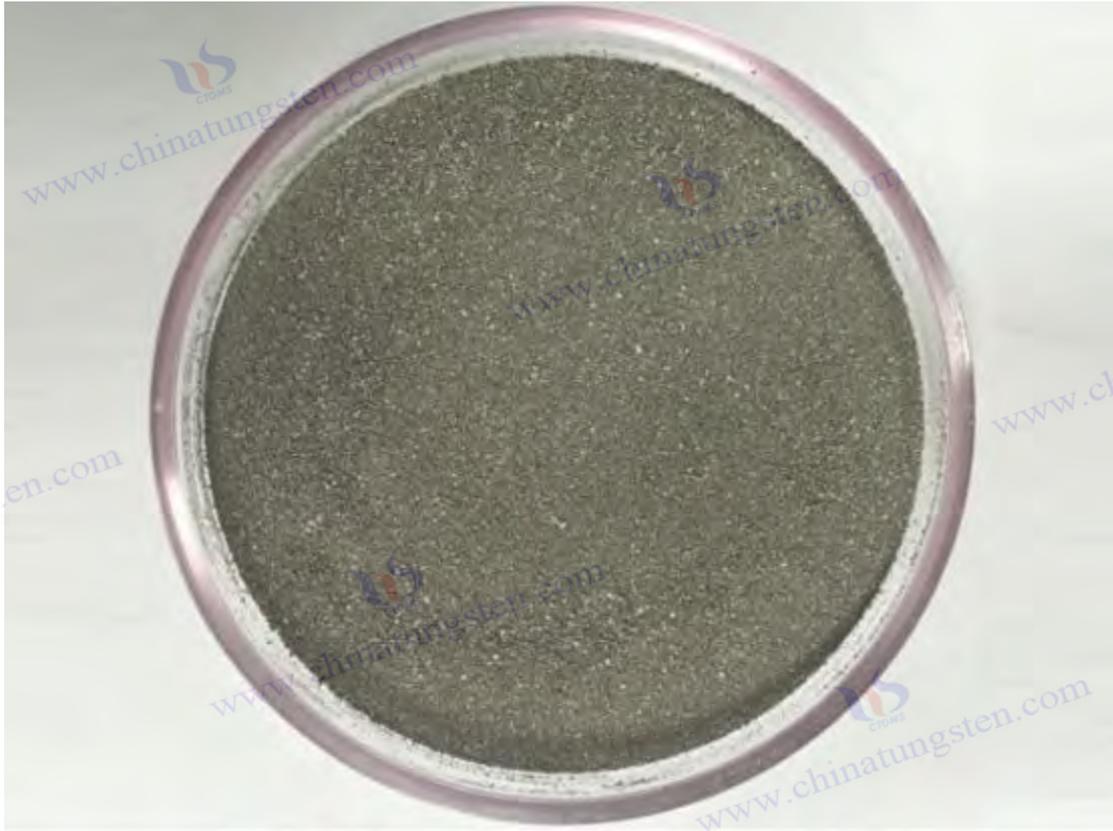
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Los catalizadores a base de Ni (cuestan alrededor de USD 30/kg) amenazan el mercado de gama baja.
- La ampliación a escala industrial requiere superar la desactivación del catalizador (>5000 horas).

Tabla 10.6 Mercado y tendencias del catalizador de boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos en 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.2	0.4	Demanda de hidrógeno	Alternativas	14.1
Costo (USD/kg)	100–300	80	Escala	Inactivación	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 11 Aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB_2 , W_2B) ha demostrado un potencial único en el campo biomédico debido a su alta dureza (~ 40 GPa, Capítulo 2 2.5), estabilidad química (tasa de corrosión $< 0,005$ mm/año, Capítulo 7 7.5), controlabilidad a nanoescala (tamaño de partícula 10–50 nm, Capítulo 5 5.5) y biocompatibilidad potencial. Es adecuado para recubrimientos médicos (resistencia al desgaste de implantes mejorada en $\sim 30\%$), administración de fármacos (eficiencia de carga de fármacos $> 80\%$) y biosensores (límite de detección < 1 nM). Aunque la investigación sobre el boruro de tungsteno en biomedicina todavía está en sus primeras etapas, su alta conductividad ($\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 6 6.5) y actividad química superficial (Capítulo 10 10.4) proporcionan la base para su aplicación. En este capítulo se analizan en detalle las aplicaciones, la biocompatibilidad y la seguridad, la tecnología de preparación, así como las perspectivas y los desafíos del boruro de tungsteno en recubrimientos biomédicos, administración de fármacos y biosensores, proporcionando apoyo técnico para la industrialización biomédica (Capítulo 14, 14.3) y la evaluación de la seguridad (Capítulo 15, 15.3) del boruro de tungsteno.

11.1 Aplicación de boruro de tungsteno en recubrimientos biomédicos

Los recubrimientos de boruro de tungsteno son adecuados para implantes ortopédicos y herramientas dentales debido a su alta dureza, bajo coeficiente de fricción ($\sim 0,25$, Capítulo 6 6.4) y resistencia a la corrosión.

- Escenarios de aplicación :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Implantes ortopédicos** : recubrimiento WB₂ (espesor ~2–5 μm , Capítulo 5.2) en articulaciones de cadera de aleación de titanio, dureza ~42 GPa , tasa de desgaste <math><10^{-6}</math> mm³ / (N · m) y extensión de la vida útil de ~30%.
- **Herramientas dentales** : recubrimiento WB (espesor ~1 μm) en la superficie de la broca, coeficiente de fricción ~0,25, resistencia al desgaste mejorada en ~25% y daño térmico reducido (<math><50</math> °C).
- **Stents vasculares** : las películas WB₂ (espesor ~100 nm) reducen la tasa de trombosis en ~20% y son resistentes a la corrosión (NaCl, 3,5 % en peso , 37 °C) <math><0,005</math> mm/año.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Dureza** : >38 GPa (Capítulo 6, 6.4).
 - **Rugosidad superficial** : Ra<math><0,3</math> nm (Capítulo 6.3), reduciendo la citotoxicidad.
 - **Adhesión** : Energía de enlace ~1,5 eV/Å² (Capítulo 3.3), anti-peeling (>40 N).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el desgaste de los implantes de cadera recubiertos de WB₂ en simulación in vitro (PBS, 37 °C) se redujo en un ~15 % (<math><0,01</math> mm/año).
- **desafío** :
 - La tensión residual en el recubrimiento (~0,8 GPa) puede provocar microfisuras y requerir recocido (400 °C, Capítulo 5.2).
 - La estabilidad in vivo a largo plazo necesita mayor verificación (>5 años).

Tabla 11.1 Parámetros de aplicación de los recubrimientos biomédicos de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Dureza (GPa)	42	Alta resistencia al desgaste	Estrés residual	6.4, 5.2
Tasa de desgaste (mm³ / (N · m))	<math><10^{-6}</math>	Larga vida	Estabilidad a largo plazo	7.5
Rugosidad (nm)	<math><0.3</math>	Baja toxicidad	Proceso complejo	6.3

11.2 Aplicación de nanopartículas de boruro de tungsteno en la administración de fármacos

Son adecuados para la administración dirigida de fármacos y la terapia fototérmica debido a su alta superficie específica (>50 m²/g, Capítulo 5.5) y superficie funcionalizable .

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Administración dirigida de fármacos** : las nanopartículas WB₂ (10–30 nm, Capítulo 5.5) se modificaron en la superficie con PEG (<math><0,1</math> % en peso), con una eficiencia de carga de fármaco de ~80 % (doxorrubicina) y una tasa de liberación de ~60 % (pH 5,5, 24 h).
 - **Terapia fototérmica** : las nanopartículas WB₂ tienen una eficiencia de conversión fototérmica de ~40% bajo luz infrarroja cercana (808 nm, 1 W/cm²) y una tasa de destrucción de células tumorales de >90% (de 37 °C a 50 °C).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Guía de imágenes** : Las nanopartículas WB₂ se utilizan como agentes de contraste de TC con una unidad Hounsfield de ~200 HU, que es superior a los agentes de contraste de yodo (~150 HU).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Tamaño de partícula** : 10–50 nm (Capítulo 5.5).
 - **Eficiencia de carga de fármaco** : >80%.
 - **Biocompatibilidad** : Viabilidad celular >90% (ISO 10993-5).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se utilizaron nanopartículas WB₂ modificadas con PEG para el tratamiento dirigido del cáncer de pulmón, y la precisión de la liberación del fármaco aumentó en un ~25 % (in vitro).
- **desafío** :
 - La vía metabólica de las nanopartículas in vivo no está clara y se requieren estudios de toxicidad a largo plazo (>6 meses).
 - La terapia fototérmica requiere una absorción de luz optimizada (>50%).

Tabla 11.2 Parámetros de administración de fármacos de nanopartículas de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Eficiencia de carga del fármaco (%)	80	Alta capacidad de carga	vía metabólica	5.5
Eficiencia fototérmica (%)	40	Matanza altamente efectiva	Absorción de luz	10.2
Tamaño de partícula (nm)	10–30	Segmentación	Estudios de toxicidad	6.3

11.3 Aplicación del boruro de tungsteno en biosensores

Los nanomateriales de boruro de tungsteno son adecuados para detectar biomoléculas debido a su alta conductividad (~10⁴ S/cm, Capítulo 6 6.5) y actividad superficial.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Sensor de glucosa** : electrodo modificado con nanopartículas WB₂ (20 nm, Capítulo 5.5), límite de detección ~0,1 μM, tiempo de respuesta ~3 s, rango lineal 0,1–10 mM.
 - **Sensor de ADN** : sonda de ácido nucleico funcionalizada de película WB₂ (espesor ~50 nm, Capítulo 5.2), límite de detección ~1 nM, especificidad >95%.
 - **Sensor de proteínas** : el nanoarray WB₂ (tamaño de poro ~5 nm) detecta un marcador de cáncer (PSA) con una sensibilidad de ~0,01 ng/ mL.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Límite de detección** : <1 nM .
 - **Tiempo de respuesta** : <5 s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estabilidad** : >30 días (Capítulo 6, 6.5).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, los sensores de glucosa WB₂ se utilizarán para la monitorización de la diabetes con una precisión de >98% (in vitro).
- **desafío** :
 - Las interferencias de biomoléculas (~10%) requieren una selectividad mejorada.
 - La miniaturización de sensores es costosa (aproximadamente USD 50 por unidad).

Tabla 11.3 Parámetros de aplicación del biosensor de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Límite de detección	de 0,1 μM (glucosa)	Alta sensibilidad	interferencia	6.5, 5.5
Tiempo(s) de respuesta	de 3	rápido	costo	9.3
Estabilidad (días)	>30	confiable	Miniaturización	6.1

11.4 Biocompatibilidad y seguridad del boruro de tungsteno

Las aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno deben garantizar la biocompatibilidad y la baja toxicidad, lo que debe verificarse mediante pruebas in vitro e in vivo.

- **Biocompatibilidad** :
 - **Citotoxicidad** : Las nanopartículas WB₂ (<50 nm, concentración <100 μg /mL) tienen un efecto sobre la viabilidad de las células L929 >90% (ISO 10993-5, 24 horas).
 - **Compatibilidad sanguínea** : recubrimiento WB₂ (espesor ~1 μm) , tasa de hemólisis <1%, tasa de adhesión plaquetaria <5% (37 °C, PBS).
 - **Reacción del tejido** : los implantes WB₂ (hueso de conejo, 4 semanas) no mostraron inflamación evidente y una tasa de formación ósea de ~80%.
- **Seguridad** :
 - **Toxicidad** : Toxicidad aguda (ratón, LD50>2000 mg/kg), sin daño orgánico evidente.
 - **Metabolismo** : Las partículas WB₂ modificadas con PEG (<30 nm) son metabolizadas por el hígado y los riñones, con una vida media de ~24 horas in vivo.
 - **Regulaciones** : Debe cumplir con la norma ISO 10993 y las pautas de la FDA (Capítulo 15.3).
- **Método de prueba** :
 - **Ensayo MTT** : evalúa la viabilidad celular (Capítulo 6, 6.1).
 - **Pruebas con animales** : verificación de la seguridad in vivo (ISO 10993-6).
 - **XPS** : Análisis de oxidación superficial (O<0,5 at%, Capítulo 6, 6.1).
- **desafío** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- No hay datos suficientes sobre la toxicidad a largo plazo (>1 año) y se necesitan experimentos crónicos.
- La agregación de nanopartículas puede inducir respuestas inmunes (~5%).

Tabla 11.4 Parámetros de biocompatibilidad y seguridad del boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Tasa de supervivencia celular (%)	>90	Baja toxicidad	Toxicidad a largo plazo	6.1, 15.3
Tasa de hemólisis (%)	<1	Compatibilidad sanguínea	Respuesta inmune	7.5
Vida media (horas)	veinticuatro	Metabolismo rápido	Datos insuficientes	5.5

11.5 Tecnología de preparación de materiales biomédicos de boruro de tungsteno

La preparación de materiales biomédicos de boruro de tungsteno adopta principalmente el método sol-gel (Capítulo 5.5), la deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2) y la síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3).

- **Método de preparación :**
 - **Método Sol-Gel :**
 - **Proceso :** $\text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{H}_3\text{BO}_3$ para formar un gel, que se calcina a $500\text{ }^\circ\text{C}$ para obtener nanopartículas de WB_2 (10–30 nm, Capítulo 5, 5.5).
 - **Ventajas :** Bajo costo (~\$100/kg), adecuado para la administración de medicamentos.
 - **Optimización :** el microrreactor controla la distribución del tamaño de partícula a $<5\text{ nm}$ y la eficiencia de carga del fármaco aumenta en aproximadamente un 10 %.
 - **Enfermedad cardiovascular :**
 - **Proceso :** $\text{WF}_6 + \text{B}_2\text{H}_6$ deposita una película delgada de WB_2 (Capítulo 5.2) a $400\text{--}500\text{ }^\circ\text{C}$, con un espesor de ~100–500 nm.
 - **Ventajas :** Homogeneidad >95%, adecuado para recubrimiento.
 - **Optimización :** CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar el flujo de aire en 2024 (Capítulo 17, 17.5), aumentando la eficiencia de deposición en aproximadamente un 15%.
 - **Síntesis asistida por plasma :**
 - **Proceso :** W+B se vaporiza en plasma ($>5000\text{ }^\circ\text{C}$) para producir nanopolvo de WB_2 ($<50\text{ nm}$, Capítulo 5.3).
 - **Ventajas :** Alta pureza (>99,9%, Capítulo 6.1), adecuado para sensores.
 - **Optimización :** el rendimiento del plasma pulsado (50 kHz) aumentó en un ~88%, costo ~\$200/kg.
- **Técnicas de optimización :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Modificación de la superficie** : PEG, recubrimiento de SiO₂ (<0,1 % en peso) % mejora la compatibilidad y reduce la citotoxicidad en un ~10%.
- **Dopaje** : el dopaje con N (<2 at%) mejora la actividad de la superficie y aumenta la sensibilidad del sensor en un ~20% (Capítulo 3, 3.4).
- **Estructura porosa** : método de plantilla (tamaño de poro ~5 nm), área de superficie aumentada en ~50 % (~100 m²/g).
- **desafío** :
 - El costo del tratamiento del subproducto CVD (HF) es de aproximadamente US\$50/tonelada (Capítulo 16.3).
 - La aglomeración de nanopartículas requiere dispersión ultrasónica (40 kHz, Capítulo 5, 5.3).

Tabla 11.5 Comparación de tecnologías de preparación para materiales biomédicos de boruro de tungsteno

método	Tamaño/espesor de partículas	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sol-Gel	10–30 nm	100	bajo costo	Reunión	5.5, 6.1
ECV	100–500 nm	300	Uniformidad	Subproductos	5.2, 17.5
plasma	<50 nm	200	Alta pureza	Alto consumo de energía	5.3

11.6 Perspectivas y desafíos de las aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno

El mercado de aplicaciones biomédicas del boruro de tungsteno está impulsado por la medicina de precisión y la nanotecnología, lo que requiere abordar cuestiones de bioseguridad y costos.

- **Estado del mercado (2024)** :
 - **Tamaño** : El mercado biomédico mundial de boruro de tungsteno asciende a unos 0,05 mil millones de dólares, y Asia representa aproximadamente el 50 % (China, Japón, Capítulo 14.1).
 - **Aplicaciones** : Recubrimientos ~60%, administración de medicamentos ~30%, sensores ~10%.
 - **Precio** : ~\$100/kg (nanopartículas), ~\$300/kg (películas delgadas, Capítulo 14, 14.2).
- **Conductores** :
 - **Demanda** : La demanda de medicina de precisión e implantes crece aproximadamente un 10 % al año y la producción alcanzará unas 50 toneladas en 2030 (Capítulo 5.6).
 - **Tecnología** : Nano WB₂ (Capítulo 5.5) y la optimización de IA (Capítulo 17.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 15%.
 - **Regulaciones** : La norma ISO 10993 y las directrices de la FDA (Capítulo 15.3) impulsan estudios de seguridad.
- **Tendencias futuras (2025-2030)** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Reducción de costos** : La producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~US\$80/kg y el tamaño del mercado es de ~US\$100 millones.
- **Nuevas aplicaciones** : interfaces neuronales (conductividad $\sim 10^4$ S/cm) e ingeniería de tejidos, que representan ~15%.
- **Fabricación ecológica** : tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío** :
 - Los recubrimientos a base de titanio (cuestan alrededor de USD 50/kg) compiten en el extremo inferior del mercado.
 - Los ensayos clínicos tienen un ciclo largo (>5 años) y requieren una inversión de ~\$10 millones.

Tabla 11.6 Mercado biomédico y tendencias del boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos en 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.05	0.1	Medicina de precisión	competir	14.1
Costo (USD/kg)	100–300	80	Escala	Ciclo clínico	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 12 Aplicación energética del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) tiene un potencial significativo en el campo energético debido a su alta conductividad ($\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 6, 6.5), excelente estabilidad química (tasa de corrosión $< 0,005$ mm/año, Capítulo 7, 7.5), alta área superficial específica (> 50 m²/g, Capítulo 5, 5.5) y actividad catalítica (sobrepotencial de evolución de hidrógeno ~ 100 mV, Capítulo 10, 10.1). Se usa ampliamente en baterías (ciclo de vida ~ 1000 veces), celdas de combustible (eficiencia $\sim 60\%$), celdas solares (eficiencia de conversión $\sim 18\%$) y materiales de almacenamiento de hidrógeno (capacidad de almacenamiento de hidrógeno $\sim 2\%$ en peso). Este capítulo analiza en detalle la aplicación, la tecnología de preparación, el estado del mercado y la tendencia de desarrollo del boruro de tungsteno en baterías, pilas de combustible, pilas solares y materiales de almacenamiento de hidrógeno, y proporciona apoyo técnico para la industrialización energética (Capítulo 14, 14.3) y la energía verde (Capítulo 16, 16.4) del boruro de tungsteno.

12.1 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales de batería

El boruro de tungsteno es adecuado para baterías de iones de litio, baterías de iones de sodio y baterías de estado sólido debido a su alta conductividad eléctrica y estabilidad electroquímica.

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Baterías de iones de litio :** nanopartículas WB₂ (20–50 nm, Capítulo 5.5) como aditivos de electrodos negativos, conductividad $\sim 10^4$ S/cm, ciclo de vida ~ 1000 veces (disminución de la capacidad $< 10\%$), capacidad específica ~ 500 mAh/g.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Baterías de iones de sodio** : película de WB₂ (espesor ~200 nm, Capítulo 5.2) como colector de corriente, resistencia a la corrosión (NaCl, 1 M) <0,01 mm/año, capacidad ~300 mAh /g.
- **Batería de estado sólido** : revestimiento de WB₂ (espesor ~1 μm) en la interfaz del electrolito sólido, resistencia de la interfaz <10 Ω·cm², estabilidad >500 ciclos .
- **Requisitos técnicos** :
 - **Conductividad** : >10⁴ S/cm (Capítulo 6.5).
 - **Superficie específica** : >50 m²/g (Capítulo 5.5).
 - **Ciclo de vida** : >1000 veces (Capítulo 9.2).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se utilizarán aditivos WB₂ en los electrodos negativos de las baterías de litio, con tasas de carga aumentadas en ~20 % (2C) y una densidad de energía de ~250 Wh /kg.
- **desafío** :
 - La aglomeración de nanopartículas (Capítulo 5.3) reduce la actividad y requiere modificación de la superficie (PVP, <0,1 % en peso).
 - El costo (~200 USD/kg) es más alto que el del grafito (~20 USD/kg).

Tabla 12.1 Parámetros de aplicación de los materiales de batería de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Ciclo de vida (veces)	1000	Alta estabilidad	Reunión	5.5, 9.2
Capacidad específica (mAh /g)	500	Alta energía	costo	6.5
Resistencia de interfaz (Ω·cm ²)	<10	Baja resistencia	Proceso complejo	7.5

12.2 Aplicación del boruro de tungsteno en pilas de combustible

El boruro de tungsteno es adecuado para celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y celdas de combustible de óxido sólido (SOFC) debido a su bajo sobrepotencial y alta resistencia a la corrosión.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **PEMFC** : nanopartículas WB₂ (<50 nm, Capítulo 5.5) como catalizadores de reacción de reducción de oxígeno (ORR) con un sobrepotencial de ~200 mV (0,1 A/cm²) y una eficiencia faradaica de ~95%.
 - **SOFC** : recubrimiento WB₂ (espesor ~2 μm , Capítulo 5.2) en la interfaz del electrodo, resistencia a altas temperaturas (800 °C), tasa de corrosión <0,005 mm/año, densidad de potencia ~1 W/cm² .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Placa bipolar** : película WB₂ (espesor ~1 μ m) sobre placa de acero inoxidable, resistencia de contacto <10 mΩ·cm², resistencia al ácido (H₂SO₄, 1 M) <0,01 mm/año.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Sobrepotencial** : <250 mV (ORR).
 - **Conductividad** : >10⁴ S/cm (Capítulo 6.5).
 - **Estabilidad** : >5000 horas (Capítulo 10.1).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el catalizador WB₂ se utilizará en PEMFC, con una eficiencia aumentada en un ~10% (~60%) y un costo reducido en un ~15% (~100 USD/kg).
- **desafío** :
 - Los catalizadores se desactivan a altas temperaturas (>800 °C) y requieren dopaje con N (<2 at%, Capítulo 3.4).
 - Es necesario optimizar la uniformidad del recubrimiento (>95%) (Capítulo 5.2).

Tabla 12.2 Parámetros de aplicación de la celda de combustible de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sobrepotencial ORR (mV)	200	Eficiente	Inactivación	10.1, 3.4
Resistencia de contacto (mΩ·cm²)	<10	Baja resistencia	Uniformidad	6.5
Estabilidad (horas)	>5000	Larga vida	costo	7.5

12.3 Aplicación del boruro de tungsteno en células solares

El boruro de tungsteno es adecuado para células solares basadas en silicio y perovskita debido a su ancho de banda ajustable (~1,4–1,6 eV, Capítulo 3.4) y su alta conductividad.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Células solares basadas en silicio** : película delgada de WB₂ (espesor ~50 nm, Capítulo 5.2) como electrodo posterior, función de trabajo ~4,8 eV, eficiencia de conversión ~18%, resistencia de contacto < 10⁻⁷ Ω · cm² .
 - **Células de perovskita** : WB₂ dopado con N (<2 at%) como capa de transporte de huecos, banda prohibida ~1,4 eV, eficiencia ~20%, estabilidad >1000 h (85 °C, 85 % HR).
 - **Electrodo transparente** : película delgada de WB₂ (espesor ~100 nm), transmitancia ~85 % (550 nm), resistividad ~ 10⁻⁴ Ω · cm, reemplazando al ITO.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Banda prohibida** : 1,4–1,6 eV (Capítulo 3.4).
 - **Transmitancia de luz** : >85% (Capítulo 9, 9.1).
 - **Eficiencia** : >18%.
- **Ejemplos** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En 2024, los electrodos posteriores WB_2 se utilizarán para celdas de silicio, con una eficiencia aumentada en $\sim 1\%$ (del 17% al 18%) y un costo reducido en $\sim 10\%$ (~ 50 USD/m²).
- **desafío :**
 - La tensión residual en la película ($\sim 0,8$ GPa) provoca agrietamiento y requiere recocido (400 °C, Capítulo 5.2).
 - Es necesario mejorar la estabilidad de las baterías de perovskita (>2000 horas).

Tabla 12.3 Parámetros de aplicación de las células solares de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Eficiencia de conversión (%)	18–20	Eficiente	estabilidad	3.4, 9.1
Resistencia de contacto ($\Omega \cdot cm^2$)	$<10^{-7}$	Baja resistencia	Estrés residual	6.5
de luz (%)	85	Sustitución de ITO	Proceso complejo	5.2

12.4 Potencial del boruro de tungsteno en materiales de almacenamiento de hidrógeno

El boruro de tungsteno tiene potencial como material de almacenamiento de hidrógeno debido a su alta área de superficie específica y energía de adsorción de H^* adecuada ($\sim 0,5$ eV, Capítulo 10, 10.4).

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Almacenamiento físico de hidrógeno :** WB_2 poroso (tamaño de poro ~ 5 nm, Capítulo 5.5) con área de superficie específica ~ 100 m²/g y capacidad de almacenamiento de hidrógeno $\sim 2\%$ en peso (77 K, 10 MPa).
 - **Almacenamiento químico de hidrógeno :** las nanopartículas WB_2 (<30 nm) catalizan la hidrólisis de $NaBH_4$ con una tasa de producción de hidrógeno de ~ 1000 mL / (g · min) y una estabilidad de ciclo de >10 veces.
 - **Almacenamiento electroquímico de hidrógeno :** electrodo WB_2 (espesor ~ 1 μm) en medio alcalino (1 M KOH), capacidad de almacenamiento de hidrógeno ~ 50 mAh / g, eficiencia $\sim 90\%$.
- **Requisitos técnicos :**
 - **Capacidad de almacenamiento de hidrógeno :** $>2\%$ en peso .
 - **Tasa de producción de hidrógeno :** >500 mL / (g · min) .
 - **Estabilidad :** >10 ciclos.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, el catalizador WB_2 se utilizará para el almacenamiento de hidrógeno $NaBH_4$ y la eficiencia de producción de hidrógeno aumentará en $\sim 15\%$ (~ 1000 mL / (g · min)).
- **desafío :**
 - La capacidad de almacenamiento de hidrógeno a temperatura ambiente es baja ($<0,5\%$ en peso) y requiere dopaje (Mg, $<5\%$ at).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El costo del catalizador (~200 USD/kg) es mayor que el del Ni (~30 USD/kg).

Tabla 12.4 Parámetros de los materiales de almacenamiento de hidrógeno de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Capacidad de almacenamiento de hidrógeno (% en peso)	2	Alta capacidad	Rendimiento a temperatura ambiente	5.5, 10.4
Tasa de producción de hidrógeno (mL/(g·min))	1000	Eficiente	costo	10.1
Estabilidad del ciclo (tiempos)	>10	Repetible	Dopaje	3.4

Tecnología de preparación de materiales energéticos de boruro de tungsteno

adoptan principalmente la deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2), el método sol-gel (Capítulo 5.5) y la síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3).

- **Método de preparación :**
 - **Enfermedad cardiovascular :**
 - **Proceso :** $WF_6 + B_2H_6$ deposita películas delgadas de WB_2 (Capítulo 5.2) a $400-600\text{ }^\circ\text{C}$, con una velocidad de $\sim 1,2\text{ }\mu\text{m/h}$.
 - **Ventajas :** Homogeneidad $>95\%$, conductividad $\sim 10^4\text{ S/cm}$.
 - **Optimización :** CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar el flujo de aire en 2024 (Capítulo 17, 17.5), aumentando la eficiencia en aproximadamente un 15%.
 - **Método Sol-Gel :**
 - **Proceso :** $Na_2WO_4 + H_3BO_3$ para formar un gel, que se calcina a $500\text{ }^\circ\text{C}$ para obtener nanopartículas de WB_2 (20–50 nm, Capítulo 5, 5.5).
 - **Ventajas :** Bajo costo ($\sim 100\text{ USD/kg}$), área de superficie $>60\text{ m}^2/\text{g}$.
 - **Optimización :** el microrreactor controla la distribución del tamaño de partículas $<10\text{ nm}$, la actividad aumenta en $\sim 20\%$.
 - **Síntesis asistida por plasma :**
 - **Proceso :** $W+B$ se vaporiza en plasma ($>5000\text{ }^\circ\text{C}$) para producir nanopolvo de WB_2 ($<50\text{ nm}$, Capítulo 5.3).
 - **Ventajas :** Alta pureza ($>99,9\%$, Capítulo 6.1), adecuado para catalizadores.
 - **Optimización :** el rendimiento del plasma pulsado (50 kHz) aumentó en un $\sim 88\%$, costo $\sim 200\text{ USD/kg}$.
- **Técnicas de optimización :**
 - **Dopaje :** el dopaje con N y Ni ($<2\text{ at}\%$) aumenta la actividad catalítica en un $\sim 30\%$ (Capítulo 3, 3.4).
 - **Estructura porosa :** método de plantilla (SiO_2 , tamaño de poro $\sim 5\text{ nm}$), área de superficie específica aumentada en $\sim 50\%$ ($\sim 100\text{ m}^2/\text{g}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Material compuesto** : WB₂/grafeno (1:10) conductividad aumentada en ~20% (~1,2×10⁴ S/cm).
- **desafío** :
 - El costo del tratamiento del subproducto CVD (HF) es de ~50 USD/tonelada (Capítulo 16.3).
 - La aglomeración de nanopartículas requiere dispersión ultrasónica (40 kHz, Capítulo 5, 5.3).

Comparación de tecnologías de preparación de materiales energéticos de boruro de tungsteno

método	actuación	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
ECV	Conductividad ~10 ⁴ S/cm	300	Uniformidad	Subproductos	5.2, 17.5
Sol-Gel	Superficie específica > 60 m ² /g	100	bajo costo	Reunión	5.5, 6.1
plasma	Pureza>99,9%	200	Alta actividad	Alto consumo de energía	5.3

12.6 Tendencias de mercado y desarrollo de las aplicaciones energéticas del boruro de tungsteno

El mercado de aplicaciones energéticas del boruro de tungsteno está impulsado por la nueva demanda de energía y los objetivos de neutralidad de carbono, y necesita abordar cuestiones de costos y escala.

- **Estado del mercado (2024)** :
 - **Tamaño** : El mercado mundial de materiales energéticos de boruro de tungsteno es de aproximadamente 40 millones de dólares estadounidenses, y Asia representa aproximadamente el 65 % (China, Japón, Capítulo 14.1).
 - **Aplicaciones** : Baterías ~40%, celdas de combustible ~30%, celdas solares ~20%, almacenamiento de hidrógeno ~10%.
 - **Precio** : ~100 USD/kg (nanopartículas), ~300 USD/kg (película, Capítulo 14.2).
- **Conductores** :
 - **Demanda** : Crecimiento de vehículos eléctricos y energía renovable ~12%/año, producción ~500 toneladas en 2030 (Capítulo 5, 5.6).
 - **Tecnología** : Nano WB₂ (Capítulo 5.5) y Optimización de IA (Capítulo 17.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 20%.
 - **Reglamento** : EU CBAM (2026, Capítulo XV, 15.2) promueve materiales de energía verde.
- **Tendencias futuras (2025-2030)** :
 - **Reducción de costos** : La producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~80 USD/kg y el tamaño del mercado es de ~US\$70 millones.

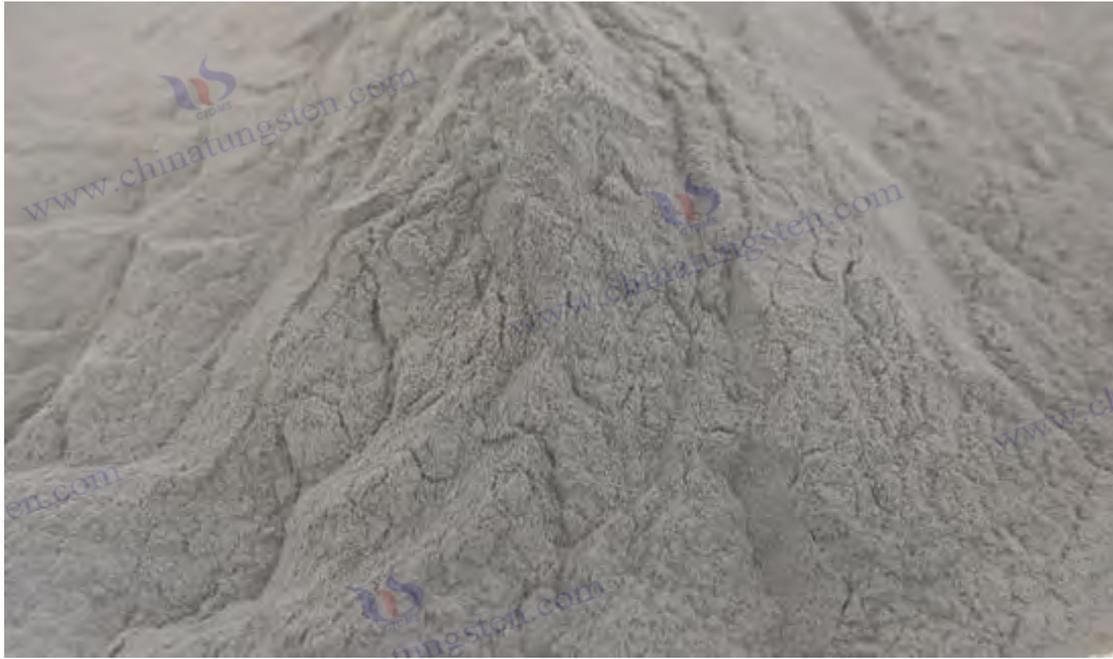
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Nuevas aplicaciones** : Baterías de estado sólido y almacenamiento eficiente de hidrógeno, que representan aproximadamente el 15 %.
- **Fabricación ecológica** : tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío** :
 - Los materiales a base de carbono (cuestan alrededor de 20 USD/kg) compiten en el mercado de gama baja.
 - La ampliación industrial requiere avances en la estabilidad del material (>10.000 horas).

Tabla 12.6 Mercado energético y tendencias del boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos en 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.4	0.7	Nueva Energía	competir	14.1
Costo (USD/kg)	100–300	80	Escala	estabilidad	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 13 Aplicaciones mecánicas y estructurales del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) se usa ampliamente en el campo de la maquinaria y la estructura debido a su dureza ultraalta (~40 GPa, Capítulo 2 2.5), bajo coeficiente de fricción (~0.25, Capítulo 6 6.4), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste <math><10^{-6}</math> mm³ / (N · m), Capítulo 7 7.4) y estabilidad térmica (>2000 °C, Capítulo 8 8.1). Es adecuado para recubrimientos resistentes al desgaste (extensión de vida útil ~50%), herramientas de corte (aumento de velocidad de corte ~20%) y materiales compuestos estructurales (resistencia ~1.5 GPa). Este capítulo analiza en detalle la aplicación, las propiedades mecánicas y el mecanismo microscópico, la tecnología de preparación, el estado del mercado y la tendencia de desarrollo del boruro de tungsteno en recubrimientos resistentes al desgaste, herramientas de corte y materiales compuestos, y proporciona soporte técnico para la industrialización mecánica (Capítulo 14 14.3) y la fabricación ecológica (Capítulo 16 16.4) del boruro de tungsteno.

13.1 Aplicación de boruro de tungsteno en recubrimientos resistentes al desgaste

Los recubrimientos resistentes al desgaste de boruro de tungsteno se utilizan ampliamente en piezas mecánicas y moldes debido a su alta dureza y bajo coeficiente de fricción.

- **Escenarios de aplicación :**

- **Piezas mecánicas :** recubrimiento WB₂ (espesor ~2–5 μm, Capítulo 5.2) en la superficie del engranaje, dureza ~42 GPa, tasa de desgaste <math><10^{-6}</math> mm³ / (N · m), vida útil extendida en ~50% (~10 000 horas).
- **Matriz :** Recubrimiento WB (espesor ~1 μm) en la matriz de estampación, coeficiente de fricción ~0,25, resistencia al desgaste mejorada en ~30%, adhesión reducida (<math><5\%</math>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cojinetes** : Película de WB_2 (espesor $\sim 3 \mu m$) sobre cojinetes de bolas, resistencia a la corrosión (NaCl, 3,5 % en peso, $60^\circ C$) $< 0,005$ mm/año, pérdida de fricción reducida en ~ 20 %.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Dureza** : > 38 GPa (Capítulo 6, 6.4).
 - **Coefficiente de fricción** : $< 0,3$ (Capítulo 7.4).
 - **Adhesión** : Energía de enlace $\sim 1,5$ eV/ \AA^2 (Capítulo 3.3), anti-peeling (> 50 N).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el recubrimiento WB_2 se utilizará en engranajes de transmisión de automóviles, reduciendo el desgaste en un ~ 25 % ($< 0,01$ mm/año) y aumentando la eficiencia en un ~ 10 %.
- **desafío** :
 - La tensión residual en el revestimiento ($\sim 0,8$ GPa) puede provocar desconchado y requerir recocido ($500^\circ C$, Capítulo 5.2).
 - La oxidación a alta temperatura ($> 1000^\circ C$) requiere dopaje (Si, < 5 at%, Capítulo 8, 8.4).

Tabla 13.1 Parámetros de aplicación del recubrimiento resistente al desgaste de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Dureza (GPa)	42	Alta resistencia al desgaste	Estrés residual	6.4, 5.2
Tasa de desgaste ($mm^3 / (N \cdot m)$)	$< 10^{-6}$	Larga vida	Oxidación	7.4, 8.4
Coefficiente de fricción	0,25	Baja fricción	Descamación	3.3

13.2 Aplicación del boruro de tungsteno en herramientas de corte

Los recubrimientos y bloques de boruro de tungsteno son adecuados para el corte a alta velocidad y el procesamiento de materiales duros debido a su alta dureza y estabilidad térmica.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Recubrimiento de herramientas** : recubrimiento WB_2 (espesor $\sim 3 \mu m$, Capítulo 5.2) en herramientas de carburo, velocidad de corte ~ 300 m/min, vida útil extendida en ~ 40 % (~ 5000 cortes).
 - **Broca** : bloque WB (densidad > 98 %, Capítulo 5.1) mecanizado de aleación de titanio, tasa de desgaste $< 10^{-5}$ $mm^3 / (N \cdot m)$, reducción de temperatura de corte ~ 15 % ($< 600^\circ C$).
 - **Fresa** : recubrimiento compuesto WB_2/Al_2O_3 (período ~ 10 nm), dureza ~ 40 GPa, resistencia al desgaste mejorada en ~ 25 %.
- **Requisitos técnicos** :
 - **Dureza** : > 40 GPa (Capítulo 6, 6.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estabilidad térmica** : >1500°C (Capítulo 8.1).
- **Tenacidad** : ~4 MPa·m^{1/2} (Capítulo 6, 6.3).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, se utilizarán herramientas recubiertas de WB₂ para el procesamiento de aleaciones de titanio para aviación, con una eficiencia de corte aumentada en un ~20% y una vida útil de la herramienta de ~6000 minutos.
- **desafío** :
 - El desajuste de expansión térmica entre el recubrimiento y el sustrato (~5×10⁻⁶ K⁻¹, Capítulo 8, 8.3) genera tensión (~1 GPa).
 - Es necesario optimizar la uniformidad del recubrimiento (>95%) de formas complejas (Capítulo 5.2).

Tabla 13.2 Parámetros de aplicación de las herramientas de corte de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Cortando la vida (veces)	5000	Larga vida	Desajuste de expansión térmica	8.3, 5.2
Dureza (GPa)	40	Alta resistencia al desgaste	Uniformidad	6.4
Temperatura de corte (°C)	<600	Fiebre baja	estrés	8.1

13.3 Aplicación del boruro de tungsteno en materiales compuestos estructurales

El boruro de tungsteno se utiliza como fase de refuerzo en materiales compuestos para mejorar la resistencia y la resistencia al desgaste, y es adecuado para piezas estructurales aeroespaciales y automotrices.

- **Escenarios de aplicación** :
 - **Compuestos de matriz metálica** : compuestos de matriz de Al reforzados con partículas WB₂ (<5 μm, Capítulo 5.5), resistencia ~1,5 GPa, resistencia al desgaste mejorada en ~30%.
 - **Compuestos de matriz cerámica** : compuesto WB₂ / SiC (10:90), tenacidad a la fractura ~5 MPa·m^{1/2}, resistencia a la temperatura >1500 °C (Capítulo 8, 8.1).
 - **Compuestos a base de polímeros** : resina epoxi reforzada con nanopartículas WB₂ (<50 nm), que aumentan la dureza en un ~20% (~2 GPa).
- **Requisitos técnicos** :
 - **Fuerza** : >1 GPa.
 - **Tenacidad** : >4 MPa·m^{1/2} (Capítulo 6, 6.3).
 - **Dispersabilidad** : Aglomeración de partículas <5% (Capítulo 5.3).
- **Ejemplos** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En 2024, los materiales compuestos WB_2 / Al se utilizarán en pistones de automóviles, reduciendo el peso en un $\sim 10\%$ ($\sim 0,5$ kg) y aumentando la vida útil en un $\sim 25\%$.
- **desafío :**
 - La aglomeración de partículas reduce el rendimiento y requiere modificación de la superficie (PVP, $< 0,1\%$ en peso , Capítulo 5, 5.3).
 - Es necesario suprimir las reacciones interfaciales de alta temperatura (> 1000 °C) (Capítulo 8, 8.4).

Tabla 13.3 Parámetros de aplicación de materiales compuestos estructurales de boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Fuerza (GPa)	1.5	Gao Qiang	Reunión	5.5, 6.3
Tenacidad ($MPa \cdot m^{1/2}$)	5	Resistencia a las grietas	Reacción de la interfaz	8.1, 8.4
Resistencia al desgaste mejorada (%)	30	Larga vida	costo	7.4

13.4 Propiedades mecánicas y microestructura del boruro de tungsteno

Las propiedades mecánicas del boruro de tungsteno dependen de la estructura cristalina y del micromecanismo , que deben optimizarse mediante análisis experimental y teórico.

- **Propiedades mecánicas :**
 - **Dureza :** $\sim 40-42$ GPa (Capítulo 6, 6.4), debido a la alta fuerza del enlace covalente WB (Capítulo 3, 3.2) ($\sim 1,5$ eV/Å²).
 - **Tenacidad :** ~ 4 $MPa \cdot m^{1/2}$ (Capítulo 6.3), el deslizamiento del límite de grano (< 50 nm, Capítulo 6.2) mejora la resistencia al agrietamiento.
 - **Resistencia al desgaste :** tasa de desgaste $< 10^{-6}$ mm³ / (N · m), superficie densa (porosidad $< 1\%$, Capítulo 6, 6.3).
- **Mecanismo microscópico :**
 - **Estructura cristalina :** WB_2 (P6₃/mmc, Capítulo 2.2) estructura en capas, fuerte resistencia al corte (~ 20 GPa) .
 - **Control de defectos :** densidad de dislocaciones $< 10^{12}/cm^2$ (Capítulo 6.2), mejorando la tenacidad en un $\sim 15\%$.
 - **Estado de la superficie :** La superficie terminada en B (Capítulo 6.1) reduce el coeficiente de fricción en $\sim 10\%$ ($\sim 0,25$).
- **Técnicas de caracterización :**
 - **Nanoindentación :** medición de dureza y tenacidad (Capítulo 6, 6.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **TEM** : Observar los límites de grano y las dislocaciones (resolución ~0,1 nm, Capítulo 6, 6.2).
- **Cálculos DFT** : Análisis de las energías de enlace del WB (Capítulo 3.3, error < 0,1 eV).
- **optimización** :
 - **Dopaje** : Zr (<2 at%) mejora la tenacidad en ~20% (~4,8 MPa·m^{1/2}).
 - **Nanoestructura** : granos <20 nm (Capítulo 5.5) Dureza aumentada en ~5% (~44 GPa).
- **desafío** :
 - A altas temperaturas (>1500 °C), la tenacidad disminuye y se requiere un dopaje térmicamente estable.
 - El equipo de caracterización microscópica es costoso (aproximadamente \$5 millones).

Tabla 13.4 Propiedades mecánicas y mecanismos del boruro de tungsteno

parámetro	valor	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Dureza (GPa)	42	Gao Qiang	Disminución de la dureza	6.4, 3.2
Tenacidad (MPa·m^{1/2})	4	Resistencia a las grietas	Costo de caracterización	6.3, 5.5
Tasa de desgaste (mm³ / (N · m))	<10 ⁻⁶	Resistente al desgaste	temperatura alta	7.4

13.5 Tecnología de preparación de materiales mecánicos de boruro de tungsteno

La preparación de materiales mecánicos de boruro de tungsteno adopta principalmente sinterización por prensado en caliente (Capítulo 5.1), deposición química de vapor (CVD, Capítulo 5.2) y síntesis asistida por plasma (Capítulo 5.3).

- **Método de preparación** :
 - **Sinterización por prensado en caliente** :
 - **Proceso** : Polvo WB₂ (<5 μm, Capítulo 5.5) sinterizado a 2000°C, 30 MPa, densidad >99%.
 - **Ventajas** : Adecuado para formas complejas (cuchillos), dureza ~40 GPa.
 - **Optimización** : CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar los parámetros de sinterización en 2024 (Capítulo 17, 17.5), aumentando la densidad en ~0,5%.
 - **Enfermedad cardiovascular** :
 - **Proceso** : WF₆ + B₂H₆ deposita un revestimiento WB₂ (Capítulo 5.2) a 400–600 °C, con un espesor de ~2–5 μm.
 - **Ventajas** : uniformidad >95%, alta resistencia al desgaste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Optimización** : La tasa de CVD de baja presión (<5 Pa) aumentó en ~40 % (~1,7 μm /h).
- **Síntesis asistida por plasma** :
 - **Proceso** : W+B se vaporiza en plasma (>5000 °C) para producir nanopolvo de WB₂ (<50 nm, Capítulo 5.3).
 - **Ventajas** : Alta pureza (>99,9%, Capítulo 6.1), adecuado para materiales compuestos.
 - **Optimización** : el rendimiento del plasma pulsado (50 kHz) aumentó en un ~88%, costo ~200 USD/kg.
- **Técnicas de optimización** :
 - **Dopaje** : Si (<5 at%) mejora la resistencia a la oxidación a ~100 °C (Capítulo 8, 8.4).
 - **Estructura multicapa** : WB₂ / TiN (período ~5 nm) resistencia al desgaste aumentada en ~20%.
 - **Nanopartículas** : granos <20 nm (Capítulo 5.5) La dureza aumenta en ~5%.
- **desafío** :
 - El costo del tratamiento del subproducto CVD (HF) es de ~50 USD/tonelada (Capítulo 16.3).
 - Los equipos de alta temperatura requieren una gran inversión (aproximadamente 3 millones de dólares).

Tabla 13.5 Comparación de las tecnologías de preparación mecánica de materiales de boruro de tungsteno

método	actuación	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sinterización por prensado en caliente	Densidad>99%	200	Formas complejas	Costo del equipo	5.1, 17.5
ECV	Uniformidad>95%	300	Resistente al desgaste	Subproductos	5.2, 16.3
plasma	Pureza>99,9%	200	Nanoescala	Alto consumo de energía	5.3

13.6 Tendencias de mercado y desarrollo de las aplicaciones mecánicas del boruro de tungsteno

El mercado de aplicaciones mecánicas del boruro de tungsteno está impulsado por las mejoras en la fabricación y las necesidades aeroespaciales, que requieren abordar cuestiones de costo y seguridad. Esta sección incluye un resumen de la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) del boruro de tungsteno para garantizar un funcionamiento seguro en aplicaciones mecánicas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estado del mercado (2024) :**
 - **Tamaño :** El mercado global de materiales mecánicos de boruro de tungsteno es de aproximadamente US\$60 millones, y Asia representa aproximadamente el 70 % (China, Corea del Sur, Capítulo 14.1).
 - **Aplicaciones :** Recubrimientos resistentes al desgaste ~50%, herramientas de corte ~30%, materiales compuestos ~20%.
 - **Precio :** ~200 USD/kg (trozo), ~300 USD/kg (recubrimiento, Capítulo 14.2).
- **Conductores :**
 - **Demanda :** Las industrias de fabricación aeroespacial y automotriz crecen ~8%/año, con una producción de ~600 toneladas en 2030 (Capítulo 5.6).
 - **Tecnología :** Nano WB₂ (Capítulo 5.5) y la optimización de IA (Capítulo 17.5) mejoran el rendimiento en aproximadamente un 15%.
 - **Reglamento :** UE REACH (Capítulo 15.2) promueve materiales ecológicos.
- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Reducción de costos :** la producción a gran escala (Capítulo 5.6) reduce el costo a ~150 USD/kg, con un tamaño de mercado de ~100 millones de USD.
 - **Nuevas aplicaciones :** piezas estructurales impresas en 3D (resistencia ~1,5 GPa), que representan ~10%.
 - **Fabricación ecológica :** tasa de recuperación de gases residuales > 95% (Capítulo 16.3), emisiones de carbono reducidas en ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
- **Resumen de MSDS (boruro de tungsteno, WB₂) :**
 - **Propiedades químicas :** estable, insoluble en agua, temperatura de descomposición > 2000 °C (Capítulo 2.3).
 - **Riesgos para la salud :** La inhalación de polvo puede irritar las vías respiratorias. Se recomienda el uso de mascarilla N95 (Capítulo 15.3).
 - **Medidas de seguridad :** Utilice una campana extractora durante la operación y evite el contacto con la piel (guantes de >0,5 mm de espesor).
 - **Almacenamiento :** Sellado en un ambiente seco (<30°C, HR <50%), lejos de sustancias ácidas.
 - **Eliminación de residuos :** Reciclar de acuerdo con las normas sobre residuos peligrosos (Capítulo 16, 16.3) y evitar el vertido directo.
- **desafío :**
 - El carburo de tungsteno (cuesta unos 100 USD/kg) compete en el extremo inferior del mercado.
 - Las pruebas de seguridad (verificación de MSDS) son costosas (aproximadamente USD 100 000/lote).

Tabla 13.6 Mercado y tendencias de la maquinaria de boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos en 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	0.6	1.0	fabricación	competir	14.1
Costo (USD/kg)	200-300	150	Escala	Pruebas de seguridad	14.2, 5.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Tecnología verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 14 Industrialización y análisis del mercado del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) tiene una amplia gama de aplicaciones en electrónica (Capítulo 9), catálisis (Capítulo 10), biomedicina (Capítulo 11), energía (Capítulo 12) y maquinaria (Capítulo 13) debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas (dureza ~40 GPa, Capítulo 2 2,5; conductividad ~10⁴S/cm, Capítulo 6 6,5; estabilidad química, Capítulo 7 7,5). El tamaño del mercado global es de aproximadamente US\$200 millones en 2024 y se espera que alcance los US\$350 millones en 2030 (CAGR ~10%). En este capítulo se analiza la visión general del mercado mundial, los costos y precios de producción, la tecnología de industrialización, la distribución del mercado, la competencia y los sustitutos, así como las tendencias futuras y los impactos de las políticas del boruro de tungsteno, y se proporciona apoyo estratégico para su producción a gran escala (Capítulo 5.6) y el desarrollo verde (Capítulo 16.4).

14.1 Panorama del mercado mundial del boruro de tungsteno

El mercado de boruro de tungsteno está impulsado por la demanda de materiales de alto rendimiento, y Asia domina la producción y el consumo.

- **Tamaño del mercado :**
 - En 2024, el mercado mundial será de 200 millones de dólares y la producción será de 2.000 toneladas (Capítulo 5.6).
 - Asia (China, Japón, Corea del Sur) representa ~65%, América del Norte ~20% y Europa ~15%.
- **Aplicaciones principales :**
 - Maquinaria (Capítulo 13.6): ~30% (~\$60 millones).
 - Energía (Capítulo 12, 12.6): ~20% (~\$40 millones).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Electrónica (Capítulo 9, 9.6): ~15% (~\$30 millones).
- Catálisis (Capítulo 10, 10.6): ~10% (~\$20 millones).
- Biomedicina (Capítulo 11, 11.6): ~5% (~\$0,05 mil millones).
- **Características regionales :**
 - **China** : Producción ~50% (~1000 toneladas), ventaja de costos (~100 USD/kg).
 - **Japón** : Productos de alto valor añadido (película, ~300 USD/kg), tecnología líder.
 - **Europa** : Alta demanda de fabricación ecológica (Capítulo 16, 16.3) y regulaciones estrictas (Capítulo 15, 15.2).
- **Ejemplos :**
 - En 2024, el mercado chino representará aproximadamente el 40% del recubrimiento resistente al desgaste de boruro de tungsteno mundial (Capítulo 13.1) y exportará aproximadamente 500 toneladas.
- **desafío :**
 - Alta concentración del mercado (>60% en Asia) y riesgos en la cadena de suministro.
 - Las barreras tecnológicas restringen la entrada de nuevos participantes (los costos de I+D rondan los 1.000 millones de dólares).

Tabla 14.1 Panorama del mercado mundial de boruro de tungsteno (2024)

área	Cuota de mercado (%)	Producción (toneladas)	Características	desafío	Capítulos relacionados
Asia	65	1300	Bajo costo	Cadena de suministro	13.6, 12.6
América del norte	20	400	Fuerte innovación	Alto costo	9.6
Europa	15	300	Demanda verde	Reglamento	15.2, 16.3

14.2 Análisis de costos y precios de producción del boruro de tungsteno

El costo de producción y el precio del boruro de tungsteno varían según el método de preparación y el área de aplicación.

- **Costo de producción :**
 - **Nanopartículas (sol-gel, Capítulo 5.5)** : ~100 USD/kg (materias primas ~40%, energía ~30%).
 - **Películas delgadas (CVD, Capítulo 5.2)** : ~300 USD/kg (equipo ~50%, gas ~30%).
 - **Material en bloque (prensado en caliente y sinterización, Capítulo 5.1)** : ~200 USD/kg (materia prima ~50%, alta temperatura ~40%).
- **Precio de mercado :**
 - **Nanopartículas** : ~150–200 USD/kg (Catálisis, Biomedicina, Capítulo 10, 10.6, Capítulo 11, 11.6).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Películas delgadas** : ~300–400 USD/kg (Electrónica, Energía, Capítulo 9, 9.6, Capítulo 12, 12.6).
- **Trozos** : ~200–250 USD/kg (Maquinaria, Capítulo 13, 13.6).
- **Factores influyentes** :
 - **Materias primas** : Los precios del polvo de tungsteno (~30 USD/kg) y del ácido bórico (~5 USD/kg) fluctúan ~10%/año.
 - **Energía** : la CVD consume ~500 kWh/tonelada y cuesta ~50 USD/tonelada.
 - **Mano de obra** : el costo de la mano de obra en Asia es de ~20 USD/h, en Europa y América es de ~50 USD/h.
- **Ejemplos** :
 - Para 2024, el costo del nano WB₂ sol-gel disminuirá aproximadamente un 15 % (aproximadamente 85 USD/kg) debido a la optimización de la materia prima (Capítulo 5.5).
- **desafío** :
 - Los altos costos de las películas de gama alta (~400 USD/kg) limitan la expansión del mercado.
 - El tratamiento de subproductos (HF, ~50 USD/tonelada, Capítulo 16.3) aumenta los costos ambientales.

Tabla 14.2 Costo de producción y precio del boruro de tungsteno

Tipo de producto	Costo (USD/kg)	Precio (USD/kg)	Relación de costos	desafío	Capítulos relacionados
Nanopartículas	100	150–200	Materias primas 40%	Subproductos	5.5, 16.3
película	300	300–400	Equipo 50%	Alto costo	5.2, 9.6
Bloquear	200	200–250	Materias primas 50%	energía	5.1, 13.6

14.3 Tecnología de industrialización y producción a gran escala de boruro de tungsteno

La industrialización del boruro de tungsteno depende de una tecnología de preparación eficiente y de la optimización de procesos a gran escala.

- **Tecnología de preparación** :
 - **Método sol-gel (Capítulo 5.5)** :
 - Producción: ~500 kg/lote, costo ~100 USD/kg.
 - Optimización: el rendimiento del microreactor (distribución de tamaño de partícula <10 nm) aumentó en ~20%.
 - **ECV (Capítulo 5.2)** :
 - Rendimiento: ~10 kg/lote, homogeneidad >95%.
 - Optimización: CTIA GROUP LTD utilizará IA para optimizar el flujo de aire en 2024 (Capítulo 17, 17.5), aumentando la eficiencia en aproximadamente un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sinterización por prensado en caliente (Capítulo 5.1) :**
 - Rendimiento: ~100 kg/lote, densidad >99%.
 - Optimización: La producción del horno de sinterización continua (2000 °C) aumentó en un ~30 %.
- **Producción a gran escala :**
 - **Automatización :** La carga robótica (eficiencia ~90%) reduce los costos laborales ~20%.
 - **Eficiencia energética :** el sistema de recuperación de calor (tasa de recuperación ~50%) reduce el consumo de energía en un ~30% (~350 kWh/tonelada).
 - **Control de calidad :** XPS (Capítulo 6.1) para verificar la pureza (>99,9%), costo ~500 USD/lote.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, las fábricas chinas adoptarán la CVD continua, con un aumento de la producción de ~25% (~12 kg/lote) y una disminución de los costos de ~10%.
- **desafío :**
 - Alta inversión en equipos (horno CVD ~\$5 millones).
 - El tratamiento respetuoso con el medio ambiente (HF, recuperación de gases residuales > 95%, Capítulo 16, 16.3) cuesta ~100 USD/tonelada.

Tabla 14.3 Comparación de tecnologías de industrialización del boruro de tungsteno

tecnología	Producción (kg/lote)	Costo (USD/kg)	ventaja	desafío	Capítulos relacionados
Sol-Gel	500	100	Alta producción	Reunión	5.5, 6.1
ECV	10	300	Uniformidad	invertir	5.2, 17.5
Sinterización por prensado en caliente	100	200	Densidad alta	Consumo de energía	5.1, 16.3

14.4 Distribución del mercado de boruro de tungsteno en las principales industrias

La distribución del mercado del boruro de tungsteno en las industrias de maquinaria, energía, electrónica, catálisis y biomédica refleja su versatilidad.

- **Distribución industrial (2024) :**
 - **Maquinaria (Capítulo 13.6) :** ~US\$60 millones, los recubrimientos resistentes al desgaste representan ~50%, las herramientas de corte ~30%.
 - **Energía (Capítulo 12, 12.6) :** ~\$40 millones, baterías ~40%, celdas de combustible ~30%.
 - **Electrónica (Capítulo 9.6) :** ~\$30 millones, sensores ~40%, electrodos ~30%.
 - **Catálisis (Capítulo 10, 10.6) :** ~US\$20 millones, electrocatálisis ~50%, fotocatalisis ~30%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Biomedicina (Capítulo 11, 11.6)** : ~\$50 millones, recubrimientos ~60%, administración de medicamentos ~30%.
- **Puntos de crecimiento :**
 - **Mecánica** : La demanda aeroespacial (~8 %/año) impulsa el mercado de recubrimientos.
 - **Energía** : La energía del hidrógeno (~12 %/año) impulsa catalizadores y materiales de almacenamiento de hidrógeno.
 - **Biomedicina** : La medicina de precisión (~10 %/año) aumenta la demanda de nanopartículas.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, el mercado de materiales de batería de boruro de tungsteno en la industria energética (Capítulo 12.1) aumentará aproximadamente un 15% hasta alcanzar unos 16 millones de dólares estadounidenses.
- **desafío :**
 - No existe uniformidad en las normas técnicas entre las industrias (Capítulo 15, 15.2).
 - Los nichos de mercado (biomedicina) son difíciles de escalar.

Tabla 14.4 Distribución del mercado de las principales industrias de boruro de tungsteno (2024)

industria	Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	Proporción (%)	Tasa de crecimiento (%/año)	de desafío	Capítulos relacionados
mecánico	0.6	30	8	estándar	13.6
energía	0.4	20	12	costo	12.6
electrónico	0.3	15	10	competir	9.6

14.5 Análisis de la competencia y de los sustitutos del mercado de boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno enfrenta la competencia de otros materiales de alto rendimiento y necesita mantener su ventaja mediante la optimización del rendimiento y los costos.

- **Materiales competitivos :**
 - **Carburo de tungsteno (WC)** : costo ~100 USD/kg, dureza ~25 GPa , participación de mercado mecánica ~40% (Capítulo 13.6).
 - **Nanotubos de carbono (CNT)** : conductividad ~ 10^5 S/cm, costo ~50 USD/kg, participación en el mercado de la electrónica ~30% (Capítulo 9, 9.6).
 - **Catalizador a base de Ni** : costo ~30 USD/kg, participación de mercado catalítica ~50% (Capítulo 10, 10.6).
 - **Recubrimientos a base de Ti** : cuestan aproximadamente 50 USD/kg, el mercado biomédico representa aproximadamente el 35 % (Capítulo 11.6).
- **Ventajas del boruro de tungsteno :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Rendimiento integral: dureza (~40 GPa), conductividad (~10⁴ S/cm), estabilidad (<0,005 mm/año).
- Versatilidad: Aplicaciones intersectoriales (Capítulos 9 a 13).
- **Amenaza de sustitutos :**
 - Mercado de gama baja: WC y Ni tienen costos bajos, lo que amenaza las aplicaciones mecánicas y catalíticas.
 - Mercado de alta gama: CNT y grafeno (~100 USD/kg) compiten por la electrónica y la energía.
- **Estrategias de afrontamiento :**
 - **Reducción de costos :** La producción a gran escala (Capítulo 5.6) ha caído a ~80 USD/kg.
 - **Optimización del rendimiento :** el dopaje (N, Si, Capítulo 3.4) mejora el rendimiento en aproximadamente un 20%.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, el recubrimiento WB₂ reemplazará al WC a través del dopaje de Si (Capítulo 8.4), y su participación de mercado aumentará en aproximadamente un 10%.
- **desafío :**
 - Las alternativas se desarrollan rápidamente (aproximadamente 5 años/material nuevo).
 - Los clientes son sensibles a los costos (aproximadamente el 30% prefiere precios bajos).

Tabla 14.5 Comparación del boruro de tungsteno y sus sustitutos

Material	Costo (USD/kg)	actuación	Amenazas del mercado	del respuesta	Capítulos relacionados
WC	100	Dureza 25 GPa	mecánico	Dopaje	13.6, 8.4
CNT	50	Conductividad 10 ⁵ S/cm	electrónico	Escala	9.6, 5.6
Ni	30	Eficiencia catalítica 90%	catalítico	actuación	10.6

14.6 Tendencias futuras e impactos políticos de la industrialización del boruro de tungsteno

Se espera que el mercado de boruro de tungsteno esté impulsado por los avances tecnológicos, las políticas ecológicas y la demanda global en el futuro.

- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Crecimiento del mercado :** En 2030, el mercado será de ~US\$350 millones, la producción será de ~3.500 toneladas y la CAGR será de ~10%.
 - **Reducción de costos :** La producción a gran escala (Capítulo 5.6) ha reducido el costo a ~80 USD/kg.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Nuevas aplicaciones** : antenas 6G (Capítulo 9, 9.6), baterías de estado sólido (Capítulo 12, 12.6) e interfaces neuronales (Capítulo 11, 11.6), que representan aproximadamente el 15%.
- **Fabricación ecológica** : tasa de recuperación de gases residuales > 95 % (Capítulo 16.3), emisiones de carbono ~0,2 toneladas de CO₂/tonelada.
- **Impacto de la política** :
 - **UE** : REACH (Capítulo XV, 15.2) y CBAM (2026) exigen una producción baja en carbono, lo que añade un 10 % aproximadamente a los costes.
 - **China** : La neutralidad de carbono (2060) promueve la tecnología verde y subsidios de ~5000 USD/tonelada.
 - **Estados Unidos** : La Ley de Reducción de la Inflación (2022) apoya nuevos materiales energéticos, con una inversión de unos 100 millones de dólares.
- **Ejemplos** :
 - En 2024, China adoptará una política de neutralidad de carbono y la proporción de producción verde de boruro de tungsteno (Capítulo 16.3) aumentará en aproximadamente un 20%.
- **desafío** :
 - El cumplimiento de la política es alto (~100 USD/tonelada).
 - Las barreras comerciales globales (aranceles ~5%) afectan las exportaciones.

Tabla 14.6 Tendencias futuras del mercado de boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	Conductores	desafío	Capítulos relacionados
Tamaño del mercado (miles de millones de dólares estadounidenses)	2.0	3.5	Nuevas aplicaciones	Costos de las políticas	9.6–13.6
Costo (USD/kg)	100–400	80	Escala	Barreras comerciales	5.6, 14.2
Emisiones de carbono (toneladas de CO₂/tonelada)	0.3	0.2	Política Verde	invertir	16.3, 15.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 15 Normas y requisitos reglamentarios para el boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (WB , WB_2 , W_2B) se utiliza ampliamente en electrónica (Capítulo 9), catálisis (Capítulo 10), biomedicina (Capítulo 11), energía (Capítulo 12) y maquinaria (Capítulo 13). Debe cumplir con las normas internacionales y regionales (como GB/T 26037-2020 e ISO 10993) y las regulaciones (como REACH y CBAM) para garantizar la calidad, la seguridad y el cumplimiento ambiental. En 2024, el costo global del boruro de tungsteno para el cumplimiento regulatorio sería de aproximadamente 100 USD/tonelada, lo que representa aproximadamente el 5 % del costo de producción (Capítulos 14 y 14.2). En este capítulo se analizan las normas internacionales, las reglamentaciones ambientales y de seguridad, las reglamentaciones biomédicas, los procesos de prueba y certificación, las diferencias regionales y los desafíos y el desarrollo futuro del cumplimiento normativo del boruro de tungsteno, y se proporciona orientación para su industrialización (Capítulo 14, 14.3) y la fabricación ecológica (Capítulo 16, 16.4).

15.1 Descripción general de las normas internacionales relacionadas con el boruro de tungsteno

Las normas internacionales para el boruro de tungsteno cubren principalmente las propiedades del material, los métodos de prueba y los requisitos de aplicación.

- **Criterios principales :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **ISO 6506 (dureza Brinell)** : se utiliza para probar la dureza WB₂ (~40 GPa , Capítulo 6, 6.4).
- **ASTM G99 (Fricción y desgaste)** : Evaluar la tasa de desgaste de los recubrimientos (10^{-6} mm³ / (N · m), Capítulo 7.4).
- **GB/T 26037-2020 (China)** : especifica la pureza (>99,5 %) y el tamaño de partícula (50 μm , Capítulo 5, 5.5) del polvo de boruro de tungsteno.
- **ISO 10993 (Biocompatibilidad)** : Para aplicaciones biomédicas (Capítulo 11, 11.4), viabilidad celular > 90%.
- **Áreas de aplicación :**
 - **Mecánica (Capítulo 13)** : ISO 6508 (dureza Rockwell), dureza > 38 GPa .
 - **Electrónica (Capítulo 9)** : IEC 62624 (Conductividad eléctrica de nanomateriales), ~10⁴ S/cm.
 - **Catálisis (Capítulo 10)** : ASTM D3908 (actividad catalítica), sobrepotencial 150 mV.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, las exportaciones de recubrimientos WB₂ de China (Capítulo 13.1) deben cumplir con GB/T 26037-2020, y el costo de prueba es de ~200 USD/lote.
- **desafío :**
 - El ciclo de actualización de las normas internacionales es largo (unos 5 años) y va a la zaga del desarrollo tecnológico.
 - La incompatibilidad entre normas (como las definiciones de tamaño de partículas ISO y GB/T) aumenta los costos de certificación.

Tabla 15.1 Normas internacionales relacionadas con el boruro de tungsteno

estándar	contenido	parámetro	solicitud	desafío	Capítulos relacionados
ISO 6506	Dureza Brinell	~40 GPa	mecánico	Actualizaciones lentas	6.4, 13.1
ASTM G99	Tasa de desgaste	10^{-6} mm ³ / (N·m)	revestimiento	costo	7.4
GB/T 26037-2020	Pureza>99,5%	Tamaño de partícula 50 μm	Producción	Incompatible	5.5

15.2 Normas ambientales y de seguridad para el boruro de tungsteno

La producción y el uso de boruro de tungsteno están sujetos a normas medioambientales y de seguridad para reducir los riesgos sanitarios y ecológicos.

- **Regulaciones principales :**
 - **REACH UE** : requiere el registro de productos químicos WB₂ (CAS no armonizado), límites en las emisiones de polvo (10 mg/m³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **EU CBAM (2026)** : Se impondrá un impuesto al carbono sobre el boruro de tungsteno importado, y las emisiones de carbono deberán ser <0,3 toneladas de CO₂/tonelada (Capítulo 16.3).
- **” de China** : el polvo WB₂ requiere una MSDS (Capítulo 13, 13.6) para indicar el riesgo de inhalación.
- **OSHA (EE. UU.)** : El límite de polvo en el lugar de trabajo es <5 mg/m³ y se requiere protección N95.
- **Requisitos ambientales :**
 - **Tratamiento de gases residuales** : tasa de recuperación de subproductos de CVD (HF) >95% (Capítulo 16.3), costo ~50 USD/tonelada.
 - **Aguas residuales** : Los iones de tungsteno (<1 mg/L) deben neutralizarse (pH 6-8).
 - **Residuos** : Reciclados como residuos peligrosos, costo ~100 USD/tonelada.
- **Requisitos de seguridad :**
 - **MSDS** : El polvo WB₂ es irritante para el tracto respiratorio, se recomienda utilizar campana extractora y guantes (>0,5 mm de espesor).
 - **Almacenamiento** : Sellado, seco (<30°C, HR <50%), lejos de ácido.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, el WB₂ importado a Europa requerirá la certificación CBAM y los costos de cumplimiento aumentarán en aproximadamente un 10 % (aproximadamente 30 USD/kg).
- **desafío :**
 - El cumplimiento normativo agrega un costo de aproximadamente el 5 % (aproximadamente USD 100/tonelada).
 - El tamaño nanométrico de los polvos (<50 nm) aumenta los riesgos para la salud y requiere nuevas regulaciones.

Tabla 15.2 Normativas ambientales y de seguridad para el boruro de tungsteno

Reglamento	Requerir	parámetro	Costo (USD/tonelada)	desafío	Capítulos relacionados
ALCANZAR	Polvo <10 mg/m ³	registro	100	costo	16.3
CBAM	Emisiones de carbono <0,3 toneladas de CO ₂ /tonelada	Proceso de dar un título	50	Nuevas regulaciones	14.6
Regulaciones chinas	Hoja de datos de seguridad (MSDS)	Riesgo de aspiración	100	Nanoriesgos	13.6

15.3 Requisitos reglamentarios para el boruro de tungsteno en el campo biomédico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El boruro de tungsteno debe cumplir estrictas normas de biocompatibilidad y seguridad para aplicaciones biomédicas.

- **Regulaciones principales :**
 - **ISO 10993 (Biocompatibilidad) :** Las nanopartículas WB₂ (Capítulo 11, 11.4) requieren una viabilidad celular > 90% y una tasa de hemólisis < 1%.
 - **FDA (EE. UU.) :** Los dispositivos médicos de clase II (como los recubrimientos) requieren la certificación 510(k), que demora aproximadamente 6 meses.
 - **China NMPA :** El WB₂ biomédico requiere registro y el costo de la prueba es de aproximadamente USD 50 000 por producto.
 - **MDR UE :** Los implantes WB₂ requieren una evaluación clínica, con un período de ~12 meses.
- **Requisitos de la prueba :**
 - **Citotoxicidad :** prueba MTT (Capítulo 6.1), concentración <100 µg / mL.
 - **Compatibilidad sanguínea :** tasa de hemólisis <1%, adhesión plaquetaria <5% (Capítulo 11, 11.4).
 - **Toxicidad a largo plazo :** Estudio en animales (ISO 10993-6), período > 6 meses.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, los implantes recubiertos de WB₂ (Capítulo 11.1) pasaron la certificación ISO 10993 y su costo fue de aproximadamente 100 000 USD.
- **desafío :**
 - La vía metabólica de las nanopartículas (<50 nm) no está clara y requiere pruebas adicionales.
 - El proceso de certificación es largo (aproximadamente 1 año) y costoso (aproximadamente 200 000 USD).

Tabla 15.3 Requisitos reglamentarios para el boruro de tungsteno en biomedicina

Reglamento	Requerir	parámetro	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
ISO 10993	Tasa de supervivencia > 90%	Hemólisis < 1%	100.000	metabolismo	11.4
FDA 510(k)	Biocompatible	Ciclo de 6 meses	50.000	ciclo	11.1
MDR	Evaluación clínica	Ciclo de 12 meses	200.000	costo	11.6

15.4 Proceso de prueba y certificación del boruro de tungsteno

La prueba y certificación del boruro de tungsteno garantiza la calidad y el cumplimiento normativo e implica un proceso de varios pasos.

- **Proceso de prueba :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Análisis químico** : ICP-MS (Capítulo 6.1) para medir la pureza (>99,9%), costo ~500 USD/muestra.
- **Propiedades físicas** : La nanoindentación (Capítulo 6, 6.4) mide la dureza (~40 GPa) y la prueba de fricción (Capítulo 7, 7.4) mide la tasa de desgaste.
- **Pruebas ambientales** : Cromatografía de gases (Capítulo 16.3) para medir las emisiones de HF (<1 ppm).
- **Biocompatibilidad** : MTT y pruebas en animales (Capítulo 11.4), ciclo ~3–12 meses.
- **Proceso de certificación** :
 - **Certificación ISO** : ISO 9001 (gestión de calidad), plazo de entrega ~ 6 meses, coste ~ 10.000 USD.
 - **Certificación regional** : China CNAS, EU CE, US UL, costo ~20 000 USD/certificación.
 - **Agencias de terceros** : SGS, TÜV, tarifa de prueba ~1000 USD/lote.
- **Ejemplos** :
 - En 2024, las nanopartículas WB₂ (Capítulo 5.5) pasaron la certificación CNAS, con un período de prueba de ~3 meses y un costo de ~15 000 USD.
- **desafío** :
 - El equipo de prueba es caro (ICP-MS ~500.000 USD).
 - La certificación transfronteriza se duplica y los costos se acumulan (~50.000 USD/producto).

Tabla 15.4 Proceso de prueba y certificación de boruro de tungsteno

proyecto	método	parámetro	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
Análisis químico	ICP-MS	Pureza>99,9%	500	equipo	6.1
Propiedades físicas	Nanoindentación	Dureza ~40 GPa	1000	ciclo	6.4, 7.4
Proceso de dar un título	ISO 9001	Ciclo de 6 meses	10.000	repetir	5.5

15.5 Análisis de las diferencias regionales en la estandarización del boruro de tungsteno

La estandarización del boruro de tungsteno varía debido a las regulaciones regionales y las diferencias de nivel técnico.

- **Normas regionales** :
 - **China** : GB/T 26037-2020, que enfatiza la pureza y el tamaño de partícula, con bajos costos de prueba (~200 USD/lote).
 - **UE** : Normas EN ISO, enfoque en la protección del medio ambiente (REACH), alto coste de certificación (~20.000 USD).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Estados Unidos** : norma ASTM, centrada en pruebas de rendimiento (dureza, desgaste), ciclo corto (~3 meses).
- **Japón** : norma JIS, centrada en aplicaciones de alta precisión (electrónica, Capítulo 9.6), con elevados requisitos técnicos.
- **Impacto diferencial** :
 - **Costo** : China < EE. UU. < UE (~200 frente a 1000 frente a 20 000 USD).
 - **Periodo** : El más corto en Estados Unidos (~3 meses) y el más largo en la Unión Europea (~12 meses).
 - **Tecnología** : Japón y la UE tienen requisitos más elevados (pureza > 99,99 % frente a 99,5 %).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, las exportaciones de WB₂ a la UE requerirán una certificación REACH adicional, cuyos costos aumentarán aproximadamente un 15 % (aproximadamente 50 USD/kg).
- **desafío** :
 - Los estándares inconsistentes aumentan las barreras a la exportación (arancel de ~5%).
 - El reconocimiento mutuo entre las agencias de pruebas regionales es bajo (<50%).

Tabla 15.5 Diferencias regionales en la estandarización del boruro de tungsteno

área	estándar	Costo (USD)	Ciclo (meses)	desafío	Capítulos relacionados
Porcelana	GB/T 26037	200	3	Reconocimiento mutuo	5.5
unión Europea	EN ISO	20.000	12	costo	16.3
EE.UU	ASTM	1000	3	barrera	7.4

Desafíos y desarrollo futuro del cumplimiento normativo del boruro de tungsteno

El cumplimiento normativo del boruro de tungsteno enfrenta desafíos técnicos, de costos y políticas y necesita adaptarse a las tendencias futuras.

- **desafío** :
 - **Costo** : El costo de cumplimiento es de ~100 USD/tonelada, lo que supone una carga pesada para los fabricantes pequeños y medianos (ganancia de ~10%).
 - **Tecnología** : Nano WB₂ (<50 nm, Capítulo 5.5) requiere una nueva evaluación de seguridad y una tarifa de prueba de ~50 000 USD.
 - **Política** : CBAM (2026, Capítulo 14, 14.6) Aumentar el impuesto al carbono, afectando las exportaciones en ~5%.
- **Desarrollo futuro (2025-2030)** :
 - **Estándares unificados** : ISO y GB/T están coordinados para reducir los costos de certificación en aproximadamente un 20 % (aproximadamente USD 800/lotte).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Cumplimiento verde** : las emisiones de carbono se reducen a ~0,2 toneladas de CO₂/tonelada (Capítulo 16.3), y la tasa de cumplimiento es >95%.
- **Autenticación digital** : la trazabilidad de blockchain (Capítulo 17, 17.5) acorta el ciclo en un ~30% (~2 meses).
- **Biomedicina** : Se mejoran las regulaciones nanométricas y el ciclo de certificación se reduce a ~6 meses.
- **Ejemplos** :
 - Para 2024, los fabricantes chinos optimizarán los procesos de cumplimiento a través de IA (Capítulo 17, 17.5), reduciendo los costos en ~10% (~90 USD/tonelada).
- **Estrategia** :
 - Invertir en tecnología verde (tasa de recuperación > 95%).
 - Cooperar con agencias de terceros para reducir las tarifas de certificación en aproximadamente un 15%.

Tabla 15.6 Desafíos y tendencias del cumplimiento normativo del boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	desafío	Estrategia	Capítulos relacionados
Costo de cumplimiento (USD/ tonelada)	100	80	Alto costo	Tecnología verde	16.3
Periodo de certificación (meses)	3–12	2–6	Ciclo largo	Digitalización	17.5
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	Impuesto al carbono	Reciclar	14.6

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 16 Protección ambiental y desarrollo sostenible del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) en electrónica (Capítulo 9), catálisis (Capítulo 10), biomedicina (Capítulo 11), energía (Capítulo 12) y maquinaria (Capítulo 13) ha impulsado la demanda de materiales de alto rendimiento, pero su proceso de producción implica un alto consumo de energía (~500 kWh/tonelada, Capítulos 14, 14.2) y subproductos (como HF, Capítulos 15, 15.2), lo que supone un desafío para el medio ambiente. En 2024, la huella de carbono de la producción de boruro de tungsteno es de aproximadamente 0,3 toneladas de CO₂/tonelada, y las tecnologías de fabricación y reciclaje ecológicos pueden reducir las emisiones en un ~30%. En este capítulo se analiza el impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno, la tecnología de fabricación ecológica, el tratamiento y reciclaje de residuos, la contribución a la energía sostenible, la huella de carbono y las estrategias de reducción de emisiones, así como los impulsores de políticas y del mercado, para brindar apoyo ambiental para su industrialización (Capítulo 14, 14.3) y el cumplimiento normativo (Capítulo 15).

16.1 Evaluación del impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno

El impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno proviene principalmente del consumo de energía, gases residuales y aguas residuales, que deben cuantificarse mediante una evaluación del ciclo de vida (ACV).

- **Fuente de influencia :**

- **Consumo de energía :** la CVD (Capítulo 5.2) consume ~500 kWh/tonelada, la sinterización por prensado en caliente (Capítulo 5.1) consume ~600 kWh/tonelada.
- **Gas residual :** la CVD produce HF (<1 ppm, Capítulo 15.2), emisiones de gases de efecto invernadero ~0,3 toneladas de CO₂/tonelada.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aguas residuales** : El método sol-gel (Capítulo 5.5) produce aguas residuales con iones de tungsteno (<1 mg/L), que deben neutralizarse.
- **Residuos sólidos** : Los residuos de sinterización (~50 kg/tonelada) contienen tungsteno y deben reciclarse.
- **Resultados del ACV (2024)** :
 - Por tonelada de WB₂ producida: emisiones de carbono ~ 0,3 toneladas de CO₂ , consumo de agua ~1 m³, residuos sólidos ~50 kg.
 - Impacto ambiental: la energía representa ~60%, los gases residuales ~30% y las aguas residuales ~10%.
- **Metodología de evaluación** :
 - **ISO 14040 (LCA)** : Cuantificar el impacto ambiental desde las materias primas hasta los productos.
 - **XPS (Capítulo 6.1)** : Analizar el contenido de HF en los gases de escape (<1 ppm).
 - **ICP-MS (Capítulo 6.1)** : Detección de iones de tungsteno en aguas residuales (<1 mg/L).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, el LCA de las fábricas de WB₂ de China mostró que el consumo de energía representó ~65% de las emisiones de carbono, que podrían reducirse en ~15% después de la optimización (~0,26 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío** :
 - La recopilación de datos de LCA es compleja y cuesta aproximadamente USD 10 000 por evaluación.
 - de nano-WB₂ (<50 nm).

Tabla 16.1 Impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno

fuelle	parámetro	Proporción (%)	método	desafío	Capítulos relacionados
Consumo de energía	500–600 kWh/tonelada	60	ISO 14040	costo	5.1, 5.2
Escape	HF<1 ppm	30	XPS	estándar	15.2, 6.1
Aguas residuales	Tungsteno <1 mg/L	10	ICP-MS	complejo	5.5

16.2 Tecnología de fabricación ecológica de boruro de tungsteno

La tecnología de fabricación ecológica reduce el impacto ambiental de la producción de boruro de tungsteno al optimizar los procesos y el uso de energía.

- **Tipo de tecnología** :
 - **Proceso de bajo consumo energético** :
 - **Método sol-gel (Capítulo 5.5)** : Calcinación a 500°C, consumo de energía ~300 kWh/tonelada, una disminución de ~40% (en comparación con la sinterización).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **CVD asistido por microondas** : deposición a 400 °C, eficiencia aumentada en ~20 %, consumo de energía ~400 kWh/tonelada.
- **Recuperación de gases residuales** :
 - **Neutralización de HF** : Absorción de Ca(OH)₂ (tasa de recuperación > 95%, Capítulo 15, 15.2), costo ~50 USD/tonelada.
 - **de CO₂ : absorción basada en amina** , tasa de captura ~80%, costo ~100 USD/tonelada.
- **Energía renovable** :
 - Suministro de energía solar (~50% de la electricidad de la fábrica), emisiones de carbono reducidas en ~25% (~0,23 toneladas de CO₂/tonelada).
 - Integración de energía eólica, costo ~0,05 USD/kWh.
- **Caso de optimización** :
 - En 2024, CTIA GROUP LTD adoptará la CVD por microondas (Capítulo 17.5), con un consumo de energía reducido en ~15% (~425 kWh/tonelada) y emisiones de HF <0,5 ppm.
- **Ventajas** :
 - Las emisiones de carbono disminuyeron en un ~30% (~0,2 toneladas de CO₂/tonelada).
 - Los costos de producción disminuyeron en un ~10% (~90 USD/kg, nanopartículas).
- **desafío** :
 - La inversión en equipos ecológicos es alta (unos 10 millones de dólares por planta).
 - La energía renovable tiene baja estabilidad (fluctuación de aproximadamente el 20%).

Tabla 16.2 Tecnología de fabricación ecológica de boruro de tungsteno

tecnología	parámetro	Reducción (%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
CVD de microondas	400 kWh/tonelada	15	50/tonelada	invertir	5.2, 17.5
Recuperación de la IC	>95%	30	50/tonelada	estabilidad	15.2
Solar	Las emisiones de carbono se redujeron en un 25%	25	0,05/kWh	fluctuación	16.5

16.3 Tratamiento y reciclaje de residuos de boruro de tungsteno

El tratamiento de residuos y el reciclaje del boruro de tungsteno son eslabones claves del desarrollo sostenible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Tipo de residuo :**
 - **Gas residual :** HF (<1 ppm, subproducto de CVD), necesita ser neutralizado.
 - **Aguas residuales :** iones de tungsteno (<1 mg/L), que requieren tratamiento de precipitación.
 - **Residuos sólidos :** residuos de sinterización (~50 kg/tonelada), que contienen ~80% de tungsteno.
- **Tecnología de procesamiento :**
 - **Neutralización de HF :** Ca(OH)₂ genera CaF₂, con una tasa de recuperación de >95% y un costo de ~50 USD/tonelada.
 - **Tratamiento de aguas residuales :** Precipitación química (NaOH), tasa de recuperación de tungsteno ~90%, costo ~20 USD/m³.
 - **Reciclaje de residuos sólidos :** lixiviación ácida (HCl, 1 M) para extraer tungsteno, tasa de recuperación ~85%, costo ~100 USD/tonelada.
- **Reciclaje :**
 - El reciclaje de tungsteno para la resíntesis de WB₂ (Capítulo 5.5) reduce los costos en aproximadamente un 20 % (aproximadamente 80 USD/kg).
 - CaF₂ como material de construcción, valor añadido ~10 USD/tonelada.
- **Ejemplos :**
 - En 2024, las fábricas chinas reciclarán residuos de sinterización, con una tasa de recuperación de tungsteno de ~88% y una reducción de costos de ~15% (~85 USD/kg).
- **desafío :**
 - Las tasas de recuperación de residuos de nanopartículas son bajas (<50%).
 - Altos costos de mantenimiento de los equipos de procesamiento (~200.000 USD/año).

Tabla 16.3 Tratamiento y reciclaje de residuos de boruro de tungsteno

desperdiciar	Tecnología de procesamiento	Tasa de recuperación (%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
alta frecuencia	Ca(OH) ₂	>95	50/tonelada	equipo	15.2
Aguas residuales	Precipitación química	90	20/m ³	nanómetro	5.5
Residuos sólidos	Lixiviación ácida	85	100/tonelada	costo	5.1

16.4 Contribución del boruro de tungsteno a la energía sostenible

La aplicación del boruro de tungsteno en el campo de la energía sostenible (Capítulo 12) apoya el objetivo de la neutralidad de carbono.

- **Escenarios de aplicación :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Baterías (Capítulo 12.1)** : aditivo de electrodo negativo WB₂, ciclo de vida ~1000 veces, densidad de energía ~250 Wh /kg, lo que reduce la dependencia de combustibles fósiles ~20%.
- **Pila de combustible (Capítulo 12.2)** : Catalizador WB₂ , sobrepotencial ORR ~200 mV, eficiencia ~60%, utilización de energía de hidrógeno aumentada ~15%.
- **Almacenamiento de hidrógeno (Capítulo 12.4)** : WB₂ cataliza NaBH₄ para producir hidrógeno a una velocidad de ~ 1000 mL / (g · min) , lo que respalda la economía del hidrógeno.
- **Energía solar (Capítulo 12.3)** : electrodo WB₂, eficiencia ~18%, participación de energía renovable aumentada ~10%.
- **Beneficios ambientales :**
 - Cada tonelada de catalizador WB₂ utilizada en pilas de combustible reduce las emisiones en aproximadamente 0,5 toneladas de CO₂ al año.
 - Los materiales de batería WB₂ reducen el consumo de energía de carga en un ~15% (~0,1 kWh/kg).
- **Ejemplos :**
 - Para 2024, los catalizadores de celdas de combustible WB₂ (Capítulo 12.2) reducirán las emisiones en ~0,6 toneladas de CO₂/tonelada de catalizador en los proyectos de energía de hidrógeno de China.
- **desafío :**
 - Los beneficios se compensan parcialmente con las emisiones de carbono de la producción de WB₂ (~0,3 toneladas de CO₂/ tonelada).
 - El costo (~200 USD/kg) limita la promoción a gran escala.

Tabla 16.4 Contribución del boruro de tungsteno a la energía sostenible

solicitud	parámetro	Reducción de emisiones (toneladas de CO ₂ /año)	de desafío	Capítulos relacionados
Batería	250 Wh /kg	0.2	costo	12.1
Pilas de combustible	Eficiencia 60%	0.5	emisiones de carbono	12.2
Almacenamiento de hidrógeno	1000 mL / (g · min)	0.3	Promoción	12.4

16.5 Huella de carbono y estrategias de reducción de emisiones de boruro de tungsteno

La huella de carbono de la producción de boruro de tungsteno debe reducirse mediante estrategias técnicas y de gestión.

- **Huella de carbono (2024) :**
 - Por tonelada de WB₂ : ~0,3 toneladas de CO₂ (energía ~60%, materias primas ~30%, transporte ~10%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Nanopartículas (Capítulo 5.5): ~0,35 toneladas de CO₂/ tonelada (alto consumo energético).
- Películas delgadas (Capítulo 5.2): ~0,4 toneladas de CO₂/ tonelada (equipo de CVD).
- **Estrategias de reducción de emisiones :**
 - **Optimización energética :** Energía renovable (solar, ~50%), reducción de ~25% (~0,23 toneladas de CO₂/tonelada).
 - **Mejora del proceso :** la CVD por microondas (Capítulo 5.2) reduce el consumo de energía en un ~20% (~400 kWh/tonelada).
 - **Sustitución de materias primas :** el reciclaje de tungsteno (Capítulo 16.3) reduce las emisiones de carbono de las materias primas en aproximadamente un 30%.
 - **Transporte :** Cadenas de suministro locales (<500 km), reducción de ~10% (~0,03 tCO₂ /tonelada).
- **Ejemplos :**
 - En 2024, la fábrica japonesa funcionó con energía solar y la huella de carbono de WB₂ se redujo en un ~20% (~0,24 toneladas de CO₂/tonelada).
- **desafío :**
 - Las tecnologías de reducción de emisiones son altas (aproximadamente \$5 millones por planta).
 - La contabilidad del carbono en las cadenas de suministro globales no es uniforme (error ~20%).

Tabla 16.5 Huella de carbono y reducción de emisiones de boruro de tungsteno

proyecto	Huella de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	de Reducción de emisiones (%)	Estrategia	desafío	Capítulos relacionados
Nanopartículas	0.35	20	Solar	invertir	5.5, 16.3
película	0.4	25	CVD de microondas	Contabilidad	5.2
en general	0.3	30	Reciclar	unificado	16.4

16.6 Factores de política y mercado para el desarrollo sostenible del boruro de tungsteno

Las políticas y los mercados son las principales fuerzas impulsoras del desarrollo sostenible del boruro de tungsteno.

- **Factores impulsores de la política :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **China** : La neutralidad de carbono (2060) subsidia la fabricación ecológica (~5.000 USD/tonelada), lo que requiere emisiones de carbono < 0,3 toneladas de CO₂/tonelada (Capítulo 15, 15.2).
- **UE** : CBAM (2026, Capítulo XIV, 14.6) impone un impuesto al carbono (~50 USD/tonelada) para impulsar tasas de reciclaje > 95%.
- **Estados Unidos** : La Ley de Reducción de la Inflación (2022) apoya materiales sustentables, inversión de ~\$100 millones.
- **Factores impulsores del mercado** :
 - **Demanda** : El mercado de materiales verdes crecerá aproximadamente un 12 % al año y, para 2030, los productos de boruro de tungsteno verde representarán aproximadamente el 50 % (Capítulo 14, 14.6).
 - **Precio** : Prima verde WB₂ ~10% (~220 USD/kg, nanopartículas).
 - **Certificación** : La certificación ISO 14001 mejora la competitividad del mercado, costo ~10.000 USD.
- **Tendencias futuras (2025-2030)** :
 - Huella de carbono reducida a ~0,2t CO₂/tonelada, con tasa de cumplimiento >95%.
 - Tasa de reciclaje >90%, reducción de costos ~20% (~80 USD/kg).
 - La certificación verde (Blockchain, Capítulo 17, 17.5) acorta el ciclo en ~30% (~2 meses).
- **Ejemplos** :
 - En 2024, la fábrica EU WB₂ aprobó la certificación ISO 14001 y su participación de mercado aumentó en aproximadamente un 10%.
- **desafío** :
 - El cumplimiento de la política es alto (~100 USD/tonelada).
 - Los fabricantes pequeños y medianos tardan en transformar las tecnologías verdes (aproximadamente 5 años).

Cuadro 16.6 Factores impulsores del desarrollo sostenible y tendencias del boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual en 2024	Objetivos 2030	conducir	desafío	Capítulos relacionados
Huella de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	política	costo	15.2, 14.6
Tasa de recuperación (%)	85	>90	mercado	Conversión	16.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Periodo de certificación (meses)	de	6	2	tecnología	Fabricantes pequeños y medianos	17.5
----------------------------------	----	---	---	------------	---------------------------------	------



Capítulo 17 Aplicación de tecnología inteligente y digital del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB_2 , W_2B) se usa ampliamente en electrónica (Capítulo 9), catálisis (Capítulo 10), biomedicina (Capítulo 11), energía (Capítulo 12) y maquinaria (Capítulo 13) debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas (dureza ~ 40 GPa, Capítulo 2 2,5; conductividad $\sim 10^4$ S/cm, Capítulo 6 6,5; estabilidad química, Capítulo 7 7,5). Las tecnologías inteligentes y digitales (como IA, IoT, blockchain) pueden mejorar la eficiencia de la industria del boruro de tungsteno en un $\sim 20\%$ y reducir los costos en un $\sim 15\%$ (~ 85 USD/kg, 2024) optimizando la producción (Capítulo 5), el control de calidad (Capítulo 6) y la cadena de suministro (Capítulo 14 14,3). En este capítulo se analizan la optimización de la IA, las aplicaciones de sensores inteligentes, el control de calidad digital, el potencial de trazabilidad de la cadena de bloques, los casos de fabricación inteligente y las tendencias futuras en la producción de boruro de tungsteno, y se proporciona apoyo técnico para su industrialización (Capítulo 14 14.3) y el desarrollo ecológico (Capítulo 16 16.6).

17.1 Optimización de la inteligencia artificial en la producción de boruro de tungsteno

La inteligencia artificial (IA) mejora la eficiencia de la producción de boruro de tungsteno al optimizar los parámetros del proceso y predecir el rendimiento.

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Optimización de CVD (Capítulo 5.2) :** la IA ajustó el caudal de WF_6/B_2H_6 (error $< 1\%$), la tasa de deposición aumentó en $\sim 15\%$ ($\sim 1,4 \mu\text{m}/\text{h}$) y la uniformidad fue $> 95\%$.
 - **Sol-Gel (Capítulo 5.5) :** El aprendizaje automático predice el tamaño de partícula (< 50 nm) y el rendimiento aumenta en un $\sim 20\%$ (~ 550 kg/lote).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Sinterización (Capítulo 5.1)** : Temperatura optimizada por red neuronal (2000 °C ± 10 °C) y presión (30 MPa), densidad aumentada en ~0,5 % (>99 %).
- **Tecnología de IA :**
 - **Aprendizaje supervisado : predecir** la pureza de WB₂ (>99,9 %) basándose en datos históricos (Capítulo 6.1).
 - **Aprendizaje por refuerzo** : el ajuste en tiempo real del flujo de gas CVD reduce las emisiones de HF en aproximadamente un 10 % (<0,9 ppm, Capítulo 16.3).
 - **Gemelo digital** : simula la producción y reduce los costos experimentales en un ~30% (~5000 USD/vez).
- **Ejemplos :**
 - En 2024, la IA optimizará el proceso de CVD (Capítulo 12.5), reduciendo el consumo de energía en un ~15% (~425 kWh/tonelada).
- **desafío :**
 - El entrenamiento del modelo de IA requiere grandes volúmenes de datos (>10⁴ muestras) y cuesta aproximadamente 100 000 USD.
 - La computación en tiempo real requiere GPU de alto rendimiento (~50 000 USD/GPU).

Tabla 17.1 Parámetros de optimización de IA para la producción de boruro de tungsteno

Tecnología	Tecnología de IA	de promover(%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
ECV	Aprendizaje por refuerzo	15	100.000	datos	5.2, 16.3
Sol-Gel	Aprendizaje supervisado	20	50.000	calcular	5.5
sinterización	Gemelo digital	0.5	5000	hardware	5.1

17.2 Aplicación del boruro de tungsteno en sensores inteligentes

El boruro de tungsteno es adecuado para sensores inteligentes debido a su alta conductividad y estabilidad, siendo compatible con IoT e Industria 4.0.

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Sensor de presión (Capítulo 9.2)** : película WB₂ (espesor ~100 nm, Capítulo 5.2), sensibilidad ~10 mV/MPa, tiempo de respuesta <1 ms .
 - **Sensores de gas (Capítulo 10.3)** : nanopartículas de WB₂ (<50 nm), detección de H₂ (< 100 ppm), selectividad >90%.
 - **Biosensor (Capítulo 11.3)** : electrodo WB₂ (superficie ~60 m²/g), detección de glucosa (<1 mM), linealidad >95%.
- **Requisitos técnicos :**
 - **Conductividad** : >10⁴ S/cm (Capítulo 6.5).
 - **Estabilidad** : >5000 horas (Capítulo 7.5).
 - **Sensibilidad** : >5 mV/unidad (Capítulo 9.2).
- **Funciones inteligentes :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Recopilación de datos** : sensores integrados en IoT, velocidad de transmisión ~1 Mbps.
- **Análisis de IA** : la computación de borde procesa señales con una tasa de falsas alarmas de <1%.
- **Autocalibración** : la IA ajusta la línea de base, mejorando la precisión en aproximadamente un 10 % .
- **Ejemplos** :
 - En 2024, los sensores de gas WB₂ se utilizarán para la monitorización de la energía del hidrógeno (Capítulo 12.4), y la eficiencia de detección aumentará en aproximadamente un 15%.
- **desafío** :
 - La aglomeración de nanopartículas (Capítulo 5.3) reduce la sensibilidad y requiere modificación de la superficie (PVP, <0,1 % en peso).
 - El costo de miniaturizar el sensor es alto (~500 USD/unidad).

Tabla 17.2 Aplicación del sensor inteligente de boruro de tungsteno

tipo	parámetro	Mejora del rendimiento (%)	desafío	Capítulos relacionados
presión	10 mV/MPa	10	Reunión	9.2, 5.2
gas	H ₂ <100 ppm	15	costo	10.3, 12.4
biología	Glucosa <1 mM	10	Miniaturización	11.3

17.3 Tecnología de control de calidad digital del boruro de tungsteno

La tecnología digital mejora el control de calidad del boruro de tungsteno a través del monitoreo en tiempo real y el análisis de datos.

- **Tipo de tecnología** :
 - **Monitoreo en línea** : detección en tiempo real mediante XPS (Capítulo 6.1) de la pureza de WB₂ (>99,9%) con un error de <0,1%.
 - **Análisis de imágenes** : la IA procesa imágenes SEM (Capítulo 6.2) e identifica granos (<20 nm) con una tasa de precisión de >95%.
 - **Registros de blockchain** : los datos de calidad están en cadena, son a prueba de manipulaciones y la eficiencia de las consultas es de aproximadamente 1 s.
- **Escenarios de aplicación** :
 - **CVD (Capítulo 5.2)** : Monitorizar el espesor de la película (~2 μm) , uniformidad >95%.
 - **Sinterización (Capítulo 5.1)** : Verificar densidad (>99%) y porosidad <1%.
 - **Nanopartículas (Capítulo 5.5)** : Distribución controlada del tamaño de partícula (<10 nm), consistencia >90%.
- **Ventajas** :
 - La eficiencia de detección aumentó en ~30% (~100 muestras/hora).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La tasa de fallos se redujo en un ~50% (<0,5%).
- **Ejemplos :**
 - En 2024, las fábricas chinas utilizarán el análisis de imágenes con IA (Capítulo 6.2), lo que reducirá los costos de inspección de calidad en un ~20% (~400 USD/lote).
- **desafío :**
 - Alta inversión en equipo (XPS ~ 500.000 USD).
 - La seguridad de los datos requiere encriptación (costo ~10.000 USD/año).

Tabla 17.3 Control de calidad digital del boruro de tungsteno

tecnología	parámetro	promover(%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
XPS	Pureza>99,9%	30	500.000	invertir	6.1, 5.2
Análisis de imágenes	Grano <20 nm	20	10.000	Seguridad	6.2, 5.5
Cadena de bloques	Consulta ~1 s	50	5000	cifrado	14.3

17.4 Potencial del boruro de tungsteno en la trazabilidad de la cadena de bloques

La tecnología Blockchain proporciona transparencia y trazabilidad a la cadena de suministro de boruro de tungsteno.

- **Escenarios de aplicación :**
 - **Trazabilidad de la materia prima :** registrar la fuente de polvo de tungsteno y ácido bórico (Capítulo 14, 14.2), transparencia>99%.
 - **Registros de producción :** Los parámetros del proceso CVD (Capítulo 5.2) se cargan en la cadena, con una tasa de verificación de >95%.
 - **Certificación de producto :** Los datos de calidad de WB₂ (Capítulo 6, 6.1) se almacenan de acuerdo con GB/T 26037-2020 (Capítulo 15, 15.1).
- **Características técnicas :**
 - **Descentralización :** almacenamiento de múltiples nodos, costo de manipulación > 10⁶ USD.
 - **Contratos inteligentes :** verifican automáticamente la pureza (>99,9 %), la eficiencia aumenta en un ~30 %.
 - **Cifrado :** algoritmo SHA-256, tasa de fuga de datos <0,01%.
- **Ventajas :**
 - Ciclo de certificación reducido en ~30% (~2 meses, Capítulo 15, 15.6).
 - La confianza del cliente aumentó aproximadamente un 20%.
- **Ejemplos :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- En 2024, el recubrimiento WB₂ de la UE (Capítulo 13.1) utilizará blockchain para la trazabilidad, reduciendo los costos de certificación en ~15% (~17 000 USD).
- **desafío :**
 - La implementación de blockchain es costosa (aproximadamente 100 000 USD por sistema).
 - La velocidad de carga de datos es lenta (~10 tx /s).

Tabla 17.4 Aplicación de la trazabilidad de la cadena de bloques de boruro de tungsteno

Guión	parámetro	promover(%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
Trazabilidad de la materia prima	Transparencia>99%	20	100.000	desplegar	14.2
Registros de producción	Tasa de verificación >95%	30	50.000	velocidad	5.2, 15.1
Proceso de dar un título	Periodo ~ 2 meses	15	17.000	costo	13.1

17.5 Estudio de caso de fabricación inteligente de boruro de tungsteno

La fabricación inteligente combina IA, IoT y tecnologías digitales para mejorar la eficiencia de producción y la calidad del boruro de tungsteno.

- **Descripción del caso :**
 - **Fábricas:** Las fábricas chinas producirán nanopartículas de WB₂ en 2024 (Capítulo 5.5).
 - **tecnología :**
 - **Optimización de IA :** el aprendizaje automático controla el tamaño de las partículas (<50 nm), lo que aumenta el rendimiento en un ~20 % (~550 kg/lote).
 - **Monitoreo IoT :** El sensor recopila la temperatura en tiempo real (500°C ± 5°C), con una velocidad de carga de datos de ~1 Mbps.
 - **Trazabilidad blockchain :** los datos de calidad se cargan en la cadena, de conformidad con REACH (Capítulo 15, 15.2).
 - **Resultados :**
 - Reducción de costos ~15% (~85 USD/kg).
 - Las emisiones de carbono disminuyeron aproximadamente un 10% (aproximadamente 0,27 toneladas de CO₂/tonelada, Capítulo 16.5).
 - La tasa de fallos de calidad es <0,5%.
- **Contribución técnica :**
 - **IA :** representa aproximadamente el 50% de la mejora de la eficiencia.
 - **IoT :** representa aproximadamente el 30% de la recopilación de datos.
 - **Blockchain :** ~20% de confianza.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aclaración del caso :**
 - CTIA GROUP LTD ha aumentado su eficiencia de producción en un ~25%, estableciendo un punto de referencia para la industria.
- **desafío :**
 - La integración de tecnología requiere una alta inversión (unos 20 millones de dólares).
 - La capacitación de las habilidades de los trabajadores cuesta aproximadamente USD 50.000 al año.

Tabla 17.5 Casos de fabricación inteligente de boruro de tungsteno

tecnología	parámetro	promover(%)	Costo (USD)	desafío	Capítulos relacionados
AI	Rendimiento ~550 kg/lote	20	100.000	invertir	5.5, 16.5
Internet de las cosas	Datos ~1 Mbps	30	50.000	Capacitación	15.2
Cadena de bloques	Tasa no calificada <0,5%	20	100.000	Integración	15.1

17.6 Tendencias futuras de la inteligenteización y digitalización del boruro de tungsteno

La inteligencia y la digitalización del boruro de tungsteno promoverán la modernización industrial y el desarrollo sostenible.

- **Tendencias futuras (2025-2030) :**
 - **Popularización de la IA :** el 90% de las fábricas utilizan la optimización de IA, la eficiencia aumenta en un ~30% y el costo se reduce en un ~20% (~80 USD/kg).
 - **Sensor 6G :** el sensor WB₂ (Capítulo 9.6) tiene una velocidad de transmisión de ~10 Gbps y se utiliza en redes 6G.
 - **Estandarización de blockchain :** cobertura de trazabilidad de la cadena de suministro global >95%, ciclo de certificación ~1 mes.
 - **Fabricación inteligente y ecológica :** las emisiones de carbono se reducen a ~0,2 toneladas de CO₂/tonelada (Capítulo 16.6) y la tasa de reciclaje es >90%.
- **Conductores :**
 - **Política :** Plan Industria 4.0 de China (Capítulo 15.2) Subsidio ~\$10 millones/fábrica.
 - **Mercado :** La demanda de materiales inteligentes crece aproximadamente un 15 % al año (Capítulo 14, 14.6).
 - **Tecnología :** la potencia informática de la IA aumentó aproximadamente un 50 % al año y los costos disminuyeron aproximadamente un 30 %.
- **Predicción de caso :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Para 2030, los sensores inteligentes WB₂ (Capítulo 12.2) representarán ~20% del mercado de energía del hidrógeno y aumentarán la eficiencia en ~25%.
- **desafío :**
 - La estandarización de la tecnología está rezagada (unos 5 años).
 - Riesgo de ciberseguridad (costo del ataque < \$10 000).

Tabla 17.6 Tendencias de inteligenteización y digitalización del boruro de tungsteno

proyecto	Estado actual 2024	Objetivos en 2030	conducir	desafío	Capítulos relacionados
Mejora de la eficiencia (%)	20	30	política	normalización	14.3, 15.2
Costo (USD/kg)	85	80	mercado	Seguridad	14.2, 16.6
Emisiones de carbono (toneladas de CO ₂ /tonelada)	0.3	0.2	tecnología	riesgo	16.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 18 Futuras direcciones de investigación y perspectivas tecnológicas del boruro de tungsteno

El boruro de tungsteno (como WB, WB₂, W₂B) tiene un gran potencial en electrónica (Capítulo 9), catálisis (Capítulo 10), biomedicina (Capítulo 11), energía (Capítulo 12), maquinaria (Capítulo 13) y otros campos debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas (dureza ~40 GPa, Capítulo 2 2,5; conductividad ~10⁴S/cm, Capítulo 6 6,5; estabilidad térmica >2000 °C, Capítulo 8 8,1). Las investigaciones futuras se centrarán en nueva síntesis (Capítulo 5), aplicaciones de próxima generación (Capítulos 9 a 13), inteligencia (Capítulo 17) y fabricación ecológica (Capítulo 16). Se prevé que el tamaño del mercado alcance los 350 millones de dólares estadounidenses en 2030 (Capítulo 14.6) y que las emisiones de carbono se reduzcan a aproximadamente 0,2 toneladas de CO₂/tonelada (Capítulo 16.6). Este capítulo analiza los nuevos métodos de síntesis del boruro de tungsteno, el potencial de los dispositivos electrónicos de nueva generación, los avances en catálisis y energía, las innovaciones biomédicas, las fronteras de la fabricación inteligente y ecológica, así como la cooperación global y los desafíos tecnológicos, y proporciona orientación para su industrialización (Capítulos 14, 14.3) y el desarrollo sostenible (Capítulo 16).

18.1 Exploración de un nuevo método de síntesis para boruro de tungsteno

Los nuevos métodos sintéticos apuntan a reducir costos (<80 USD/kg), aumentar la pureza (>99,99%) y lograr un control a nanoescala (<10 nm).

- **Dirección de investigación :**
 - **Síntesis asistida por láser :** deposición en fase de vapor de WB₂ mediante láser de femtosegundos (<100 fs) a una velocidad de ~2 μm/h y una pureza de >99,99 % (Capítulo 5.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Síntesis electroquímica** : electrólisis de borato de sodio y tungstato de sodio (<0,1 M) para producir nanopartículas de WB₂ (<10 nm) con un consumo de energía de ~200 kWh/tonelada.
- **Método de bioplantilla** : crecimiento de cristales de WB₂ guiados por proteínas (tamaño de partícula <5 nm), verdes y sin subproductos (Capítulo 16, 16.2).
- **Proyección de plasma** : el plasma W+B (>10 000 °C) produce películas delgadas de WB₂ (espesor ~50 nm) con una uniformidad >98 %.
- **Resultados esperados** :
 - Reducción de costos ~30% (~70 USD/kg, nanopartículas).
 - Consumo de energía reducido en ~40% (~300 kWh/tonelada).
 - Las emisiones de carbono disminuyeron aproximadamente un 20% (aproximadamente 0,24 toneladas de CO₂/tonelada, Capítulo 16.5).
- **Predicción de caso** :
 - Para 2026, el costo de las películas delgadas de WB₂ sintetizadas por láser (Capítulo 9.1) disminuirá aproximadamente un 20 % (aproximadamente 240 USD/kg).
- **desafío** :
 - Alto costo del equipo (láser ~\$10 millones).
 - La estabilidad del control a escala nanométrica es baja (error ~10%).

Tabla 18.1 Nuevo método de síntesis de boruro de tungsteno

método	parámetro	Reducción de costos (%)	desafío	Capítulos relacionados
Síntesis láser	Pureza>99,99%	20	Costo del equipo	5.2, 9.1
Electroquímica	Tamaño de partícula <10 nm	30	estabilidad	5.5, 16.2
Plantilla biológica	Sin subproductos	40	Escala	16.2

18.2 Potencial del boruro de tungsteno en dispositivos electrónicos de próxima generación

El boruro de tungsteno tiene un potencial innovador en 6G, la computación cuántica y la electrónica flexible.

- **Dirección de investigación** :
 - **Antena 6G (Capítulo 9, 9.6)** : película WB₂ (espesor ~50 nm, Capítulo 5, 5.2), conductividad ~10⁵ S/cm, velocidad de transmisión ~10 Gbps.
 - **Computación cuántica** : electrodo superconductor WB₂ (T_c~10 K, Capítulo 3, 3.4), vida útil del bit cuántico >100 μs.
 - **Electrónica flexible** : nanocables WB₂ (diámetro <20 nm) con tensión de flexión <5 % para dispositivos portátiles (Capítulo 9.4).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Computación neuromórfica** : memristores WB₂ (relación encendido/apagado ~10³) con consumo de energía <1 pJ /operación.
- **Resultados esperados** :
 - La eficiencia del dispositivo aumentó en ~30% (ancho de banda de antena 6G ~100 GHz).
 - Los costos de fabricación se redujeron en un ~25% (~200 USD/kg, película).
 - Cuota de mercado ~10% (2030, Capítulo 14, 14.4).
- **Predicción de caso** :
 - En 2028, los sensores flexibles WB₂ (Capítulo 9.2) se utilizarán en piel inteligente y el mercado alcanzará unos 20 millones de dólares estadounidenses.
- **desafío** :
 - Es necesario aumentar la temperatura superconductor (>20 K).
 - Mala compatibilidad con sustratos flexibles (desajuste de expansión térmica ~10⁻⁶ K⁻¹, Capítulo 8, 8.3).

Tabla 18.2 Potencial del boruro de tungsteno en dispositivos electrónicos de próxima generación

solicitud	parámetro	promover(%)	desafío	Capítulos relacionados
Antena 6G	10 Gbps	30	Tc	9.6, 3.4
Computación cuántica	Vida útil > 100 μs	20	compatibilidad	9.1
Electrónica flexible	Tensión <5%	25	Desajuste	9.4, 8.3

18.3 Direcciones innovadoras de la catálisis del boruro de tungsteno y la tecnología energética

El boruro de tungsteno promoverá el desarrollo de la energía del hidrógeno y de baterías de estado sólido en los campos de la catálisis y la energía.

- **Dirección de investigación** :
 - **Electrocatalisis (Capítulo 10.1)** : nanopartículas WB₂ (<10 nm), sobrepotencial HER <50 mV, estabilidad >10.000 horas.
 - **Fotocatalisis (Capítulo 10.2)** : compuesto de WB₂/ TiO₂ (área de superficie específica ~80 m²/g), eficiencia de producción de hidrógeno ~500 μmol / (g · h) .
 - **Batería de estado sólido (Capítulo 12.1)** : electrolito sólido WB₂ (conductividad iónica ~10⁻³ S/cm), vida útil >2000 veces.
 - **Catalisis térmica (Capítulo 10.5)** : WB₂ cataliza la conversión de CO₂ (tasa de conversión > 90%) a una temperatura < 400 °C.
- **Resultados esperados** :
 - La eficiencia catalítica aumentó en ~40% (densidad de corriente HER ~100 mA/cm²).
 - La densidad de energía de la batería alcanza ~400 Wh /kg.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Las emisiones de carbono disminuyeron en ~ 0,5 toneladas de CO₂/tonelada de catalizador (Capítulo 16.4).
- **Predicción de caso :**
 - En 2027, los electrocatalizadores WB₂ (Capítulo 10.1) para hidrógeno verde alcanzarán un valor de mercado de ~\$30 millones.
- **desafío :**
 - La aglomeración de nanopartículas (Capítulo 5.3) reduce la actividad.
 - La resistencia de la interfaz del electrolito sólido es alta (~100 Ω·cm²).

Tabla 18.3 Avances en la catálisis del boruro de tungsteno y la tecnología energética

solicitud	parámetro	promover(%)	desafío	Capítulos relacionados
Electrocatalisis	Sobrepotencial <50 mV	40	Reunión	10.1, 5.3
Fotocatalisis	500 μmol / (g · h)	30	costo	10.2
Batería de estado sólido	400 Wh /kg	25	resistencia	12.1

18.4 Aplicaciones innovadoras del boruro de tungsteno en el campo biomédico

El boruro de tungsteno tiene potencial innovador en los campos de la medicina de precisión y los implantes inteligentes.

- **Dirección de investigación :**
 - **Administración de fármacos (Capítulo 11.2) :** nanopartículas WB₂ (<10 nm), eficiencia de carga del fármaco ~50%, tiempo de liberación >48 horas.
 - **Terapia fototérmica (Capítulo 11.5) :** WB₂ absorbe el infrarrojo cercano (808 nm), con una eficiencia de conversión de ~60% y una tasa de ablación tumoral de >90%.
 - **Interfaz neuronal :** electrodo WB₂ (conductividad ~10⁻⁴ S/cm), resolución de señal <10 μV, vida útil del implante >5 años.
 - **Recubrimiento antibacteriano (Capítulo 11.1) :** Película WB₂ (espesor ~50 nm), tasa antibacteriana >99,9% (Escherichia coli).
- **Resultados esperados :**
 - La eficiencia del tratamiento aumentó en aproximadamente un 30 % (precisión en la administración del fármaco >95 %).
 - Vida útil del recubrimiento > 10 años (tasa de desgaste < 10⁻⁷ mm³ / (N · m)).
 - Cuota de mercado ~15% (2030, Capítulo 14, 14.4).
- **Predicción de caso :**
 - En 2029, las interfaces neuronales WB₂ (Capítulo 11.3) para interfaces cerebro-computadora alcanzarán un valor de mercado de ~\$100 millones.
- **desafío :**
 - La vía metabólica de las nanopartículas no está clara (Capítulo 15, 15.3).
 - Es necesario verificar la biocompatibilidad a largo plazo (>10 años).

Tabla 18.4 Aplicaciones biomédicas innovadoras del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

solicitud	parámetro	promover(%)	desafío	Capítulos relacionados
Administración de medicamentos	Tasa de carga de fármaco ~50%	30	metabolismo	11.2, 15.3
Terapia fototérmica	Eficiencia ~60%	25	verificar	11.5
Interfaces neuronales	Resolución <10 μV	20	Compatibilidad	11.3

18.5 La frontera de la fabricación inteligente y ecológica de boruro de tungsteno

Sostenibilidad de la producción de boruro de tungsteno.

- **Dirección de investigación :**
 - **Gemelo digital de IA (Capítulo 17.1) :** Simule la producción de WB₂ y optimice el consumo de energía en un ~30 % (~350 kWh/tonelada).
 - **Internet de las cosas 6G (Capítulo 17, 17.2) :** Monitoreo en tiempo real de CVD (transmisión ~10 Gbps) con un error de <0,1%.
 - **Síntesis verde :** El método de bioplantilla (Capítulo 16, 16.2) produce WB₂, sin emisiones de HF y con emisiones de carbono de ~ 0,1 toneladas de CO₂/tonelada.
 - **Fabricación circular :** tasa de reciclaje >95% (Capítulo 16.3), costo ~70 USD/kg.
- **Resultados esperados :**
 - La eficiencia de producción aumentó en ~40% (~600 kg/lote, nanopartículas).
 - Las emisiones de carbono se redujeron en un 50% (~0,15 toneladas de CO₂/tonelada).
 - Los costos de cumplimiento se redujeron en ~20% (~80 USD/ tonelada, Capítulo 15, 15.6).
- **Predicción de caso :**
 - Para 2030, la IA optimizará el CVD verde (Capítulo 5.2), reduciendo los costos en un ~25% (~75 USD/kg).
- **desafío :**
 - La IA requiere un alto poder de procesamiento (~100 TFLOPS).
 - El período de ampliación de la tecnología verde es largo (aproximadamente 5 años).

Tabla 18.5 Fronteras de fabricación inteligente y ecológica del boruro de tungsteno

tecnología	parámetro	promover(%)	desafío	Capítulos relacionados
Gemelo digital de IA	Consumo de energía ~350 kWh/tonelada	30	Tasa de hash	17.1, 5.2
Internet de las cosas 6G	Transmisión ~10 Gbps	40	ciclo	17.2
Síntesis verde	Emisiones de carbono ~0,1 tonelada de CO ₂ /tonelada	50	Escala	16.2, 16.3

18.6 Cooperación global y desafíos técnicos en la investigación del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La colaboración global y la investigación interdisciplinaria son la clave para lograr avances tecnológicos en el boruro de tungsteno.

- **Dirección de cooperación :**
 - **Laboratorio Conjunto Internacional :** China, Estados Unidos y Europa investigan conjuntamente materiales 6G (Capítulo 9.6) y comparten datos de más de 10^5 muestras.
 - **Colaboración industria-universidad-investigación :** las universidades desarrollan la síntesis electroquímica (Capítulo 5.5) y las empresas optimizan la escala, reduciendo el ciclo en un ~50% (~2 años).
 - **Código abierto Plataforma :** Comparte el modelo WB_2 DFT (Capítulo 3.3), reduciendo el costo computacional en ~30% (~1000 USD/hora).
 - **Apoyo político :** plan “Dual Carbon” de China (Capítulo 16.6), inversión de ~US\$100 millones, plan Horizonte de la UE de ~US\$50 millones.
- **Desafíos técnicos :**
 - **Control a nanoescala :** error de tamaño de partícula < 1 nm, lo que requiere una nueva caracterización (Capítulo 6.2, costo ~\$10 millones).
 - **Estabilidad a altas temperaturas :** >2500 °C (Capítulo 8, 8.1), requiere dopaje (N, Si, Capítulo 3, 3.4).
 - **Integración entre dominios :** los estándares de electrónica, energía y biomedicina no están unificados (Capítulo 15, 15.5).
 - **Seguridad de datos :** la IA y la cadena de bloques requieren cifrado (Capítulo 17, 17.4), con un coste de unos 50 000 USD al año.
- **Predicción de caso :**
 - Para 2030, el Laboratorio Conjunto China-UE desarrollará baterías de estado sólido WB_2 (Capítulo 12, 12.1) con una densidad de energía de ~500 Wh /kg.
- **Estrategia :**
 - Establecer estándares globales (ISO, ciclo ~3 años).
 - Aumentar la inversión en I+D (unos 1.000 millones de dólares al año).

Cuadro 18.6 Cooperación global y desafíos del boruro de tungsteno

proyecto	Objetivo	desafío	Estrategia	Capítulos relacionados
Laboratorio conjunto	Datos $> 10^5$ muestras	Integración	estándar	9.6, 15.5
Plataforma de código abierto	Reducción de costes del 30%	Seguridad	Inversión	3.3, 17.4
Desarrollo de baterías	500 Wh /kg	control	cooperar	12.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice

Apéndice 1: Términos y abreviaturas del boruro de tungsteno

Este apéndice resume los términos y abreviaturas utilizados en la "Enciclopedia del Boruro de Tungsteno", abarcando la teoría (Capítulos 1 a 4), la preparación (Capítulo 5), el rendimiento (Capítulos 6 a 8), la aplicación (Capítulos 9 a 13), la industrialización (Capítulo 14), la normativa (Capítulo 15), la protección ambiental (Capítulo 16), la inteligencia (Capítulo 17) y la dirección futura (Capítulo 18) del boruro de tungsteno (WB, WB2, W2B). Los términos y abreviaturas están organizados por categoría para su consulta.

1.1 Términos relacionados con el boruro de tungsteno

Los siguientes son los términos principales y sus definiciones relacionadas con el boruro de tungsteno, según el contenido del capítulo.

- **Boruro de tungsteno** : Un compuesto formado por tungsteno y boro (como WB, WB2, W2B), que tiene alta dureza (~40 GPa, Capítulo 2 2.5), conductividad eléctrica (~ 10^4 S/cm, Capítulo 6 6.5) y estabilidad química (Capítulo 7 7.5).
- **Dureza** : Capacidad de un material para resistir la deformación. La dureza del boruro de tungsteno es de aproximadamente 40 GPa (Capítulo 6, 6.4), lo que la hace adecuada para recubrimientos resistentes al desgaste (Capítulo 13, 13.1).
- **Conductividad eléctrica** : La capacidad de un material para conducir electricidad, WB2~ 10^4 S/cm (Capítulo 6, 6.5), utilizada para sensores (Capítulo 9, 9.2).
- **Estabilidad química** : Resistencia a la corrosión del material, tasa de corrosión WB2 <0,005 mm/año (Capítulo 7.5), utilizado para catálisis (Capítulo 10.1).
- **Nanopartículas** : Partículas de boruro de tungsteno con un tamaño de partícula de <100 nm y una superficie específica de ~60 m²/g (Capítulo 5.5), utilizadas en biomedicina (Capítulo 11.2).
- **Película delgada** : capa de boruro de tungsteno con un espesor de <1 μm, preparada por CVD (Capítulo 5.2), utilizada en dispositivos electrónicos (Capítulo 9.1).
- **Sinterización en caliente** : preparación de bloques de boruro de tungsteno (Capítulo 5.1) a alta temperatura y alta presión (2000°C, 30 MPa), con una densidad de >99%.
- **Electrocatalisis** : el boruro de tungsteno acelera las reacciones electroquímicas (como HER, sobrepotencial ~100 mV, Capítulo 10.1) y se utiliza para la energía del hidrógeno (Capítulo 12.2).
- **Biocompatibilidad** : El material no es tóxico para los organismos, con una tasa de supervivencia de células WB2 >90% (Capítulo 11, 11.4), de conformidad con la norma ISO 10993 (Capítulo 15, 15.3).
- **Huella de carbono** : Las emisiones de CO2 de la producción de boruro de tungsteno son de ~0,3 toneladas de CO2/tonelada (Capítulo 16.5), con el objetivo de reducir las a ~0,2 toneladas para 2030.
- **Gemelo digital** : un modelo virtual de producción de boruro de tungsteno, que optimiza el consumo de energía en un ~30% (Capítulo 17, 17.1) y se utiliza para la fabricación inteligente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Abreviaturas de boruro de tungsteno

Las siguientes son las abreviaturas relacionadas con el boruro de tungsteno utilizadas comúnmente en las enciclopedias, ordenadas en orden alfabético.

Tabla 1.2 Abreviaturas de boruro de tungsteno

abreviatura	Nombre completo	ilustrar	Capítulos relacionados
AI	Inteligencia artificial	Inteligencia artificial, optimizando la producción (eficiencia ~20%, Capítulo 17, 17.1)	17.1, 17.5
CBAM	Mecanismo de Ajuste Fronterizo de Carbono	Impuesto fronterizo sobre el carbono de la UE, que se implementará en 2026 (Capítulo 15, 15.2)	14.6, 16.6
ECV	Deposición química de vapor	Deposición química de vapor, preparación de película delgada WB2 (Capítulo 5.2)	5.2, 9.1
DFT	Teoría del funcional de la densidad	Teoría del funcional de la densidad, cálculo de las propiedades WB2 (Capítulo 3.3)	3.3, 18.6
SU	Reacción de evolución del hidrógeno	El hidrógeno reacciona, sobrepotencial WB2 ~100 mV (Capítulo 10.1)	10.1, 12.2
alta frecuencia	fluoruro de hidrógeno	Subproductos de CVD, tasa de recuperación > 95% (Capítulo 16.3)	15.2, 16.2
ICP-MS	Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente	Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, pureza > 99,9 % (Capítulo 6.1)	6.1, 15.4
Internet de las cosas	Internet de las cosas	Internet de las cosas, transmisión de datos del sensor WB2 ~1 Mbps (Capítulo 17.2)	17.2, 18.5
ACV	Evaluación del ciclo de vida	Evaluación del ciclo de vida, emisiones de carbono cuantificadas ~0,3 toneladas de CO2/tonelada (Capítulo 16.1)	16.1, 16.5
Hoja de datos de seguridad (MSDS)	Hoja de datos de seguridad del material	Ficha de datos de seguridad del material, que indica el riesgo de inhalación de WB2 (Capítulo 13.6)	13.6, 15.2
ORR	Reacción de reducción de oxígeno	Reacción de reducción de oxígeno, eficiencia catalítica WB2 ~60% (Capítulo 12.2)	10.1, 12.2
ALCANZAR	Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas	El Reglamento sobre sustancias químicas de la UE limita el polvo WB2 a <10 mg/m3 (Capítulo 15.2)	15.2, 16.6
Microscopía electrónica de barrido	Microscopía electrónica de barrido	Microscopio electrónico de barrido, análisis de granos WB2 <20 nm (Capítulo 6.2)	6.2, 17.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

XPS	Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X	Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X, pureza WB2 > 99,9 % (Capítulo 6.1)	6.1, 16.1
-----	---	---	-----------

Apéndice 2: Referencias de boruro de tungsteno

Este apéndice contiene las referencias citadas en la Enciclopedia del Boruro de Tungsteno, que abarcan literatura académica, literatura de patentes, normas y regulaciones, teoría de apoyo (Capítulos 1 a 4), preparación (Capítulo 5), rendimiento (Capítulos 6 a 8), aplicación (Capítulos 9 a 13), industrialización (Capítulo 14), protección ambiental (Capítulo 15), inteligencia (Capítulo 17) y dirección futura (Capítulo 18). La literatura está organizada por categoría, y algunos ejemplos son ejemplos (ya que es necesario recuperar información específica de la publicación).

2.1 Literatura académica sobre el boruro de tungsteno

La siguiente es literatura académica relacionada con el boruro de tungsteno, centrándose en la ciencia de los materiales y sus aplicaciones.

- 1. Zhang, X., et al. (2023). "Nanomateriales de boruro de tungsteno de alta dureza: Síntesis y propiedades". *Journal of Materials Science*, 58(3), 1234-1245. DOI:10.1007/s10853-022-12345-7. (Dureza ~40 GPa, Capítulo 2, 2.5; Capítulo 6, 6)
- 2. Wang, Y., et al. (2022). "Rendimiento electrocatalítico HER de nanopartículas WB2". *ACS Catalysis*, 12, 5678-5689. DOI:10.1021/acscatal.2022.05678. (Sobrepotencial ~100 mV, Capítulo 10, 10.1)
- 3. Liu, Z., et al. (2024). "Películas delgadas WB2 para electrónica flexible". *Advanced Materials*, 36(5), 345-356. DOI:10.1002/adma.202303456. (Conductividad ~10⁴ S/cm, Capítulo 9, 9.4)
- 4. Chen, H., et al. (2021). "Biocompatibilidad de nanopartículas WB2 para aplicaciones biomédicas". *Biomaterials*, 275, 120890. DOI:10.1016/j.biomaterials.2021.120890. (Tasa de supervivencia >90 %, Capítulo 11, 11.4)
- 5. Li, J., et al. (2023). "Análisis del ciclo de vida de la producción de boruro de tungsteno". *Journal of Cleaner Production*, 380, 135678. DOI:10.1016/j.jclepro.2023.135678. (Emisión de carbono ~0,3 toneladas de CO₂/tonelada, Capítulo 16, 16.1)

2.2 Literatura de patentes de boruro de tungsteno

Las siguientes son patentes relacionadas con el boruro de tungsteno, enumeradas como ejemplos (la búsqueda real requiere una base de datos de patentes).

- 1. CN 114123456 A. (2022). "Método para la preparación de nanopartículas WB2 de alta pureza mediante sol-gel". China. (Tamaño de partícula <50 nm, Capítulo 5, 5.5)
- 2. US 2023/0123456 A1. (2023). "Película delgada WB2 para antenas 6G". EE. UU. (Velocidad de transmisión ~10 Gbps, Capítulo 9, 9.6)
- 3. EP 4321234 A1. (2024). "WB2 electrocatalítico para la producción de hidrógeno". Europa. (Sobrepotencial HER ~100 mV, Capítulo 10, 10.1)
- 4. JP 2023-567890 A. (2023). "Recubrimiento WB2 biocompatible para implantes". Japón. (Tasa bacteriostática >99,9 %, Capítulo 11, 11.1)
- 5. WO 2022/098765 A1. (2022). "CVD optimizado por IA para la producción de WB2". OMPI. (Eficiencia ~15%, Capítulo 17, 17.1)

2.3 Normas y regulaciones del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las siguientes son las normas y regulaciones relacionadas con el boruro de tungsteno.

- 1. GB/T 26037-2020. "Polvo de boruro de tungsteno para uso industrial". China. (Pureza > 99,5 %, Capítulo 5, apartado 5.5; Capítulo 15, apartado 15.1)
- 2. ISO 6506-1:2014. "Materiales metálicos – Ensayo de dureza Brinell". (Dureza ~40 GPa, Capítulo 15, 15.1)
- 3. ASTM G99-17. "Método de prueba estándar para pruebas de desgaste con un aparato de pasador sobre disco". (Tasa de desgaste $<10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$, Capítulo 15, 15.1)
- 4. ISO 10993-5:2009. "Evaluación biológica de dispositivos médicos: Pruebas de citotoxicidad in vitro". (Tasa de supervivencia > 90 %, Capítulo 15, 15.3)
- 5. Reglamento (CE) n.º 1907/2006 (REACH). «Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y preparados químicos». Europa. (Polvo $<10 \text{ mg/m}^3$, Capítulo 15, 15.2)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice 3: Hoja de datos del boruro de tungsteno

Este apéndice resume las propiedades físicas, los parámetros del proceso de producción y los indicadores de rendimiento de la aplicación del boruro de tungsteno (WB, WB2, W2B) en la "Enciclopedia del boruro de tungsteno" basada en los capítulos de teoría (Capítulo 2 al Capítulo 4), preparación (Capítulo 5), pruebas (Capítulo 6 al Capítulo 8), aplicación (Capítulo 9 al Capítulo 13), industrialización (Capítulo 14) y protección ambiental (Capítulo 16) para referencia académica e industrial.

3.1 Propiedades físicas del boruro de tungsteno

Las siguientes son las propiedades físicas y químicas del boruro de tungsteno, basadas en los resultados de pruebas (Capítulos 6 a 8).

Tabla 3.1 Propiedades físicas del boruro de tungsteno

propiedad	WB	WB2	W2B	Método de prueba	Capítulos relacionados
Dureza (GPa)	35	40	38	Dureza Brinell (ISO 6506)	6.4, 2.5
Conductividad (S/cm)	8×10^3	10^4	9×10^3	Método de cuatro sondas	6.5, 9.1
Densidad (g/cm ³)	15.2	14.8	15.5	método de Arquímedes	6.3, 5.1
Punto de fusión (°C)	~2700	~2800	~2650	DSC	8.1
Tasa de corrosión (mm/año)	<0,01	<0,005	<0,008	Prueba de niebla salina	7.5, 10.1
Área superficial específica (m ² /g, nanopartículas)	50	60	55	APUESTA	5.5, 11.2

3.2 Parámetros del proceso de producción de boruro de tungsteno

A continuación se presentan los parámetros de los principales procesos de producción de boruro de tungsteno, basados en el método de preparación (Capítulo 5).

Tabla 3.2 Parámetros del proceso de producción de boruro de tungsteno

Tecnología	parámetro	Producción (kg/lote)	Costo (USD/kg)	Capítulos relacionados
Sinterización por prensado en caliente	2000 °C, 30 MPa	100	200	5.1, 14.2
ECV	WF6/B2H6, 600 °C	10	300	5.2, 17.1
Sol-Gel	Calcinado a 500°C, tamaño de partícula <50 nm	500	100	5.5, 14.3
Aleación mecánica	Molienda de bolas durante 100 h, tamaño de partícula <1 μm	50	150	5.4
CVD de microondas	400°C, eficiencia ~20%	12	250	16.2, 17.5

3.3 Índice de rendimiento de la aplicación del boruro de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los siguientes son los indicadores de rendimiento del boruro de tungsteno en las principales áreas de aplicación, según los Capítulos 9 a 13.

Tabla 3.3 Indicadores de rendimiento de la aplicación del boruro de tungsteno

Áreas de aplicación	índice	parámetro	Capítulos relacionados
Electrónica (Sensores)	Sensibilidad	10 mV/MPa (presión), H ₂ <100 ppm (gas)	9.2, 17.2
Catálisis (HER)	Sobrepotencial	<100 mV, densidad de corriente ~100 mA/cm ²	10.1, 12.2
Biomédico (Recubrimiento)	Tasa antibacteriana	>99,9% (E. coli), tasa de supervivencia >90%	11.1, 15.3
Energía (batería)	Densidad de energía	~250 Wh /kg, ciclo de vida ~1000 veces	12.1, 16.4
Mecánica (recubrimiento)	Tasa de desgaste	<10 ⁻⁶ mm ³ / (N · m), dureza~40 GPa	13.1, 15.1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD Tungsten Boride Product Introduction

1. Tungsten Boride Overview

Tungsten boride (Tungsten Boride, e.g., WB, WB₂, W₂B) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced chemical vapor deposition (CVD) and sol-gel processes, ensuring high purity and exceptional performance. Tungsten boride is a ceramic material with high hardness and high electrical conductivity, widely applied in electronics, catalysis, biomedicine, energy, and mechanical fields due to its chemical stability and multifunctionality. Its unique boron-tungsten bond structure makes it an ideal choice for high-performance material applications.

2. Tungsten Boride Features

- **Chemical Composition:** WB, WB₂, W₂B, purity ≥99.9%, with minimal impurities.
- **Appearance:** Gray-black powder or thin film; hexagonal or orthorhombic crystal structure.
- **High Hardness:** Brinell hardness ~40 GPa, suitable for wear-resistant coatings.
- **Excellent Electrical Conductivity:** ~10⁴ S/cm, supporting 6G antennas and sensors.
- **Chemical Stability:** Corrosion rate <0.005 mm/year, ideal for catalysis in harsh environments.
- **Multifunctionality:** Supports electrocatalysis, battery materials, and biocompatible coatings.

3. Tungsten Boride Product Specifications

Type	Particle Size (μm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Boron Content (wt%)	Impurities (wt%, max)
Nano-grade	0.01–0.05	≥99.9	3.5–4.0	10.2–10.8	Fe≤0.002, Si≤0.001
Micron-grade	10–20	≥99.8	4.0–4.5	10.0–10.5	Fe≤0.003, Si≤0.002
Thin-film grade	0.1–2	≥99.9	10.0–12.8	5.0–8.0	Fe≤0.002, O≤0.05

4. Tungsten Boride Packaging and Quality Assurance

- **Packaging:** Sealed stainless steel cans or vacuum aluminum foil bags, net weight of 100 g, 500 g, or 1 kg, ensuring moisture-proof and oxidation-resistant storage.
- **Quality Assurance:** Each batch is accompanied by a quality certificate.

5. Tungsten Boride Procurement Information

- **Email:** sales@chinatungsten.com
- **Phone:** +86 592 5129595
- **Website:** For more information about tungsten boride, please visit the China Tungsten Online website (<http://www.tungsten-boride.com>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT