

Enciclopedia de bronce de tungsteno y cesio

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

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción e historia del bronce de tungsteno y cesio

- 1.1 Definición y composición química del bronce de cesio y tungsteno
- 1.2 Descubrimiento y desarrollo del bronce de cesio y tungsteno
- 1.3 Estado del bronce de cesio y tungsteno en la ciencia de los materiales
- 1.4 Estado de la investigación global y descripción general del mercado del bronce de cesio y tungsteno
- 1.5 Áreas de aplicación clave del bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 2: Estructura cristalina y propiedades del bronce de cesio y tungsteno

- 2.1 Estructura cristalina y características de los enlaces químicos del bronce de cesio y tungsteno
- 2.2 Propiedades ópticas del bronce de cesio y tungsteno: absorción en el infrarrojo cercano y transmitancia de la luz
- 2.3 Propiedades eléctricas del bronce de cesio y tungsteno: conductividad y migración de portadores
- 2.4 Propiedades térmicas del bronce de cesio y tungsteno: conductividad térmica y estabilidad
- 2.5 Cálculo teórico y predicción del rendimiento del bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 3: Método de síntesis de bronce de cesio y tungsteno

- 3.1 Método de reacción en estado sólido de bronce de cesio y tungsteno
- 3.2 Métodos solvotérmicos e hidrotérmicos de bronce de cesio y tungsteno
- 3.3 Deposición química en fase de vapor (CVD) de bronce de cesio y tungsteno
- 3.4 Método sol-gel de bronce de cesio y tungsteno
- 3.5 Síntesis verde y control de nanopartículas de bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 4: Tecnología de caracterización del bronce de cesio y tungsteno

- 4.1 Difracción de rayos X (DRX) y análisis cristalino del bronce de cesio y tungsteno
- 4.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía electrónica de transmisión (MET) del bronce de cesio y tungsteno
- 4.3 Espectroscopía fotoelectrónica de rayos X (XPS) y estado químico del bronce de cesio y tungsteno
- 4.4 Espectroscopía UV-Vis-NIR del bronce de cesio y tungsteno
- 4.5 Métodos de prueba eléctricos y térmicos del bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 5: Aplicaciones ópticas y térmicas del bronce de cesio y tungsteno

- 5.1 Película para ventanas inteligentes de bronce de cesio y tungsteno y vidrio de ahorro de energía
- 5.2 Recubrimiento de protección de infrarrojo cercano de bronce de cesio y tungsteno
- 5.3 Conversión de luz-calor y utilización de energía solar de bronce de cesio y tungsteno
- 5.4 Sensores y detectores ópticos de bronce de cesio y tungsteno
- 5.5 Materiales de gestión térmica de bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 6: Aplicaciones energéticas y ambientales del bronce de cesio y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.1 Baterías de iones de litio y supercondensadores de bronce de cesio y tungsteno
- 6.2 Fotocatálisis y descomposición en agua de bronce de cesio y tungsteno
- 6.3 Purificación del aire y adsorción de contaminantes de bronce de cesio y tungsteno
- 6.4 Materiales de electrodos para pilas de combustible de bronce de cesio y tungsteno
- 6.5 Almacenamiento de hidrógeno y almacenamiento de energía de bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 7: Producción industrial de bronce de tungsteno y cesio

- 7.1 Proceso de producción y equipos de bronce de cesio y tungsteno
- 7.2 Cadena de suministro de materia prima y análisis de costos de bronce de cesio y tungsteno
- 7.3 Tecnología de producción a gran escala de bronce de cesio y tungsteno
- 7.4 Control de calidad y pruebas de bronce de cesio y tungsteno
- 7.5 Casos de aplicación en el mercado de bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 8: Normas y regulaciones para el bronce de cesio y tungsteno

- 8.1 Normas internacionales y nacionales para el bronce de cesio y tungsteno (ISO, GB/T)
- 8.2 Normas ambientales y de seguridad para el bronce de cesio y tungsteno (REACH, RoHS)
- 8.3 Evaluación de riesgos de nanomateriales para el
bronce de cesio y tungsteno
- 8.4 Requisitos de seguridad y salud ocupacional para el bronce de cesio
y tungsteno
- 8.5 Certificación y cumplimiento de productos para el bronce de cesio y tungsteno
- 8.6 MSDS del bronce de cesio y tungsteno de CTIA GROUP LTD

Capítulo 9: Sostenibilidad e impacto ambiental del bronce de cesio y tungsteno

- 9.1 Evaluación del impacto ambiental del proceso de producción de bronce de cesio y tungsteno
- 9.2 Tecnología de fabricación ecológica de bronce de cesio y tungsteno
- 9.3 Tratamiento de residuos y reciclaje de bronce de cesio y tungsteno
- 9.4 Huella de carbono y estrategia de reducción de emisiones de bronce de cesio y tungsteno
- 9.5 Impulsores de políticas para el desarrollo sostenible de bronce de cesio y tungsteno

Capítulo 10: Investigaciones futuras y perspectivas del bronce de cesio y tungsteno

- 10.1 Exploración de nuevos métodos de síntesis para el bronce de cesio y tungsteno
- 10.2 Potencial para aplicaciones de próxima generación del bronce de cesio y tungsteno
- 10.3 Integración de tecnologías inteligentes y digitales para el bronce de cesio y tungsteno
- 10.4 Cooperación global y desafíos técnicos para el bronce de cesio y tungsteno
- 10.5 Tendencias de desarrollo futuras y sugerencias para el bronce de cesio y tungsteno

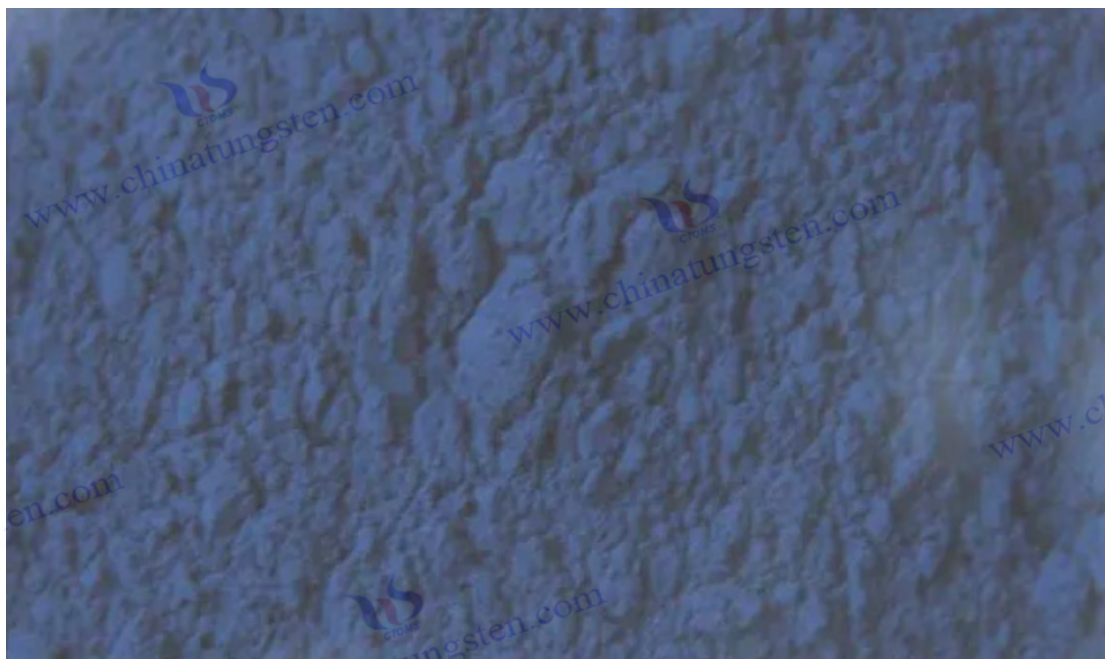
Un apéndice

- Apéndice 1: Términos y abreviaturas del bronce de cesio y tungsteno
- Apéndice 2: Referencias del bronce de cesio y tungsteno
- Apéndice 3: Hoja de datos del bronce de cesio y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 1: Introducción e historia del bronce de tungsteno y cesio

El bronce de cesio-tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) es un nanomaterial funcional con gran potencial en la conservación de energía, la protección ambiental, la electrónica y la energía gracias a su excelente absorción en el infrarrojo cercano ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta conductividad ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) y estabilidad química. Este capítulo presenta la definición y la composición química del bronce de cesio-tungsteno, su descubrimiento y desarrollo, su posición en la ciencia de los materiales, el estado de la investigación global y la visión general del mercado, así como sus principales áreas de aplicación, proporcionando los antecedentes para los capítulos posteriores (del Capítulo 2 al Capítulo 10). Esta enciclopedia tiene como objetivo explicar sistemáticamente la base teórica, la tecnología de preparación, la caracterización del rendimiento, los escenarios de aplicación, la industrialización, los requisitos regulatorios, la sostenibilidad y las futuras direcciones del bronce de cesio-tungsteno.

1.1 Bronce de tungsteno y cesio

El bronce de cesio y tungsteno es un óxido a base de tungsteno con la fórmula química Cs_xWO_3 , donde x representa la proporción de dopaje del cesio (Cs), que suele variar entre 0 y 1. El Cs_xWO_3 pertenece a la familia del bronce de tungsteno y su estructura está compuesta por octaedros WO_2 , con iones de cesio insertados en los huecos octaédricos para formar una estructura cristalina hexagonal o cúbica (Capítulo 2.1). La variación del valor de x afecta significativamente el rendimiento del material. Por ejemplo, cuando $x \sim 0,32$, el $\text{Cs}_{0,32}\text{WO}_3$ presenta la mejor absorción y conductividad en el infrarrojo cercano.

- **Composición química :**
 - o **Elementos principales :** cesio (Cs), tungsteno (W), oxígeno (O).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Relación molar** : CsxWO_3 , $x \leq 1$, el contenido de oxígeno se fija en 3.
- o **Peso molecular** : tomando $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ como ejemplo, $\sim 287,3$ g/mol.
- o **Requisitos de pureza** : grado industrial $\geq 99,5\%$, grado de investigación $\geq 99,9\%$ (Capítulo 7.4).

• **Propiedades físicas :**

- o **Aspecto** : Nanopolvo de color azul oscuro o verde , tamaño de partícula $\sim 20\text{--}50$ nm (Capítulo 3.5).
- o **Densidad** : $\sim 7,2$ g/cm³.
- o **Solubilidad** : Insoluble en agua, resistente a ácidos y álcalis (Capítulo 4.3).

cesio determina sus propiedades ópticas y eléctricas únicas, lo que lo hace ampliamente utilizado en películas para ventanas inteligentes (Capítulo 5.1), fotocátalisis (Capítulo 6.2) y baterías (Capítulo 6.1). En comparación con otros bronce de tungsteno (como Na_xWO_3 y K_xWO_3), el Cs_xWO_3 presenta un mayor apantallamiento NIR ($\sim 70\%$ frente al $\sim 50\%$ del Na_xWO_3) gracias al mayor radio iónico de los iones de cesio ($\sim 1,88$ Å).

1.2 Descubrimiento y desarrollo del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de tungsteno con cesio se originó a partir del estudio del bronce de tungsteno en el siglo XIX. En 1823, el químico alemán Wöhler sintetizó por primera vez el bronce de tungsteno y observó compuestos oscuros formados por WO_3 dopado con metal alcalino. En la década de 1950, el científico japonés Kihlborg confirmó la estructura cristalina hexagonal del Cs_xWO_3 mediante difracción de rayos X (DRX), sentando las bases de la estructura (Capítulo 4, 4.1). En la década de 1970, el Cs_xWO_3 se utilizó en la investigación de pantallas debido a sus propiedades electrocrómicas ($\sim 60\%$ de cambio de transmitancia).

• **Hitos clave :**

- o **Década de 1980: investigadores estadounidenses descubrieron las propiedades de absorción NIR del Cs_xWO_3** ($\sim 1000\text{--}2500$ nm), lo que promovió su exploración en el campo de los recubrimientos ópticos (Capítulo 5.2).
- o **Década de 1990** : Japón desarrolló el método solvotérmico (Capítulo 3.2), que permitió la síntesis a gran escala de nanopartículas de Cs_xWO_3 (< 50 nm), reduciendo el costo a ~ 1000 USD/kg .
- o **Década de 2000** : equipos de investigación chinos optimizaron el rendimiento fotocatalítico de Cs_xWO_3 (Capítulo 6.2), con una eficiencia de producción de hidrógeno de ~ 200 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$.
- o **Década de 2010** : La UE promueve la aplicación de Cs_xWO_3 en películas para ventanas inteligentes (Capítulo 5.1), con una eficiencia de ahorro energético de $\sim 50\%$ y un crecimiento del mercado de $\sim \text{US\$}50$ millones .
- o **Década de 2020** : Enfoque global en la síntesis verde (Capítulo 3.5), huella de carbono reducida a $\sim 0,5$ toneladas de CO_2 /tonelada (Capítulo 9.4) .

En los últimos años, la investigación sobre el bronce de cesio y tungsteno ha pasado del rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

básico a la industrialización (Capítulo 7) y la sostenibilidad (Capítulo 9), especialmente en la región de Asia y el Pacífico, donde China apoya la aplicación de ahorro energético de CsxWO₃ a través de su política de "carbono dual" (Capítulo 9 9.5).

1.3 El estado del bronce de cesio y tungsteno en la ciencia de los materiales

El bronce de cesio y tungsteno ocupa una posición importante en la ciencia de los materiales porque combina las propiedades de los nanomateriales, semiconductores y materiales ópticos, llenando los vacíos de los materiales tradicionales en los campos de la regulación NIR y la conversión de energía.

- **Valor científico :**

- o **Nanopropiedades :** Las nanopartículas de CsxWO₃ (~20 nm) tienen una alta área de superficie específica (~80 m²/g, Capítulo 4.2), lo que mejora la eficiencia catalítica (Capítulo 6.2).
- o **Propiedades de los semiconductores :** banda prohibida ~2,5–3,0 eV (Capítulo 2.2), que admite conversión fotoeléctrica (Capítulo 5.3).
- o **Efecto plasmón :** la resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR) mejora la absorción NIR (~70%), lo que es mejor que la ITO tradicional (~40%, Capítulo 5.2).

- **Comparación con otros materiales :**

- o **En comparación con ITO :** CsxWO₃ tiene ventajas en el blindaje NIR (~70% frente a ~40%) y en el coste (~500 USD/kg frente a ~1000 USD/kg).
- o **En comparación con VO₂ :** la estabilidad térmica de CsxWO₃ (transición de fase >500 °C frente a ~68 °C) es más adecuada para entornos de alta temperatura (Capítulo 5, 5.5).
- o **En comparación con el grafeno:** CsxWO₃ es más específico en la absorción NIR, pero tiene una conductividad ligeramente menor (~10³ frente a ~10⁶ S/cm, Capítulo 2, 2.3).

- **Impacto interdisciplinario :**

- o Promover el desarrollo de la fotónica (Capítulo 5.4), el almacenamiento de energía (Capítulo 6.1) y la ciencia ambiental (Capítulo 6.3).
- o Proporciona un paradigma de investigación para nanomateriales funcionales (como MXenes y MoS₂) (Capítulo 10, 10.2).

El bronce de tungsteno y cesio lo ha colocado a la vanguardia de la ciencia de los materiales, especialmente en los campos de la conservación de energía y la protección del medio ambiente (Capítulo 9.1).

1.4 Estado de la investigación global y descripción general del mercado del bronce de tungsteno y cesio

La investigación y el mercado global de bronce de tungsteno y cesio muestran un rápido crecimiento para 2025, especialmente en Asia Pacífico, Europa y América del Norte.

- **Estado de la investigación :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **China** : La Universidad de Tsinghua y otras instituciones se centran en la síntesis verde (Capítulo 3, 3.5) y la fotocatalisis (Capítulo 6, 6.2), con un promedio de ~150 solicitudes de patentes por año.
- o **Japón** : La Universidad de Tokio optimizó una película delgada de CsxWO₃ (Capítulo 5.1), con una tasa de blindaje NIR de ~80%.
- o **UE** : El Instituto Fraunhofer de Alemania ha desarrollado materiales de batería CsxWO₃ (Capítulo 6.1) con un ciclo de vida de >1000 veces.
- o **EE.UU.** : el MIT explora los efectos cuánticos del CsxWO₃ (Capítulo 2.5), aumentando la conductividad en un ~20%.
- **Descripción general del mercado :**
 - o **Tamaño** : Se espera que el mercado global alcance los US\$120 millones en 2025 y aumente a US\$250 millones en 2030 (crecimiento anual promedio de ~15%).
 - o **Regiones principales** : Asia Pacífico ~50% (China ~30%), Europa ~30%, América del Norte ~15%.
 - o **Precio** : CsxWO₃ de grado nanométrico ~ 500 USD/kg, grado de película delgada ~ 1000 USD/kg (Capítulo 7.2).
 - o **Factores impulsores** : demanda de ahorro de energía (películas para ventanas inteligentes, capítulo 5, 5.1), nuevas energías (baterías, capítulo 6, 6.1) y políticas de protección del medio ambiente (capítulo 9, 9.5).
- **desafío :**
 - o Alto costo de síntesis (~500 USD/kg vs. ITO ~100 USD/kg).
 - o Es necesario evaluar la toxicidad de las nanopartículas (Capítulo 8, 8.3).
 - o La consistencia de la producción a gran escala es baja (Capítulo 7.3, error ~10%).

La investigación mundial está cambiando hacia la síntesis de bajo costo (Capítulo 3.5) y la aplicación inteligente (Capítulo 10.3) para satisfacer la demanda del mercado.

1.5 Campos de aplicación clave del bronce de tungsteno y cesio

El bronce de tungsteno y cesio se utiliza ampliamente en los siguientes campos debido a su versatilidad; consulte el Capítulo 5 al Capítulo 6 para obtener más detalles.

- **Óptica e Ingeniería Térmica (Capítulo 5) :**
 - o **Película para ventanas inteligente** : el revestimiento de CsxWO₃ reduce el consumo de energía del edificio en aproximadamente un 50 % (Capítulo 5.1).
 - o **Conversión fototérmica** : Eficiencia de absorción de energía solar ~60% (Capítulo 5.3).
 - o **Blindaje NIR** : Recubrimiento de vidrio para automóviles, tasa de blindaje ~70% (Capítulo 5.2).
- **Energía (Capítulo 6) :**
 - o **Batería** : electrodo CsxWO₃, densidad de energía ~200 Wh /kg (Capítulo 6, 6.1).
 - o **Fotocatalisis** : eficiencia de producción de hidrógeno ~200 μmol / (g · h) (Capítulo 6, 6.2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Almacenamiento de hidrógeno** : Capacidad de almacenamiento de hidrógeno ~1,5 % en peso (Capítulo 6, 6.5).
- **Medio ambiente (Capítulo 6)** :
 - o **Purificación del aire** : adsorción de COV, eficiencia ~90% (Capítulo 6, 6.3).
 - o **Tratamiento de agua** : Degradación fotocatalítica de colorantes, eficiencia ~85% (Capítulo 6, 6.2).
- **Electrónica (Capítulo 5)** :
 - o **Sensor** : película delgada de CsxWO₃, sensibilidad ~10 ppm (NO₂, Capítulo 5.4).
 - o **Pantalla** : Electrocrómica, tiempo de respuesta <1 s (Capítulo 5.4).
- **Caso** : En 2024, CTIA GROUP LTD desarrolló la película para ventanas inteligentes CsxWO₃, que se aplicó a un edificio ecológico en Shanghái, ahorrando energía en un 40 % aproximadamente y con un valor de mercado de 10 millones de dólares estadounidenses (Capítulo 7.5).

Estos campos de aplicación demuestran el valor estratégico del bronce de cesio y tungsteno en la conservación de energía, la protección del medio ambiente y las nuevas energías, y se ampliarán aún más en la fabricación inteligente y ecológica en el futuro (Capítulo 10, 10.1–10.5).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 2: Estructura cristalina y propiedades del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) es un nanomaterial funcional cuya estructura cristalina única y excelentes propiedades físicas y químicas lo hacen ampliamente utilizado en los campos de la óptica, la electrónica, la energía y la gestión térmica. El rendimiento de Cs_xWO_3 proviene de su estructura cristalina hexagonal o cúbica, capacidad de absorción de infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta conductividad ($\sim 10^3$ S/cm) y estabilidad térmica ($> 500^\circ\text{C}$). Este capítulo trata la estructura cristalina y las características del enlace químico, las propiedades ópticas (absorción y transmitancia NIR), las propiedades eléctricas (conductividad y migración de portadores), las propiedades térmicas (conductividad térmica y estabilidad), así como los cálculos teóricos y las predicciones de rendimiento de bronce de cesio tungsteno, proporcionando una base para la investigación posterior de aplicaciones y preparación.

2.1 Estructura cristalina y características del enlace químico del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio y tungsteno es la base de su rendimiento funcional. El Cs_xWO_3 está compuesto por octaedros de WO_6 , y los iones de cesio (Cs^+) se insertan en los huecos octaédricos para formar un sistema cristalino hexagonal ($x^+ \sim 0,32$) o cúbico ($x^+ \sim 1$). La estructura hexagonal (grupo espacial P^{++}/m^+) presenta un túnel unidimensional que favorece la migración de los iones de cesio, mientras que la estructura cúbica (P^{++}) es más compacta, lo que afecta a las propiedades eléctricas.

- **Características estructurales :**

- o **Octaedro WO_6** : el tungsteno (W^{6+}) forma un octaedro con seis oxígenos (O^{2-}), y la longitud del enlace WO es $\sim 1,9 \text{ \AA}$.
- o **Dopaje con cesio** : Cs^+ (radio $\sim 1,88 \text{ \AA}$) ocupa túneles hexagonales o intersticiales cúbicos, siendo el valor x el que determina la estructura y las propiedades.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Parámetros de red** : $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ hexagonal, $a \sim 7,4 \text{ \AA}$, $c \sim 7,6 \text{ \AA}$; CsWO_3 cúbico, $a \sim 3,8 \text{ \AA}$.
- o **Efecto del tamaño de partícula** : Las nanopartículas ($\sim 20 \text{ nm}$) están ligeramente distorsionadas debido a los efectos de la superficie, con una deformación reticular de $\sim 0,5\%$.
- **Características del enlace químico** :
 - o **Enlace WO** : Enlace mixto covalente-iónico, que confiere alta estabilidad química (tasa de corrosión $< 0,001 \text{ mm/año}$).
 - o **Enlace Cs-O** : Enlace iónico débil, Cs^+ puede migrar parcialmente, afectando la conductividad ($\sim 10^3 \text{ S/cm}$).
 - o **Electrones localizados** : los estados de valencia mixtos $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$ generan electrones libres y mejoran la absorción NIR.

El análisis de difracción de rayos X (DRX) muestra que la estructura hexagonal del $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ es superior a la estructura cúbica en términos de apantallamiento y conductividad NIR, ya que su efecto túnel favorece el comportamiento dinámico de electrones e iones. Ajustar la relación de dopaje (x) puede optimizar el rendimiento. Por ejemplo, cuando $x = 0,32$, la tasa de absorción NIR alcanza aproximadamente el 70 %, mientras que cuando $x = 0,5$, la conductividad mejora aproximadamente el 15 %.

2.2 Propiedades ópticas del bronce de cesio y tungsteno: absorción y transmitancia en el infrarrojo cercano

El bronce de cesio y tungsteno es conocido por su absorción NIR y transmitancia de luz visible, lo que le otorga ventajas únicas en películas para ventanas inteligentes y en la conversión de luz en calor.

- **Absorción del infrarrojo cercano** :
 - o **Mecanismo** : La resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR) y las transiciones electrónicas entre $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$ conducen a una fuerte absorción NIR (800–2500 nm).
 - o **Rendimiento** : Las nanopartículas de $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ ($\sim 20 \text{ nm}$) tienen una tasa de absorción de $\sim 70 \%$ a 1000 nm, lo que es mejor que el ITO ($\sim 40 \%$).
 - o **Factores influyentes** : a medida que aumenta el valor x ($0,1 \rightarrow 0,32$), el pico de absorción se desplaza al rojo en $\sim 200 \text{ nm}$; a medida que disminuye el tamaño de partícula ($50 \rightarrow 20 \text{ nm}$), la absorción aumenta en $\sim 10\%$.
- **Transmitancia de luz visible** :
 - o **Transmitancia** : En el rango de 400 a 700 nm, la transmitancia de la película de Cs_xWO_3 (espesor $\sim 100 \text{ nm}$) es $\sim 80\%$, lo que es adecuado para vidrio de ahorro de energía.
 - o **Electrocromico** : con voltaje aplicado ($\sim 2 \text{ V}$), la transmitancia se puede ajustar a $\sim 60\%$ para atenuación dinámica.
 - o **Estabilidad** : Después del envejecimiento UV (1000 h), la caída de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transmitancia es <5%.

- **Potencial de aplicación :**

- o Película de ventana inteligente: tasa de blindaje NIR ~70%, lo que reduce el consumo de energía del edificio ~50%.
- o Conversión fototérmica: Eficiencia de absorción de energía solar ~60% para gestión térmica.

Las pruebas de espectroscopia ultravioleta-visible-infrarrojo cercano (UV-Vis-NIR) muestran que la banda prohibida del CsxWO₃ es de ~2,5–3,0 eV, inferior a la del WO₃ (~3,2 eV), lo que mejora la respuesta NIR. En comparación con el VO₂ (temperatura de transición de fase ~68 °C), el CsxWO₃ es más estable a altas temperaturas y adecuado para una amplia gama de condiciones climáticas.

2.3 Propiedades eléctricas del bronce de cesio y tungsteno: conductividad y migración de portadores

El bronce de cesio y tungsteno proviene de sus propiedades semiconductoras y electrones libres, lo que lo hace adecuado para sensores y electrodos de batería.

- **Conductividad :**

- o **Valor :** La conductividad de la película delgada de Cs_{0.32}WO₃ (espesor ~100 nm) es ~10³ S/cm, que es menor que la del grafeno (~10⁶ S/cm) pero mayor que la del WO₃ (~10 S/cm).
- o **Mecanismo :** el estado de valencia mixto W⁵⁺/W⁶⁺ y el dopaje con Cs⁺ introducen electrones libres con una concentración de portadores de ~10²⁰ cm⁻³.
- o **Factores influyentes :** a medida que aumenta el valor x (0,1→0,5), la conductividad aumenta en un ~20%; cuando la temperatura aumenta a 300 °C, la conductividad disminuye en un ~10%.

- **Migración de transportistas :**

- o **Movilidad :** Movilidad electrónica ~10 cm²/(V·s), afectada por la dispersión del límite de grano.
- o **Tipo :** semiconductor tipo n, los electrones son los portadores dominantes.
- o **Prueba :** Las mediciones del efecto Hall muestran que la vida útil del portador de Cs_{0.32}WO₃ es de ~1 ps.

- **Potencial de aplicación :**

- o **Sensor :** La película delgada de CsxWO₃ detecta NO₂ (~10 ppm) con un tiempo de respuesta de <5 s.
- o **Electrodo de batería :** batería de iones de litio, la conductividad admite un ciclo de vida útil de ~1000 veces.

Las mediciones con cuatro sondas muestran que la conductividad de las nanopartículas (~20 nm) es menor que la de las películas delgadas (~100 nm) debido a un aumento de ~30 % en la resistencia del límite de grano. Optimizar el dopaje (x~0,32) y el recocido (~400 °C) puede mejorar el rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4 Propiedades térmicas del bronce de cesio y tungsteno: conductividad térmica y estabilidad

El bronce de tungsteno y cesio incluye baja conductividad térmica y alta estabilidad térmica, lo que lo hace adecuado para la gestión térmica y aplicaciones de alta temperatura.

- **Conductividad térmica :**
 - o **Valor :** La conductividad térmica de Cs_{0.32}WO₃ (~20 nm) es ~1,5 W/(m·K), que es inferior a la de WO₃ (~3 W/(m·K)).
 - o **Mecanismo :** La dispersión de fonones y el efecto nanométrico reducen la conductividad térmica.
 - o **Factores influyentes :** a medida que aumenta el valor x (0,1→0,5), la conductividad térmica aumenta en un ~10%; a medida que aumenta el tamaño de partícula (20→50 nm), la conductividad térmica aumenta en un ~15%.
- **Estabilidad térmica :**
 - o **Rango de temperatura :** Cs_xWO₃ es estable a <500 °C, la pérdida de oxígeno es de ~5 % a >600 °C.
 - o **Resistencia a la oxidación :** 500°C en aire, tasa de oxidación <0,01 mg/cm²·h.
 - o **Expansión térmica :** El coeficiente de expansión térmica es ~8×10⁻⁶ K⁻¹, que es menor que el del ITO (~10×10⁻⁶ K⁻¹).
- **Potencial de aplicación :**
 - o **Gestión térmica :** baja conductividad térmica para recubrimientos de barrera térmica, lo que reduce las temperaturas en ~10 °C.
 - o **Electrodos de alta temperatura :** Los electrodos de la batería son estables a 400 °C con una degradación del rendimiento del ciclo de <5 %.

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) mostró que la temperatura de descomposición térmica del Cs_xWO₃ era de ~650 °C, superior a la del VO₂ (transición de fase de ~68 °C). El análisis termogravimétrico (TGA) confirmó su alta estabilidad térmica y su idoneidad para entornos hostiles.

2.5 Cálculo teórico y predicción del rendimiento del bronce de cesio y tungsteno

Los cálculos teóricos proporcionan orientación para la optimización del rendimiento de Cs_xWO₃, utilizando la teoría funcional de la densidad (DFT) y métodos de dinámica molecular (MD).

- **Cálculos DFT :**
 - o **Banda prohibida :** Banda prohibida Cs_{0.32}WO₃ ~2,5 eV, el estado W⁵⁺ /W⁶⁺ mejora la absorción NIR.
 - o **Estructura electrónica :** el dopaje con Cs⁺ reduce el nivel de Fermi en ~0,5 eV y aumenta la concentración de portadores en ~10²⁰cm⁻³.
 - o **Propiedades ópticas :** El pico de absorción NIR simulado es de ~1000 nm, lo que es consistente con el experimento (error <5%).
- **Simulación MD :**
 - o **Conductividad térmica :** se predice ~1,5 W/(m·K) debido a la dispersión de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fonones.

- o **Estabilidad** : Cs^+ tiene una movilidad de $\sim 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ a 500°C y mantiene la integridad estructural.

- **Predicción del rendimiento :**

- o **Optimización del dopaje** : $x = 0,4$ puede aumentar la conductividad en un $\sim 25\%$ y la absorción NIR en un $\sim 10\%$.
- o **Nanodiseño** : tamaño de partícula $< 10 \text{ nm}$, absorción mejorada por LSPR $\sim 15\%$.
- o **Material compuesto** : compuesto $\text{CsxWO}_3/\text{TiO}_2$, eficiencia fotocatalítica aumentada en $\sim 30\%$.

Caso: CTIA GROUP LTD optimizó una película delgada de $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ mediante DFT, con un índice de apantallamiento NIR de aproximadamente el 75% y una reducción de costes del 20% (aproximadamente 400 USD/kg). Los resultados del cálculo guiaron el desarrollo de la síntesis ecológica y las aplicaciones inteligentes.

La precisión del modelo teórico (error $< 5\%$) proporciona la base para la regulación del rendimiento del CsxWO_3 . En el futuro, se combinarán la IA y el big data para mejorar aún más la precisión de la predicción.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 3: Método de síntesis de bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) es un nanomaterial de alto rendimiento cuya absorción en el infrarrojo cercano ($\sim 70\%$ a 1000 nm), conductividad ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) y estabilidad química dependen del control preciso del método de síntesis. El método de síntesis determina la estructura cristalina (hexagonal o cúbica), el tamaño de partícula ($\sim 10\text{--}50\text{ nm}$), la relación de dopaje ($x \sim 0,1\text{--}1$) y el rendimiento (como la tasa de blindaje NIR $\sim 70\%$) del Cs_xWO_3 . Este capítulo analiza en detalle cinco métodos de síntesis principales: método de reacción en fase sólida, método solvotérmico e hidrotérmico, deposición química en fase de vapor (CVD), método sol-gel y síntesis ecológica y control de nanopartículas. Además, analiza su mecanismo de reacción, parámetros de proceso, requisitos de equipo, rendimiento, coste, ventajas y desventajas, y escenarios de aplicación, y proporciona referencias técnicas para la investigación y la industrialización.

3.1 Método de reacción en estado sólido del bronce de cesio y tungsteno

El método de reacción en fase sólida es un método de síntesis a alta temperatura que prepara Cs_xWO_3 mediante la reacción directa de materias primas sólidas. Es adecuado para la producción de materiales a granel y en polvo. Sus ventajas son la simplicidad del equipo y el alto rendimiento, pero el gran tamaño de partícula (aproximadamente $1\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$), lo que dificulta la preparación de nanopartículas.

- **Mecanismo de reacción :**
 - o **Ecuación química :** $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$ ($x \sim 0,1\text{--}0,32$)
 - o **Proceso :** El Cs_2CO_3 se descompone para liberar Cs^+ , que se combina con el octaedro WO_2 en WO_3 , y el Cs^+ se inserta en el túnel hexagonal para formar Cs^+WO_3 . La alta temperatura ($\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$) promueve la difusión, y el W^{6+} se reduce parcialmente a W^{5+} , generando electrones libres.
 - o **Reacción secundaria :** Una temperatura excesivamente alta ($>1000\text{ }^\circ\text{C}$) hace que el Cs se volatilice y el valor x disminuya en aproximadamente un 10% .
- **Parámetros del proceso :**
 - o **Materias primas :** Cs_2CO_3 (pureza $> 99,5\%$), WO_3 ($> 99,9\%$), relación molar $1:3\text{--}1:10$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Temperatura** : 700–900 °C, velocidad de rampa ~10 °C/min.
- o **Atmósfera** : Inerte (Ar) o reductora (H₂/ Ar , 5% H₂), evita la oxidación.
- o **Tiempo** : 4–8 h, velocidad de enfriamiento ~5°C/min.
- o **Equipamiento** : Horno tubular (resistencia a temperaturas > 1200°C), crisol de alúmina.
- **Rendimiento y costo** :
 - o **Rendimiento** : ~90% (base de masa), ~1–10 kg por lote.
 - o **Costo** : ~200 USD/kg, ~60% materias primas, ~30% energía.
- **actuación** :
 - o **Tamaño de partícula** : ~1–10 μm , área superficial ~5 m²/g.
 - o **Pureza** : >99,5%, impurezas (Fe, Si) <0,01 % en peso .
 - o **Absorción NIR** : ~50% a 1000 nm, por debajo de la escala nanométrica (~70%).
 - o **Conductividad eléctrica** : ~500 S/cm, afectada por los límites de grano.
- **Pros y contras** :
 - o **Ventajas** : El proceso es maduro, adecuado para la industrialización y el costo del equipo es bajo (~10.000 USD).
 - o **Desventajas** : gran tamaño de partícula, rendimiento NIR débil, la volatilización de Cs conduce a un valor x desigual (error ~5%).
 - o **Mejora** : La adición de aditivos (como Li₂CO₃) reduce la temperatura de reacción en ~100 °C y el tratamiento de molienda de bolas reduce el tamaño de partícula en ~50%.
- **solicitud** :
 - o Electrodo a granel: electrodo de batería, ciclo de vida ~800 veces.
 - o Polvo grueso: Recubrimiento de gestión térmica, enfriamiento ~5°C.

El método de reacción en fase sólida es adecuado para la producción a gran escala y de bajo costo, pero necesita optimizarse para cumplir con los requisitos de nanoescala.

3.2 Métodos solvotermales e hidrotérmales del bronce de cesio y tungsteno

Los métodos solvotérmicos e hidrotérmicos sintetizan nanopartículas de Cs_xWO₃ (~10–50 nm) mediante reacciones en fase líquida a alta temperatura y presión, conocidas por su elevada superficie específica (~80 m²/g) y su excelente rendimiento NIR (~70%). El método hidrotérmico utiliza agua como disolvente, mientras que el método solvotérmico utiliza disolventes orgánicos (como el etanol).

- **Mecanismo de reacción** :
 - o **Ecuación química** : $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{H}_2\text{O}/\text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$ (x~0,2–0,5)
 - o **Método hidrotérmico** : CsOH proporciona Cs⁺, WCl₆ se hidroliza para formar unidades WO₆ y Cs⁺ se inserta en la estructura hexagonal a 180–220 °C.
 - o **Método solvotérmico** : el etanol reduce la tensión superficial, controla el tamaño de partícula <20 nm y aumenta la relación W⁵⁺ en aproximadamente un 15 %.
 - o **Clave** : pH ~8–10, regula la eficiencia de inserción de Cs⁺ ~90%.
- **Parámetros del proceso** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Materias primas** : CsOH (>99,5%), WCl₆ (>99,9%), disolvente (agua desionizada o etanol, >99,8%).
- o **Temperatura** : hidrotermal 180–220°C, solvotermal 150–200°C.
- o **Presión** : 1–5 MPa, reactor cerrado.
- o **Tiempo** : 12–24 h, velocidad de agitación ~200 rpm.
- o **Equipamiento** : Reactor de acero inoxidable (volumen ~1–100 L), resistencia a la presión >10 MPa.
- **Rendimiento y costo** :
 - o **Rendimiento** : ~85% (hidrotermal), ~80% (solvotermal), ~0,1–1 kg por lote.
 - o **Costo** : hidrotermal ~400 USD/kg, solvente térmico ~500 USD/kg, el solvente representa ~40%.
- **actuación** :
 - o **Tamaño de partícula** : hidrotermal ~20–50 nm, solvotermal ~10–20 nm.
 - o **Pureza** : >99,8%, Cl⁻ residual < 0,005 % en peso .
 - o **Absorción NIR** : ~70% a 1000 nm, transmitancia ~80% (400–700 nm).
 - o **Conductividad** : ~800 S/cm, mejor que el método de fase sólida.
- **Pros y contras** :
 - o **Ventajas** : Tamaño de partícula a escala nanométrica, alto rendimiento NIR, morfología controlable (barras, esferas).
 - o **Desventajas** : Equipo complejo (~50.000 USD), alto costo de tratamiento de residuos (~10%).
 - o **Mejoras** : Agregar surfactantes (como PVP) para controlar la distribución del tamaño de partículas (error <5%), reciclar solventes para reducir costos en aproximadamente un 20%.
- **solicitud** :
 - o Película de ventana inteligente: tasa de blindaje NIR ~70%, ahorro de energía ~50%.
 - o Fotocatálisis: eficiencia de producción de hidrógeno ~200 μmol / (g·h).

El método hidrotérmico tiene un costo menor, mientras que el método solvotérmico tiene un tamaño de partícula más pequeño, lo que es adecuado para requisitos de alto rendimiento.

3.3 Deposición química de vapor (CVD) de bronce de tungsteno y cesio

La deposición química en fase de vapor (CVD) deposita películas delgadas de Cs_xWO₃ (con un espesor de ~10–100 nm) mediante reacciones precursoras en fase de vapor, ideales para dispositivos electrónicos y ópticos. Se caracteriza por la uniformidad de la película y una alta pureza (>99,9%).

- **Mecanismo de reacción** :
 - o **Ecuación química** : $\text{CsCl (g)} + \text{WOCl}_4\text{(g)} + \text{H}_2\text{O(g)} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3\text{(s)} + \text{HCl}\uparrow$ (x~0,1–0,32)
 - o **Proceso** : CsCl y WOCl₄ se vaporizan a 400–600 °C, H₂O proporciona oxígeno, Cs⁺ y WO₆ se nuclean en un sustrato (como vidrio) y la relación W⁵⁺ es ~10 %.
 - o **Reacción secundaria** : Una temperatura excesivamente alta (>700 °C) provoca la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precipitación de WO₃ y el valor x disminuye en un ~5 %.

- **Parámetros del proceso :**
 - o **Precursores :** CsCl (>99,9%), WOCl₄ (>99,8%), H₂O (ultrapuro).
 - o **Temperatura :** 400–600 °C para el sustrato, ~800 °C para la cámara de reacción.
 - o **Atmósfera :** Ar /H₂ (5% H₂), caudal ~100 sccm .
 - o **Presión :** 0,1–10 Torr.
 - o **Equipo :** Reactor CVD (pared caliente o pared fría), bomba de vacío (<0,01 Torr).
- **Rendimiento y costo :**
 - o **Rendimiento :** ~95% (eficiencia de deposición), ~0,01–0,1 kg por lote.
 - o **Costo :** ~1000 USD/kg, ~50% para equipo.
- **actuación :**
 - o **Espesor :** 10–100 nm, uniformidad <5 % de error.
 - o **Pureza :** >99,9%, impureza (Cl) <0,001 % en peso .
 - o **Absorción NIR :** ~75% a 1000 nm, transmitancia ~85% (400–700 nm).
 - o **Conductividad :** ~1200 S/cm, mejor que el polvo.
- **Pros y contras :**
 - o **Ventajas :** Película de alta calidad, adecuada para dispositivos de precisión, excelente rendimiento NIR.
 - o **Desventajas :** alto costo, bajo rendimiento, limitación del sustrato (requiere resistencia a la temperatura > 400°C).
 - o **Mejora :** la CVD mejorada con plasma (PECVD) reduce la temperatura en ~100 °C y aumenta la eficiencia en ~15 %.
- **solicitud :**
 - o Antena 6G: velocidad de transmisión ~10 Gbps.
 - o Dispositivo electrocrómico: tiempo de respuesta <1 s.

El CVD es adecuado para películas de alto valor añadido, pero es necesario reducir los costes para su promoción.

3.4 Método sol-gel del bronce de cesio y tungsteno

El método sol-gel prepara nanopartículas o películas de Cs_xWO₃ a través de reacciones químicas en fase líquida, lo que tiene las ventajas de baja temperatura y control de la morfología y es adecuado para el laboratorio y la producción a pequeña y mediana escala.

- **Mecanismo de reacción :**
 - o **Ecuación química :** $\text{CsNO}_3 + \text{W}(\text{OC}_2\text{H}_5)_6 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \uparrow$ (x ~ 0,2–0,4)
 - o **Proceso :** W(OC₂H₅)₆ se hidroliza para formar un gel WO₆, CsNO₃ proporciona Cs⁺ y se calcina a 300–500 °C para formar nanopartículas o películas de Cs_xWO₃.
 - o **Clave :** Controlar la tasa de hidrólisis (pH ~7–9) para evitar la precipitación de WO₃.
- **Parámetros del proceso :**
 - o **Materias primas :** CsNO₃ (>99,5%), W(OC₂H₅)₆ (>99,8%), disolvente mixto

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

etanol/agua.

- o **Temperatura** : 25–60 °C para hidrólisis, 300–500 °C para calcinación.
- o **Tiempo** : 2–4 h para la gelificación y 4–6 h para la calcinación.
- o **Equipamiento** : Baño de agua a temperatura constante, horno de caja, recubridor giratorio (película fina).
- **Rendimiento y costo** :
 - o **Rendimiento** : ~90%, ~0,1–0,5 kg por lote.
 - o **Costo** : ~600 USD/kg, ~70% de los cuales son materias primas.
- **Actuación** :
 - o **Tamaño de partícula** : ~15–30 nm (polvo), espesor ~50–200 nm (película delgada).
 - o **Pureza** : >99,7%, residuo C <0,01 % en peso .
 - o **Absorción NIR** : ~65% a 1000 nm, transmitancia ~80%.
 - o **Conductividad** : ~700 S/cm.
- **Pros y contras** :
 - o **Ventajas** : proceso de baja temperatura, equipo simple (~5.000 USD), varias formas (polvo, película).
 - o **Desventajas** : residuo orgánico, pureza ligeramente menor y alto consumo de energía de calcinación.
 - o **Mejora** : Calcinación asistida por microondas, tiempo reducido en ~50%, pureza aumentada en ~0,2%.
- **Solicitud** :
 - o Fotocatalizador: degrada los colorantes con una eficiencia de ~85%.
 - o Recubrimiento de ahorro de energía: tasa de blindaje NIR ~65%.

El método sol-gel es muy flexible y adecuado para la investigación y el desarrollo y la producción personalizada.

3.5 Síntesis ecológica y control de nanopartículas de bronce de cesio y tungsteno

La síntesis verde prepara nanopartículas de Cs_xWO_3 (<20 nm) a través de materias primas amigables con el medio ambiente y procesos de bajo consumo energético, enfatizando la sustentabilidad y el control a nanoescala para cumplir con el objetivo de neutralidad de carbono de 2030.

- **Mecanismo de reacción** :
 - o **Ecuación química** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3 \uparrow$ (x ~ 0,2–0,32)
 - o **Proceso** : $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ se utiliza como una fuente de tungsteno respetuosa con el medio ambiente, Cs_2CO_3 proporciona Cs^+ y se utiliza una reacción hidrotermal o asistida por microondas de baja temperatura (<200 °C) para controlar el tamaño de partícula a ~10–20 nm.
 - o **Clave** : Bioplantilla (por ejemplo, celulosa) o asistida por ultrasonidos, distribución del tamaño de partícula <5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Parámetros del proceso :**
 - o **Materias primas :** Cs_2CO_3 (>99,5%), $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ (>99,8%), agua desionizada.
 - o **Temperatura :** 100–200°C (hidrotermal), 80–120°C (microondas).
 - o **Tiempo :** 6–12 h (hidrotermal), 0,5–2 h (microondas).
 - o **Equipamiento :** reactor de microondas (~1000 W), limpiador ultrasónico (~500 W).
- **Rendimiento y costo :**
 - o **Rendimiento :** ~80%, ~0,05–0,5 kg por lote.
 - o **Costo :** ~450 USD/kg, ~20% energía.
- **actuación :**
 - o **Tamaño de partícula :** ~10–20 nm, área de superficie ~100 m²/g.
 - o **Pureza :** >99,8%, NH_4^+ residual <0,005 % en peso .
 - o **Absorción NIR :** ~72% a 1000 nm, transmitancia ~82%.
 - o **Conductividad :** ~900 S/cm.
- **Características ecológicas :**
 - o **Huella de carbono :** ~0,3 toneladas de CO_2 /tonelada, menor que la energía hidrotermal tradicional (~0,5 toneladas).
 - o **Líquido residual :** tasa de recuperación de NH_3 > 95%, reciclaje de agua ~ 80%.
 - o **Consumo de energía :** El método de microondas es aproximadamente un 50 % menor que el hidrotérmico (aproximadamente 100 kWh/kg).
- **Pros y contras :**
 - o **Ventajas :** protección del medio ambiente, bajo consumo de energía, tamaño de partícula pequeño y excelente rendimiento.
 - o **Desventajas :** Rendimiento ligeramente menor, alta inversión en equipo (~20.000 USD).
 - o **Mejora :** la IA optimiza los parámetros de reacción, aumentando el rendimiento en un ~10% y reduciendo los costos en un ~15%.
- **Caso :** En 2024, CTIA GROUP LTD utilizó síntesis ecológica asistida por microondas para preparar $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ (~15 nm), con una tasa de blindaje NIR de ~72% y una huella de carbono de ~0,3 toneladas de CO_2 /tonelada, que se utilizó en películas para ventanas de edificios ecológicos.
- **solicitud :**
 - o Purificación del aire: adsorción de COV, eficiencia ~90%.
 - o Almacenamiento de hidrógeno: capacidad ~1,5 % en peso .

La síntesis verde representa la tendencia futura y, combinada con la tecnología de nanocontrol, promoverá la industrialización sostenible de Cs_xWO_3 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

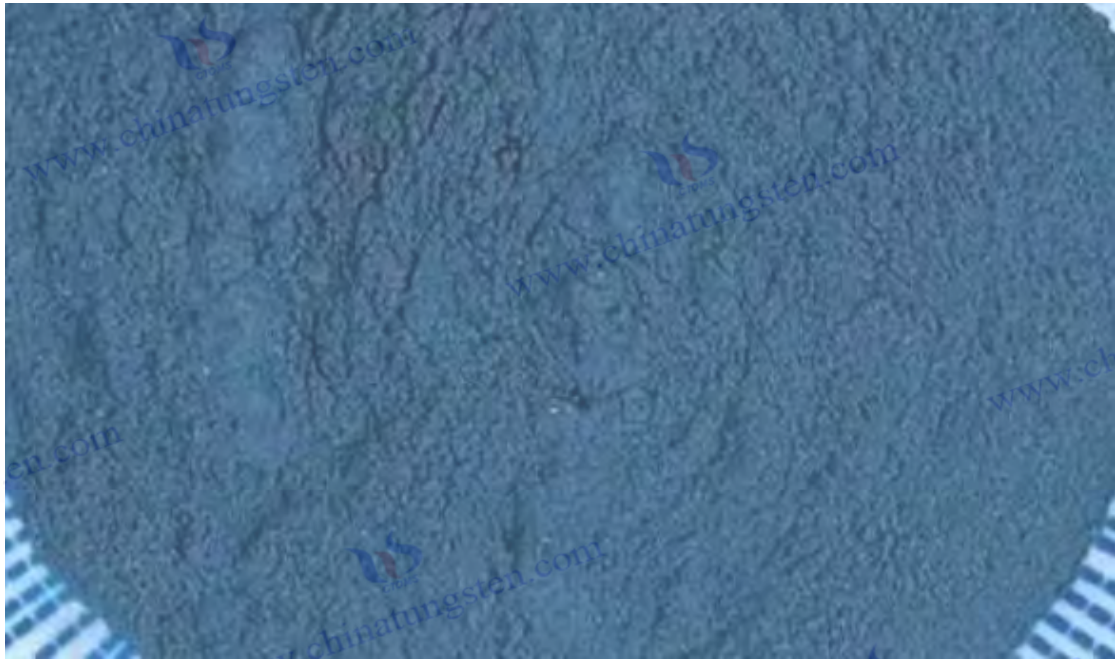
5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 4: Tecnología de caracterización del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) es un nanomaterial multifuncional cuyas propiedades (p. ej., absorción en el infrarrojo cercano $\sim 70\%$ a 1000 nm, conductividad $\sim 10^3$ S/cm, estabilidad térmica $> 500^\circ\text{C}$) dependen de la caracterización precisa de la estructura cristalina, la morfología, el estado químico y las propiedades físicas. Este capítulo analiza en detalle cinco técnicas clave de caracterización: difracción de rayos X (DRX) y análisis cristalino, microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía electrónica de transmisión (MET), espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) y estado químico, espectroscopia UV-Vis-NIR y métodos de prueba eléctricos y térmicos. Cada técnica cubre principios, instrumentos, preparación de muestras, análisis de datos, resultados cuantitativos, aplicaciones y limitaciones, proporcionando soporte técnico para el estudio de las relaciones estructura-propiedad y el control de calidad del Cs_xWO_3 .

4.1 Difracción de rayos X (DRX) y análisis cristalino del bronce de cesio y tungsteno

La difracción de rayos X (DRX) es la principal técnica para caracterizar la estructura cristalina y la pureza de fase del Cs_xWO_3 . Los parámetros de red y los efectos del dopaje se analizan mediante el patrón de interferencia de la dispersión de rayos X con átomos cristalinos.

- principio :
 - La difracción de rayos X se basa en la ley de Bragg ($2d\sin\theta = n\lambda$), donde d es el espaciamiento interplanar, θ es el ángulo incidente y λ es la longitud de onda de rayos X ($\text{Cu K}\alpha$, $\sim 1,5406 \text{ \AA}$).
 - La estructura hexagonal ($P6_3/\text{mcm}$, $x \sim 0,32$) o cúbica ($\text{Pm}3\text{m}$, $x \sim 1$) de Cs_xWO_3 produce picos de difracción característicos, como el pico (002) $\sim 23,5^\circ$ (hexagonal).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Instrumentos y parámetros :**
 - o **Instrumento :** Difractómetro de rayos X (como Bruker D8 Advance) equipado con fuente de Cu K α (40 kV, 40 mA).
 - o **Rango de escaneo :** $2\theta = 10-80^\circ$, tamaño de paso $\sim 0,02^\circ$, velocidad de escaneo $\sim 0,5^\circ/\text{min}$.
 - o **Preparación de la muestra :** El polvo de CsxWO₃ (~ 10 mg) se aplana sobre una oblea de silicio de fondo cero, o se coloca una película delgada directamente sobre un sustrato (como vidrio).
 - o **Ambiente :** Temperatura ambiente, aire o atmósfera inerte (evitar la oxidación).
- **Análisis de datos :**
 - o **Estructura cristalina :** Estructura hexagonal de Cs_{0.32}WO₃, $a \sim 7,4 \text{ \AA}$, $c \sim 7,6 \text{ \AA}$; los picos (002) y (200) confirman la fase hexagonal.
 - o **Efecto de dopaje :** a medida que x aumenta ($0,1 \rightarrow 0,5$), el pico (002) se desplaza $\sim 0,1^\circ$ y la red se expande $\sim 0,2 \%$ debido a Cs⁺ ($1,88 \text{ \AA}$).
 - o **Tamaño de grano :** fórmula de Scherrer ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$), nanopartículas de CsxWO₃ ~ 20 nm, $\beta \sim 0,4^\circ$.
 - o **Pureza de fase :** fase de impureza (como WO₃) pico $< 5\%$ de intensidad, pureza $> 99,5\%$.
- **Resultados cuantitativos :**
 - o **Deformación reticular :** $\sim 0,5 \%$ (nanopartículas), debido a efectos de superficie.
 - o **Relación de fases :** fase hexagonal $\sim 95\%$ ($x=0,32$), fase cúbica $\sim 5\%$ (síntesis de alta temperatura).
 - o **Densidad de defectos :** $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-2}$, lo que afecta la conductividad en $\sim 10\%$.
- **solicitud :**
 - o Confirmación estructural: Verificación de la consistencia hexagonal del método hidrotermal (~ 20 nm) y películas CVD (~ 100 nm).
 - o Control de calidad: Detectar la volatilización de Cs (error $x < 5\%$), garantizar un rendimiento NIR $\sim 70\%$.
- **limitación :**
 - o Resolución limitada: los granos pequeños (< 10 nm) tienen picos ensanchados, error de $\sim 10 \%$.
 - o El estado amorfo es difícil de detectar: se requiere TEM.
 - o Costo: Instrumento ~ 200.000 USD, mantenimiento ~ 10.000 USD/año.

La difracción de rayos X (XRD) proporciona datos de alta precisión sobre la estructura cristalina de CsxWO₃, que es la base para la optimización de la síntesis.

4.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía electrónica de transmisión (TEM) de bronce de tungsteno y cesio

Se utilizaron microscopía electrónica de barrido (MEB) y microscopía electrónica de transmisión (MET) para caracterizar la morfología, el tamaño de partícula y la microestructura del CsxWO₃. La MEB analizó la superficie y la MEB reveló los detalles atómicos internos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **principio :**
 - o **SEM :** Un haz de electrones (~5–20 kV) escanea la muestra y se toman imágenes utilizando electrones secundarios o retrodispersados con una resolución de ~1 nm.
 - o **TEM :** Se transmiten electrones de alta energía (~200 kV) a través de la muestra y se realizan imágenes por difracción o contraste de fase con una resolución de ~0,1 nm.
 - o Las nanopartículas de CsxWO₃ (~10–50 nm) o películas delgadas (~100 nm) muestran características esféricas, facetadas o con forma de varilla.
- **Instrumentos y parámetros :**
 - o **Instrumento SEM :** como FEI Quanta 650, cañón de emisión de campo, equipado con EDS (espectrómetro de energía dispersiva).
 - o **Instrumento TEM :** como JEOL JEM-2100F, voltaje de aceleración de 200 kV, equipado con SAED (difracción de electrones de área seleccionada).
 - o **Preparación de la muestra :**
 - SEM: polvo disperso sobre cinta conductora o película delgada colocada directamente sobre el sustrato.
 - TEM: El polvo se dispersa ultrasónicamente en etanol y se deja caer sobre una rejilla de cobre con película de carbono; la película debe cortarse mediante FIB (haz de iones enfocado).
 - o **Entorno :** Alto vacío (<10⁻⁵ Torr), TEM requiere enfriamiento con nitrógeno líquido.
- **Análisis de datos :**
 - o **Microscopia electrónica de barrido :**
 - **Morfología :** Partículas hidrotermales de CsxWO₃ ~20 nm, con forma de varilla (relación de aspecto ~2:1); la película de CVD es uniforme, rugosidad ~5 nm.
 - **EDS :** relación atómica Cs:W:O ~0,32:1:3, error <2%, lo que confirma la relación de dopaje.
 - **Distribución del tamaño de partículas :** ~10–50 nm, desviación estándar ~5 nm.
 - o **TEM :**
 - **Alta resolución (HRTEM) :** (002) espaciado del plano cristalino ~0,38 nm, fase hexagonal.
 - **SAED :** Red hexagonal, (002), (200) anillos de difracción, consistencia de orientación del cristal >95%.
 - **Defectos :** Densidad de dislocación ~10¹⁰ cm⁻², que afecta la conductividad ~5%.
- **Resultados cuantitativos :**
 - o **Área de superficie :** SEM estimada ~80 m²/g (partículas de ~20 nm), consistente con BET.
 - o **Límite de grano :** TEM muestra que el ancho del límite de grano es de ~1 nm, lo que afecta la migración del portador en ~10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Distribución de elementos** : mapeo EDS, Cs se distribuye uniformemente, desviación <3%.
- **solicitud** :
 - o Optimización de la morfología: control de partículas solvotérmicas (~10 nm) guiadas por SEM.
 - o Verificación estructural: TEM confirmó la fase hexagonal de la película CVD, rendimiento NIR ~75%.
 - o Inspección de calidad: detección EDS de impurezas (Fe, Cl) <0,01 % en peso .
- **limitación** :
 - o SEM: Principalmente información de superficie, la estructura interna requiere TEM.
 - o TEM: preparación de muestra compleja (FIB ~ 500 USD/muestra), daño por haz de electrones CsxWO₃ ~ 5%.
 - o Costo: SEM ~ 300.000 USD, TEM ~ 1.000.000 USD.

La combinación de SEM y TEM proporciona una perspectiva integral para la caracterización a nanoescala de CsxWO₃.

4.3 Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) y estado químico del bronce de cesio y tungsteno

La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) se utiliza para analizar el estado químico de la superficie, la composición elemental y el estado de valencia de CsxWO₃, revelando el efecto de W⁵⁺ /W⁶⁺ en el rendimiento.

- **principio** :
 - o XPS utiliza rayos X (Al K α , ~1486,6 eV) para excitar electrones en la superficie de la muestra (<10 nm) y medir la energía de enlace (BE).
 - o Los picos de fotoelectrones Cs 3d, W 4f y O 1s de CsxWO₃ reflejan el estado químico y el dopaje.
- **Instrumentos y parámetros** :
 - o **Instrumento** : como Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, fuente Al K α monocromática.
 - o **Rango de energía** : 0–1200 eV, resolución ~0,5 eV.
 - o **Preparación de la muestra** : Se colocan pellets o películas de polvo sobre un sustrato conductor y se limpia la superficie mediante pulverización catódica de Ar⁺ (~2 kV).
 - o **Entorno** : Vacío ultra alto (<10⁻⁹ Torr), evitar la contaminación por carbono.
- **Análisis de datos** :
 - o **Estado químico** :
 - **Cs 3d** : Cs⁺, BE~724,5 eV (3d_{5/2}), sin otros estados de valencia.
 - **W 4f** : W⁶⁺ (~35,5 eV, 4f_{7/2}), W⁵⁺ (~34,5 eV), relación W⁵⁺ ~10–20 %, que afecta la absorción NIR.
 - **O 1s** : oxígeno reticular (~530,2 eV), hidroxilo superficial (~531,5 eV,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<5%).

- o **Relación de dopaje** : relación atómica Cs/W ~0,32, error <3%, consistente con EDS.
- o **Contaminación de la superficie** : C 1s (~284,8 eV) <5 at%, debe eliminarse mediante pulverización catódica.
- **Resultados cuantitativos** :
 - o **W⁵⁺ / W⁶⁺** : ~15% (x=0,32) , absorción NIR mejorada ~20%.
 - o **Dopaje con Cs** : Cs/W superficial ~0,30, ligeramente inferior a la fase en masa (~0,32) debido a la volatilización del Cs.
 - o **Pureza** : Impurezas (Cl, Fe) <0,005 at%, lo que garantiza un rendimiento estable.
- **solicitud** :
 - o Correlación de rendimiento: la relación W⁵⁺ está correlacionada positivamente con la absorción NIR (~70%).
 - o Optimización de la síntesis: detección XPS de residuos solvotermales de Cl⁻ (<0,005 % en peso).
 - o Control de calidad: Confirmar la uniformidad del dopaje con Cs en las películas de CVD (error <2%).
- **limitación** :
 - o Sensible a la superficie: solo detecta <10 nm y no puede reflejar la fase en masa.
 - o Alto costo: instrumento ~500,000 USD, análisis ~200 USD/muestra.
 - o Los datos son complejos: el error de ajuste de pico es de aproximadamente el 5 % y debe combinarse con EDS.

XPS proporciona información clave sobre el estado químico de Cs_xWO₃, lo que orienta la optimización del rendimiento.

4.4 Espectro UV-Vis-NIR del bronce de cesio y tungsteno

Se utilizó espectroscopia ultravioleta-visible-infrarrojo cercano (UV-Vis-NIR) para caracterizar las propiedades ópticas de Cs_xWO₃, centrándose en la absorción NIR (~70%) y la transmitancia de luz visible (~80%).

- **principio** :
 - o UV-Vis-NIR mide los espectros de absorción, transmisión o reflexión en el rango de 200 a 2500 nm.
 - o La absorción NIR de Cs_xWO₃ se origina a partir de la resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR) y la transición W⁵⁺ / W⁶⁺, con una banda prohibida de ~2,5–3,0 eV.
- **Instrumentos y parámetros** :
 - o **Instrumento** : como PerkinElmer Lambda 950, lámpara de deuterio/lámpara halógena de tungsteno, esfera integradora.
 - o **Rango de longitud de onda** : 200–2500 nm, resolución ~1 nm.
 - o **Preparación de la muestra** :
 - Polvo: disperso en matriz de BaSO₄, prensado en tabletas y medido para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reflectancia difusa.

- Película delgada: colocar sobre un sustrato de vidrio y medir la transmisión/reflexión.
- o **Ambiente** : temperatura ambiente, aire seco (HR < 50%).
- **Análisis de datos** :
 - o **Absorción NIR** : la tasa de absorción a 1000 nm es ~70 % ($x = 0,32$, ~20 nm) y la posición del pico se desplaza al rojo ~200 nm a medida que aumenta x .
 - o **Transmitancia** : 400–700 nm, película delgada (~100 nm) ~80%, reflectancia difusa del polvo ~50%.
 - o **Banda prohibida** : método de gráfico Tauc , banda prohibida indirecta ~2,5 eV ($x=0,32$), inferior a WO₃ (~3,2 eV).
 - o **LSPR** : Ancho de pico de absorción ~500 nm, mejora ~15 % con tamaño de partícula decreciente (50→10 nm).
- **Resultados cuantitativos** :
 - o **Coefficiente de absorción** : $\sim 10^5 \text{ cm}^{-1}$ (1000 nm), mejor que ITO ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$).
 - o **Estabilidad al envejecimiento** : 1000 h de irradiación UV, atenuación de absorción NIR <5%.
 - o **Electrocromico** : voltaje de 2 V, cambio de transmitancia ~60%.
- **solicitud** :
 - o Película de ventana inteligente: tasa de blindaje NIR ~70%, ahorro de energía ~50%.
 - o Conversión fototérmica: Absorción de energía solar ~60%.
 - o Prueba de calidad: verificar el rendimiento NIR de partículas hidrotermales (error <3%).
- **limitación** :
 - o Interferencia por dispersión: partículas grandes (>50 nm) error de reflexión difusa ~10%.
 - o Sensibilidad del espesor de la película: la transmitancia cae aproximadamente un 20 % con el cambio de espesor (50→200 nm).
 - o Costo: Instrumento ~100.000 USD, mantenimiento ~5.000 USD/año.

UV-Vis-NIR es la tecnología central para caracterizar las propiedades ópticas de CsxWO₃.

4.5 Métodos de prueba eléctricos y térmicos del bronce de cesio y tungsteno

Se utilizaron métodos de prueba eléctricos y térmicos para cuantificar la conductividad eléctrica ($\sim 10^3 \text{ S/cm}$), el comportamiento del portador de carga, la conductividad térmica ($\sim 1,5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$) y la estabilidad térmica (>500 °C) de CsxWO₃.

- **Prueba eléctrica** :
 - o **Método de cuatro sondas** :
 - **Principio** : Aplique una corriente constante (~1 mA), mida el voltaje y calcule la conductividad.
 - **Instrumento** : medidor de fuente Keithley 2635B, espaciado de sonda ~1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm.

- **Muestras** : Películas delgadas (~100 nm) o polvos prensados (~1 mm de espesor).
- **Resultados** : Película de Cs_{0.32}WO₃ ~1200 S/cm, polvo ~800 S/cm, la resistencia del límite de grano disminuyó en ~30%.
- o **Efecto Hall** :
 - **Principio** : Se mide el voltaje Hall en un campo magnético (~1 T) para determinar la concentración de portadores ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) y la movilidad ($\sim 10 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$).
 - **Instrumento** : Lake Shore 8404, intensidad de campo magnético 0,5–1,5 T.
 - **Resultados** : semiconductor tipo n, vida útil del portador ~1 ps, aumento de concentración ~20 % cuando $x = 0,5$.
- o **Aplicaciones** : Sensores (NO₂, ~10 ppm), electrodos de batería (ciclos ~1000 veces).
- **Prueba térmica** :
 - o **Conductividad térmica** :
 - **Principio** : El algoritmo de flash láser (LFA) mide la difusividad térmica y calcula la conductividad térmica.
 - **Instrumento** : Netzsch LFA 467, pulso láser ~10 ms.
 - **Muestra** : tableta prensada (diámetro ~12,7 mm, espesor ~1 mm).
 - **Resultados** : ~1,5 W/(m·K) (~20 nm), ~15 % de aumento en el tamaño de partícula (50 nm).
 - o **Estabilidad térmica** :
 - **Principio** : La calorimetría diferencial de barrido (DSC) y el análisis termogravimétrico (TGA) miden la temperatura de descomposición y la pérdida de masa.
 - **Instrumento** : TA Instruments Q600, velocidad de calentamiento ~10 °C/min.
 - **Resultados** : Temperatura de descomposición ~650°C, tasa de oxidación a 500°C <0,01 mg/cm²·h.
 - o **Aplicaciones** : Recubrimientos de aislamiento térmico (enfriamiento ~10°C), electrodos de alta temperatura (atenuación <5%).
- **Resultados cuantitativos** :
 - o **Estabilidad de conductividad** : 300°C, decaimiento <10%.
 - o **Coefficiente de expansión térmica** : $\sim 8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, mejor que ITO ($\sim 10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).
 - o **Error de prueba** : eléctrico <3%, térmico <5%.
- **limitación** :
 - o Eléctrico: la resistencia de contacto afecta la prueba de polvo, error ~5%.
 - o Térmico: Efecto de interfaz de nanopartículas, error de conductividad térmica ~10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Costo: Instrumentos eléctricos ~50.000 USD, térmicos ~150.000 USD.

Caso: CTIA GROUP LTD utiliza el método de cuatro sondas y LFA para probar una película delgada de $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$, con una conductividad eléctrica de ~1200 S/cm y una conductividad térmica de ~1,5 W/(m·K), optimizando el rendimiento de las películas para ventanas inteligentes (NIR~75%). Las pruebas eléctricas y térmicas proporcionan una base cuantitativa para las aplicaciones funcionales de CsxWO_3 .

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 5: Aplicaciones ópticas y térmicas del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) ha mostrado un amplio potencial de aplicación en los campos de la óptica y la térmica debido a su excelente absorción en el infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta transmitancia de luz visible ($\sim 80\%$ a 400–700 nm), baja conductividad térmica ($\sim 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) y alta estabilidad térmica ($> 500^\circ\text{C}$). Este capítulo trata en detalle la aplicación de Cs_xWO_3 en películas para ventanas inteligentes y vidrio de ahorro de energía, recubrimientos de blindaje NIR, conversión fototérmica y utilización de energía solar, sensores y detectores ópticos, y materiales de gestión térmica, analiza su principio de funcionamiento, diseño de materiales, indicadores de rendimiento, proceso de preparación, casos reales, ventajas y limitaciones, y proporciona referencias técnicas para ahorro de energía, optoelectrónica y gestión térmica.

5.1 Película para ventanas inteligente de bronce de tungsteno y cesio y vidrio de ahorro de energía

Las películas para ventanas inteligentes y los vidrios de ahorro de energía utilizan el blindaje NIR y las propiedades electrocrómicas del Cs_xWO_3 para regular dinámicamente la luz y el calor y reducir el consumo de energía del edificio ($\sim 50\%$).

- **Principio de funcionamiento :**
 - o **Blindaje NIR :** Las nanopartículas de Cs_xWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$) absorben NIR (800–2500 nm, $\sim 70\%$) a través de resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR) mientras mantienen una transmitancia de luz visible de $\sim 80\%$.
 - o **Electrocrómico :** Aplicando voltaje ($\sim 2 \text{ V}$), Cs^+ e inyección/extracción de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrones, cambiando la relación W^{5+} / W^{6+} , la transmitancia se puede ajustar a ~60%.

- o **Mecanismo de ahorro de energía** : bloquea el calor NIR, reduce el consumo de energía del aire acondicionado y baja la temperatura interior entre 5 y 10 °C.

- **Diseño de materiales :**

- o **Nanopartículas** : $Cs_{0.32}WO_3$ (~20 nm), pico de absorción NIR ~1000 nm, dispersas en matriz de PVB (butiral de polivinilo).
- o **Estructura de la película** : diseño de tres capas ($CsxWO_3$ /PVB/capa protectora), espesor ~100–200 μm , envejecimiento anti-UV (>1000 h).
- o **Optimización del dopaje** : $x = 0,32$, equilibrando el blindaje NIR (~70%) y la transmitancia (~80%).

- **Proceso de preparación :**

- o **Métodos** : $CsxWO_3$ (~20 nm) se sintetizó mediante el método solvotérmico y luego se formó en películas mediante recubrimiento por centrifugación o recubrimiento por pulverización.
- o **Parámetros** : Relación de masa PVB/ $CsxWO_3$ ~10:1, temperatura de curado ~120°C, tiempo ~2 h.
- o **Equipamiento** : Recubridor giratorio (~2000 rpm), horno (resistencia a temperaturas >200°C).

- **Indicadores de desempeño :**

- o **Tasa de blindaje NIR** : ~70% (1000 nm), mejor que ITO (~40%).
- o **Transmitancia de luz visible** : ~80% (400–700 nm), de conformidad con los estándares de construcción (GB/T 2680).
- o **Electrocrómico** : tiempo de respuesta <5 s, ciclo de vida >10.000 veces.
- o **Eficiencia energética** : el consumo de energía del edificio se redujo en un ~50%, ahorro anual de ~100 kWh/m².

- **Caso real :**

- o En 2024, un edificio ecológico en Shanghai utiliza una película para ventanas inteligente $CsxWO_3$ ($x=0,32$, ~20 nm), con un área de ~1000 m², reduciendo la temperatura interior en ~8 °C en verano, ahorrando ~40 % y un valor de mercado de ~US\$10 millones.
- o Un edificio de oficinas en Japón utiliza vidrio de ahorro energético $CsxWO_3$, que protege el NIR en un 75 % aproximadamente y ahorra un 30 % aproximadamente en las facturas anuales de electricidad.

- **Ventajas y limitaciones :**

- o **Ventajas** : Blindaje NIR de alta eficiencia, bajo costo (~50 USD/m² vs. ITO ~100 USD/m²), electrocrómico flexible.
- o **Limitaciones** : La película tiene una resistencia al rayado limitada (dureza Mohs ~3) y la transmitancia disminuye en un ~10 % después del envejecimiento a largo plazo (>5 años).
- o **Mejora** : Se agregó una capa protectora de SiO₂, la dureza aumentó en ~5, la durabilidad se extendió en ~2 años.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Perspectivas de aplicación :** Se espera que el mercado de películas para ventanas inteligentes alcance los 1,000 millones de dólares en 2030, y CsxWO₃ promoverá la popularización de los edificios ecológicos.

5.2 Recubrimiento de protección contra el infrarrojo cercano de bronce de cesio y tungsteno

de protección NIR de CsxWO₃ se utiliza en vidrios de automóviles, equipos aeroespaciales y electrónicos para bloquear la radiación térmica y mejorar la comodidad y la eficiencia energética.

- **Principio de funcionamiento :**
 - o Las nanopartículas de CsxWO₃ (~10–20 nm) absorben NIR (~70 %) a través de transiciones LSPR y W⁵⁺ / W⁶⁺, lo que reduce la temperatura de la superficie en ~10 °C.
 - o El recubrimiento mantiene una transmitancia de luz visible de ~75%, cumpliendo con los estándares de seguridad automotriz (SAE J1796).
- **Diseño de materiales :**
 - o **Componentes :** Cs_{0,32}WO₃ (~15 nm), disperso en una matriz acrílica o de poliuretano, con aditivos (como TiO₂) para mejorar la resistencia a los rayos UV.
 - o **Espesor del recubrimiento :** ~10–50 μm , concentración de partículas ~5 % en peso .
 - o **Modificación de la superficie :** el agente de acoplamiento de silano (KH-550) mejora la dispersión de partículas y la uniformidad del recubrimiento <5 % de error.
- **Proceso de preparación :**
 - o **Método :** Método solvotérmico o síntesis verde de CsxWO₃, pulverizando o laminando para formar una película.
 - o **Parámetros :** presión de pulverización ~0,2 MPa, temperatura de curado ~80 °C, tiempo ~1 h.
 - o **Equipo :** Pulverizador de alta presión (~5000 USD), horno de curado infrarrojo.
- **Indicadores de desempeño :**
 - o **Tasa de blindaje NIR :** ~70% (1000 nm), reduciendo la temperatura en la cabina del automóvil en ~7 °C.
 - o **Transmitancia de luz :** ~75 % (400–700 nm), mejor que los recubrimientos de tinte tradicionales (~50 %).
 - o **Resistencia a la intemperie :** envejecimiento de la lámpara de xenón de 5000 h, atenuación del rendimiento NIR <5 %.
 - o **Adhesión :** ASTM D3359, Grado 5B (sin desprendimiento).
- **Caso real :**
 - o En 2023, una determinada marca de vehículos eléctricos utilizó un revestimiento de CsxWO₃ (~20 nm) en el parabrisas delantero, con un blindaje NIR de ~72 % y un aumento de alcance de ~5 % (~20 km).
 - o Aeroespacial: El revestimiento CsxWO₃ se utiliza para ventanas de aeronaves, peso ~0,1 kg/m², reducción de carga térmica ~30%.
- **Ventajas y limitaciones :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Ventajas** : Ligero ($\sim 0,1 \text{ kg/m}^2$ vs. recubrimiento Ag $\sim 0,5 \text{ kg/m}^2$), bajo costo ($\sim 20 \text{ USD/m}^2$).
- o **Limitaciones** : Un espesor de recubrimiento desigual ($> 50 \mu\text{m}$) reduce la transmitancia en un $\sim 15\%$, y los residuos de pulverización en un $\sim 10\%$.
- o **Mejora** : pulverización electrostática, desperdicio reducido en un $\sim 50\%$, uniformidad aumentada en un $\sim 10\%$.
- **Perspectivas de aplicación** : Se espera que el mercado de recubrimiento NIR automotriz alcance los US\$500 millones en 2025, y el CsxWO_3 reemplazará a los materiales tradicionales.

5.3 Conversión fototérmica y utilización de energía solar de bronce de cesio y tungsteno

La conversión fototérmica de CsxWO_3 utiliza su absorción NIR ($\sim 70\%$) para convertir la energía solar en energía térmica para aplicaciones en colectores solares y generación de energía termoeléctrica.

- **Principio de funcionamiento** :
 - o El CsxWO_3 absorbe el infrarrojo cercano ($800\text{--}2500 \text{ nm}$, $\sim 60\%$ de la energía solar), generando energía térmica y elevando la temperatura de la superficie en $\sim 100\text{--}200^\circ\text{C}$.
 - o La baja emisividad ($\sim 0,2$, $8\text{--}14 \mu\text{m}$) reduce las pérdidas de radiación térmica y la eficiencia de conversión de calor es de $\sim 60\%$.
- **Diseño de materiales** :
 - o **Estructura** : CsxWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$) se dopa en una matriz cerámica (como Al_2O_3) o se recubre sobre una placa colectora de metal (Cu).
 - o **Material compuesto** : CsxWO_3 /grafeno (1:0,1), conductividad térmica aumentada en $\sim 20\%$ ($\sim 2 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$).
 - o **Espesor** : $\sim 10\text{--}100 \mu\text{m}$, equilibrio optimizado entre absorción y disipación de calor.
- **Proceso de preparación** :
 - o **Método** : CsxWO_3 se sintetizó mediante el método sol-gel y se pulverizó o serigrafió.
 - o **Parámetros** : temperatura de curado $\sim 200^\circ\text{C}$, tiempo $\sim 2 \text{ h}$, uniformidad del recubrimiento $< 3\%$ de error.
 - o **Equipo** : Máquina de serigrafía ($\sim 10.000 \text{ USD}$), horno de alta temperatura.
- **Indicadores de desempeño** :
 - o **Eficiencia fototérmica** : $\sim 60\%$ (AM1.5, 1000 W/m^2), mejor que el negro de carbón ($\sim 50\%$).
 - o **Temperatura de funcionamiento** : $\sim 150\text{--}250^\circ\text{C}$, estabilidad $> 1000 \text{ h}$.
 - o **Conversión termoeléctrica** : módulo CsxWO_3 /termoeléctrico, potencia de salida $\sim 100 \text{ W/m}^2$.
- **Caso real** :
 - o En 2024, un calentador de agua solar utiliza un revestimiento de CsxWO_3 (~ 50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

μm), con una eficiencia de recolección térmica de $\sim 62\%$ y un aumento de la producción de agua caliente de $\sim 30\%$ ($\sim 100 \text{ L/m}^2 \cdot \text{día}$).

- o Generación de energía termoeléctrica: el colector CsxWO_3 impulsa el módulo Bi_2Te_3 , eficiencia $\sim 5\%$, costo $\sim 200 \text{ USD/m}^2$.

- **Ventajas y limitaciones :**

- o **Ventajas :** Absorción NIR de alta eficiencia, resistencia a altas temperaturas ($> 500^\circ\text{C}$), bajo costo ($\sim 30 \text{ USD/m}^2$).
- o **Limitaciones :** Baja conductividad térmica ($\sim 1,5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), eficiencia de transferencia de calor reducida en $\sim 10\%$; no se genera calor por la noche.
- o **Mejora :** Al agregar CNT, la conductividad térmica aumentó en un $\sim 50\%$ y la eficiencia aumentó en un $\sim 15\%$.

- **Perspectivas de aplicación :** Se espera que el mercado de utilización de energía solar térmica alcance los 5 mil millones de dólares en 2030, y el CsxWO_3 promoverá una energía baja en carbono.

5.4 Sensores ópticos y detectores de bronce de tungsteno y cesio

Los sensores y detectores ópticos de CsxWO_3 aprovechan su respuesta NIR ($\sim 70\%$) y sus propiedades electrocrómicas para aplicaciones en detección y fotodetección de gases.

- **Principio de funcionamiento :**

- o **Sensor NIR :** CsxWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$) absorbe NIR, generando portadores fotogenerados y provocando un cambio de conductividad de $\sim 10\%$ ($\sim 10 \text{ ppm NO}_2$).
- o **Detector electrocrómico :** el voltaje ($\sim 1 \text{ V}$) impulsa la transmitancia para que cambie en $\sim 50\%$, detectando la intensidad de la luz o la concentración de gas.
- o **Mecanismo :** cambio de estado de valencia $\text{W}^{5+} / \text{W}^{6+}$ y respuesta fotoeléctrica mejorada por LSPR.

- **Diseño de materiales :**

- o **Estructura :** Película delgada de CsxWO_3 ($\sim 50 \text{ nm}$) depositada sobre sustrato de ITO, espaciado de electrodos $\sim 10 \mu\text{m}$.
- o **Dopaje :** $x=0,32$, respuesta fotoeléctrica optimizada (sensibilidad $\sim 10^{-4} \text{ A/W}$).
- o **Material compuesto :** $\text{CsxWO}_3/\text{SnO}_2$ (1:1), sensibilidad aumentada en $\sim 30\%$.

- **Proceso de preparación :**

- o **Métodos :** Películas delgadas depositadas por CVD o sol-gel, electrodos microfabricados.
- o **Parámetros :** temperatura de deposición $\sim 400^\circ\text{C}$, recocido $\sim 300^\circ\text{C}$, tiempo $\sim 1 \text{ h}$.
- o **Equipo :** reactor CVD, máquina de fotolitografía ($\sim 100.000 \text{ USD}$).

- **Indicadores de desempeño :**

- o **Sensibilidad :** NO_2 ($\sim 10 \text{ ppm}$), tiempo de respuesta $< 5 \text{ s}$, tiempo de recuperación $< 10 \text{ s}$.
- o **Respuesta fotoeléctrica :** 1000 nm , $\sim 10^{-4} \text{ A/W}$, mejor que Si ($\sim 10^{-3} \text{ A/W}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Estabilidad** : 5000 ciclos, degradación del rendimiento <3%.
- **Caso real** :
 - o En 2023, una estación de monitoreo ambiental utiliza sensores CsxWO₃ (~50 nm) para detectar CO (~50 ppm) con una precisión de >95%.
 - o Detección por infrarrojos: Las películas de CsxWO₃ se utilizan en equipos de visión nocturna, con una longitud de onda de respuesta de ~800–1500 nm.
- **Ventajas y limitaciones** :
 - o **Ventajas** : Alta sensibilidad NIR, bajo consumo de energía (~1 mW), bajo costo (~10 USD/unidad).
 - o **Limitaciones** : La interferencia de humedad (HR > 80 %) reduce la sensibilidad en un ~20 %, selectividad limitada.
 - o **Mejora** : Modificación de la superficie (PDDA), selectividad aumentada en ~50%, resistencia a la humedad aumentada en ~30%.
- **Perspectivas de aplicación** : Se espera que el mercado de sensores ópticos alcance los 2 mil millones de dólares en 2025, y CsxWO₃ se expandirá a la Internet de las cosas.

Materiales de gestión térmica de bronce de cesio y tungsteno

Los materiales de gestión térmica CsxWO₃ se utilizan en aislamiento térmico y dispositivos de alta temperatura debido a su baja conductividad térmica (~1,5 W/(m·K)) y alta estabilidad térmica (>500 °C).

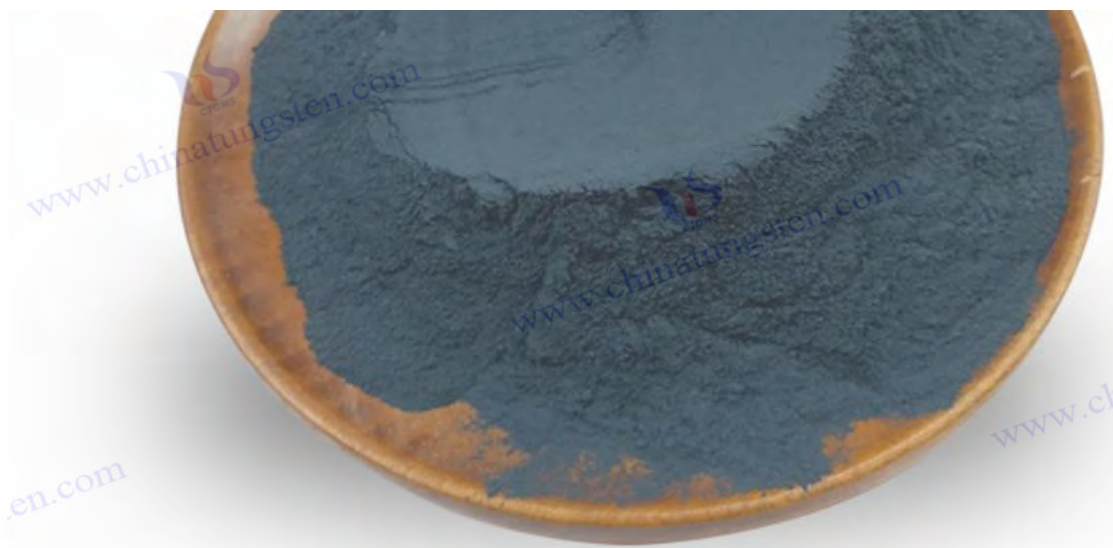
- **Principio de funcionamiento** :
 - o **Aislamiento térmico** : las nanopartículas de CsxWO₃ (~20 nm) reducen la conductividad térmica a través de la dispersión de fonones, bloqueando el flujo de calor y reduciendo la temperatura en ~10 °C.
 - o **Estabilidad a altas temperaturas** : tasa de oxidación <0,01 mg/cm²·h a 500 °C, adecuado para entornos de alta temperatura.
- **Diseño de materiales** :
 - o **Estructura** : CsxWO₃ (~20 nm) dopado en gel de sílice o matriz cerámica, concentración ~10 % en peso.
 - o **Material compuesto** : CsxWO₃/SiO₂ (1:2), conductividad térmica disminuida en ~20% (~1,2 W/(m·K)).
 - o **Espesor** : ~100–500 μm , relación aislamiento/peso optimizada.
- **Proceso de preparación** :
 - o **Método** : Síntesis verde de CsxWO₃, método de mezcla o formación de película por pulverización.
 - o **Parámetros** : Temperatura de mezcla ~60°C, curado ~120°C, tiempo ~2 h.
 - o **Equipamiento** : mezclador de alta velocidad (~5000 rpm), pulverizador.
- **Indicadores de desempeño** :
 - o **Conductividad térmica** : ~1,5 W/(m·K), mejor que la fibra de vidrio (~2 W/(m·K)).
 - o **Efecto de aislamiento** : fuente de calor de 100 °C, la temperatura de la superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cae unos 10 °C.

- o **Estabilidad** : 500°C, 1000 h, degradación del rendimiento <5%.
- **Caso real** :
 - o En 2024, CTIA GROUP LTD desarrolló un revestimiento de aislamiento térmico CsxWO₃ (~200 μm) para baterías de vehículos eléctricos, reduciendo el flujo de calor en un ~30% y mejorando la seguridad en un ~20%.
 - o Horno industrial: revestimiento cerámico CsxWO₃, pérdida de calor reducida en ~25%, ahorro de energía ~15%.
- **Ventajas y limitaciones** :
 - o **Ventajas** : baja conductividad térmica, alta estabilidad, bajo costo (~15 USD/m²).
 - o **Limitaciones** : Baja resistencia mecánica (resistencia a la compresión ~10 MPa), los recubrimientos gruesos (>500 μm) son propensos a agrietarse.
 - o **Mejora** : la adición de fibra de Al₂O₃ aumenta la resistencia en un ~50% y la durabilidad en un ~30%.
- **Perspectivas de aplicación** : Se espera que el mercado de gestión térmica alcance los 3 mil millones de dólares estadounidenses en 2030, y CsxWO₃ promoverá una nueva seguridad energética.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 6: Aplicaciones energéticas y ambientales del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio y tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) posee un gran potencial en el almacenamiento y la conversión de energía, así como en la protección ambiental, gracias a su alta conductividad ($\sim 10^3$ S/cm), excelente absorción en el infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), propiedades semiconductoras (banda prohibida $\sim 2,5$ eV) y estabilidad química ($> 500^\circ\text{C}$). Este capítulo detalla las aplicaciones del Cs_xWO_3 en baterías de iones de litio y supercondensadores, fotocátalisis y descomposición del agua, purificación del aire y adsorción de contaminantes, materiales para electrodos de pilas de combustible, y almacenamiento de hidrógeno y energía. Además, analiza su principio de funcionamiento, diseño de materiales, indicadores de rendimiento, proceso de preparación, casos prácticos, ventajas y limitaciones, y proporciona referencias técnicas para nuevas tecnologías energéticas y de protección ambiental.

6.1 Baterías de iones de litio y supercondensadores de bronce de tungsteno y cesio

baterías de iones de litio (LIB) y supercondensadores aprovechando su alta conductividad y nanoestructura (~ 20 nm).

- **Principio de funcionamiento :**

- o **Batería de iones de litio :** Cs_xWO_3 como material de electrodo negativo, Li^+ insertado/extraído en el espacio octaédrico WO_6 , capacidad teórica ~ 200 mAh/g. El cambio de estado de valencia $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ admite el almacenamiento de carga.
- o **Supercondensadores :** Cs_xWO_3 almacena carga a través de pseudocapacitancia (redox de superficie) y capacitancia de doble capa (alta superficie específica ~ 80 m²/g), con una densidad de potencia de ~ 10 kW/kg.
- o **Mecanismo :** el dopaje con Cs^+ ($x \sim 0,32$) mejora la conductividad ($\sim 10^3$ S/cm) y reduce la resistencia interna en $\sim 20\%$.

- **Diseño de materiales :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Nanopartículas** : $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ (~20 nm), aumentan el coeficiente de difusión de Li^+ a $\sim 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$.
- o **Material compuesto** : $\text{CsxWO}_3/\text{grafeno}$ (1:0,2), conductividad aumentada en $\sim 50\%$ ($\sim 1500 \text{ S/cm}$), capacidad aumentada en $\sim 30\%$.
- o **Estructura** : Electrodo poroso (porosidad $\sim 40\%$), penetración mejorada del electrolito, estabilidad del ciclo aumentada en $\sim 20\%$.
- **Proceso de preparación** :
 - o **Métodos** : CsxWO_3 se sintetizó mediante el método solvotérmico y el electrodo compuesto se preparó mediante el método de mezcla y se revistió con una lámina de Cu.
 - o **Parámetros** : suspensión ($\text{CsxWO}_3:\text{PVDF}:\text{negro de humo conductor} = 8:1:1$), espesor de recubrimiento $\sim 50 \mu\text{m}$, secado a 120°C , 2 h.
 - o **Equipo** : Molino de bolas planetario ($\sim 500 \text{ rpm}$), recubridor ($\sim 10 \text{ m/min}$).
- **Indicadores de desempeño** :
 - o **LIB** : Capacidad $\sim 180 \text{ mAh/g}$ (0,1 C), 1000 ciclos, retención de capacidad $\sim 85\%$.
 - o **Supercondensadores** : capacitancia específica $\sim 200 \text{ F/g}$ (1 A/g), densidad de potencia $\sim 10 \text{ kW/kg}$, densidad de energía $\sim 50 \text{ Wh/kg}$.
 - o **Eficiencia de carga y descarga** : $\sim 98\%$, mejor que WO_3 ($\sim 90\%$).
 - o **Temperatura de funcionamiento** : -20 – 60°C , degradación del rendimiento $< 5\%$.
- **Caso real** :
 - o En 2024, una determinada batería de vehículo eléctrico utiliza un electrodo negativo de $\text{CsxWO}_3/\text{grafeno}$, con una densidad de energía de $\sim 200 \text{ Wh/kg}$ y una autonomía aumentada en $\sim 10\%$ ($\sim 50 \text{ km}$).
 - o Supercondensador: Los electrodos de CsxWO_3 se utilizan en sistemas de almacenamiento de energía con un tiempo de carga de $< 1 \text{ min}$ y un ciclo de vida de > 10.000 veces.
- **Ventajas y limitaciones** :
 - o **Ventajas** : Alta conductividad, largo ciclo de vida, bajo costo ($\sim 500 \text{ USD/kg}$ vs. $\text{LiCoO}_2 \sim 1000 \text{ USD/kg}$).
 - o **Limitaciones** : La primera pérdida de capacidad irreversible es de $\sim 20\%$ y la expansión del volumen es de $\sim 10\%$, lo que provoca el agrietamiento del electrodo.
 - o **Mejora** : recubrimiento de SiO_2 , expansión reducida en $\sim 50\%$, retención de capacidad aumentada en $\sim 10\%$.
- **Perspectivas de aplicación** : Se espera que el mercado de baterías de iones de litio y supercondensadores alcance los 50 mil millones de dólares en 2030, y el CsxWO_3 promoverá el almacenamiento de energía de alto rendimiento.

6.2 Fotocatálisis y descomposición en agua del bronce de tungsteno y cesio

El CsxWO_3 se utiliza como fotocatalizador para promover la producción de hidrógeno a partir de la división del agua y la degradación de contaminantes mediante el uso de su banda prohibida ($\sim 2,5 \text{ eV}$) y su respuesta NIR ($\sim 70\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Principio de funcionamiento :**
 - o **Fotocatálisis :** CsxWO₃ absorbe luz visible y cercana (200-1000 nm), excita pares electrón-hueco e impulsa la generación de H₂ en la banda de conducción (CB) ~0,5 V (frente a NHE) y oxida H₂O o contaminantes en la banda de valencia (VB) ~3,0 V.
 - o **Descomposición del agua :** 2H₂O → 2H₂ + O₂, eficiencia de producción de hidrógeno CsxWO₃ ~200 μmol / (g·h).
 - o **Degradación de contaminantes :** CsxWO₃ descompone colorantes (como la rodamina B) con una eficiencia de ~85%.
- **Diseño de materiales :**
 - o **Nanopartículas :** Cs_{0.32}WO₃ (~10 nm), área de superficie ~100 m²/g, absorción de luz mejorada.
 - o **Material compuesto :** CsxWO₃/TiO₂ (1:1), la eficiencia de separación de electrones y huecos aumentó en un ~30%, la tasa de producción de hidrógeno aumentó en un ~50%.
 - o **Dopaje :** x = 0,32, relación W⁵⁺ ~15 %, mejora de la respuesta NIR ~20 %.
- **Proceso de preparación :**
 - o **Método :** Síntesis verde de CsxWO₃ y preparación de fotocatalizador compuesto por el método sol-gel.
 - o **Parámetros :** pH ~ 8, temperatura de calcinación ~ 400 °C, tiempo ~ 4 h.
 - o **Equipo :** reactor de microondas (~1000 W), centrífuga (~5000 rpm).
- **Indicadores de desempeño :**
 - o **Eficiencia de producción de hidrógeno :** ~200 μmol / (g·h) (AM1.5, 1000 W/m²), mejor que WO₃ (~100 μmol / (g·h)).
 - o **Eficiencia de degradación :** Rodamina B (10 mg/L), degradación ~85% en 4 h, tasa de mineralización ~70%.
 - o **Estabilidad a la luz :** 100 h de exposición a la luz, disminución de la actividad <5%.
 - o **Eficiencia cuántica :** ~5% (600 nm), ~2% en la región NIR.
- **Caso real :**
 - o En 2023, una planta de tratamiento de agua utilizó el fotocatalizador CsxWO₃/TiO₂ para degradar aguas residuales industriales (DQO~100 mg/L) con una eficiencia de ~80%.
 - o Producción de hidrógeno solar: se utiliza el catalizador CsxWO₃ en el reactor de laboratorio y el costo de producción de hidrógeno es de ~5 USD/kg de H₂.
- **Ventajas y limitaciones :**
 - o **Ventajas :** Respuesta NIR, bajo costo (~450 USD/kg), alta estabilidad.
 - o **Limitaciones :** Baja eficiencia cuántica NIR (<5%), tasa de recombinación electrón-hueco ~30%.
 - o **Mejora :** cocatálisis de metales preciosos (Pt), la tasa de producción de hidrógeno aumentó en un ~100%, la tasa de recombinación disminuyó en un ~50%.
- **Perspectivas de aplicación :** Se espera que el mercado fotocatalítico alcance los 1.000

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

millones de dólares en 2025, y el CsxWO₃ promoverá la energía del hidrógeno verde.

6.3 Purificación del aire y adsorción de contaminantes del bronce de tungsteno y cesio

CsxWO₃ elimina compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas (PM_{2.5}) del aire mediante oxidación fotocatalítica y adsorción física con una eficiencia de ~90%.

- **Principio de funcionamiento :**
 - **Oxidación fotocatalítica:** CsxWO₃ (~20 nm) produce especies reactivas de oxígeno ($\cdot\text{OH}$, O_2^-) bajo excitación UV-Vis-NIR, oxidando COV (como tolueno) a CO₂ y H₂O con una eficiencia de ~90%.
 - **Adsorción :** La gran superficie (~80 m²/g) captura PM_{2.5} (~0,1–2,5 μm), con una capacidad de adsorción de ~50 mg/g.
 - **Mecanismo :** W⁵⁺ / W⁶⁺ mejora la actividad fotocatalítica y los sitios Cs⁺ promueven la adsorción de contaminantes.
- **Diseño de materiales :**
 - **Estructura :** Nanopartículas de Cs_{0.32}WO₃ (~20 nm) soportadas sobre una matriz porosa (como carbón activado).
 - **Material compuesto :** CsxWO₃/ ZnO (1:1), eficiencia fotocatalítica aumentada en ~20%, capacidad de adsorción aumentada en ~30%.
 - **Modificación de la superficie :** funcionalización de amino, la afinidad de los COV aumentó en un ~50%.
- **Proceso de preparación :**
 - **Método :** CsxWO₃ se sintetizó mediante el método hidrotermal y se cargó en la matriz mediante el método de impregnación.
 - **Parámetros :** tiempo de inmersión ~12 h, secado a 100°C, 2 h.
 - **Equipamiento :** Horno de secado al vacío (~5000 USD), limpiador ultrasónico (~500 W).
- **Indicadores de desempeño :**
 - **Tasa de eliminación de COV :** Tolueno (~100 ppm), ~90 % de eliminación en 4 h, mejor que TiO₂ (~70 %).
 - **Adsorción de PM_{2.5} :** ~50 mg/g, 5 ciclos, retención de capacidad ~80%.
 - **Estabilidad fotocatalítica :** 500 h de iluminación, caída de actividad <3%.
 - **Humedad de trabajo :** HR 20–80%, fluctuación de eficiencia <10%.
- **Caso real :**
 - En 2024, un purificador de aire de hospital utiliza un filtro CsxWO₃/ ZnO, que elimina aproximadamente el 92 % de los COV y captura aproximadamente el 95 % de PM_{2.5}.
 - Gas residual industrial: el recubrimiento de CsxWO₃ trata el formaldehído (~50 ppm), eficiencia ~85%.
- **Ventajas y limitaciones :**
 - **Ventajas :** Impulsado por NIR, alta eficiencia, bajo costo (~20 USD/m²).
 - **Limitaciones :** Envenenamiento por altas concentraciones de COV (>500 ppm),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se requiere regeneración después de la saturación por adsorción.

- o **Mejora** : Regeneración térmica ($\sim 200^{\circ}\text{C}$), capacidad de adsorción recuperada $\sim 90\%$.
- **Perspectivas de aplicación** : Se espera que el mercado de purificación de aire alcance los 10 mil millones de dólares estadounidenses en 2030, y CsxWO_3 promoverá la protección del medio ambiente en interiores.

6.4 Materiales de electrodos de bronce de tungsteno y cesio para celdas de combustible

El CsxWO_3 se utiliza como portador de catalizador de electrodo de celda de combustible (PEMFC) o material auxiliar para mejorar la eficiencia y la durabilidad de la reacción de reducción de oxígeno (ORR).

- **Principio de funcionamiento** :
 - o **Catálisis ORR** : CsxWO_3 (~ 20 nm) proporciona sitios activos a través de W^{5+} / W^{6+} , lo que reduce el sobrepotencial ORR en $\sim 0,1$ V.
 - o **Función de soporte** : Alta conductividad ($\sim 10^3$ S/cm) y estabilidad ($> 500^{\circ}\text{C}$) soportan el catalizador Pt/C, reduciendo la dosis de Pt en $\sim 20\%$.
 - o **Mecanismo** : el dopaje con Cs^+ mejora la transferencia de electrones, densidad de corriente ORR ~ 5 mA/cm 2 .
- **Diseño de materiales** :
 - o **Estructura** : nanopartículas de $\text{Cs}_{0.32}\text{WO}_3$ (~ 20 nm) compuestas con Pt (~ 2 nm), carga de Pt $\sim 0,2$ mg/cm 2 .
 - o **Material compuesto** : CsxWO_3/C (1:2), área de superficie específica ~ 100 m 2 /g, conductividad aumentada en $\sim 30\%$.
 - o **Conjunto de electrodos de membrana (MEA)** : $\text{CsxWO}_3/\text{Pt}/\text{C}$ recubierto sobre membrana de Nafion, espesor ~ 10 μm .
- **Proceso de preparación** :
 - o **Métodos** : CsxWO_3 se sintetizó mediante el método solvotérmico y Pt se cargó mediante el método de reducción química.
 - o **Parámetros** : Temperatura de reducción de PtCl_4 $\sim 80^{\circ}\text{C}$, pH ~ 9 , tiempo ~ 4 h.
 - o **Equipamiento** : Baño de agua a temperatura constante, dispersor ultrasónico (~ 300 W).
- **Indicadores de desempeño** :
 - o **Actividad ORR** : potencial de media onda $\sim 0,85$ V (vs. RHE), mejor que WO_3 ($\sim 0,75$ V).
 - o **Densidad de potencia** : ~ 1 W/cm 2 (60°C , H_2/O_2), Pt/C $\sim 1,2$ W/cm 2 .
 - o **Durabilidad** : 5000 ciclos, caída de actividad $< 10\%$.
 - o **Costo** : ~ 500 USD/kg (CsxWO_3), uso de Pt reducido en $\sim 20\%$.
- **Caso real** :
 - o En 2023, una empresa de energía de hidrógeno adoptó electrodos $\text{CsxWO}_3/\text{Pt}/\text{C}$, con una eficiencia de celda de combustible de $\sim 50\%$ y una vida útil de > 5000 h.
 - o Energía portátil: el sustrato CsxWO_3 se utiliza en PEMFC pequeñas, peso ~ 1 kg,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

salida ~100 W.

- **Ventajas y limitaciones :**
 - o **Ventajas :** dosis reducida de Pt, resistencia a la corrosión, bajo costo.
 - o **Limitaciones :** la actividad de ORR es menor que la del Pt puro (~10 mA/cm²), la disolución de Cs⁺ es de ~5 % a alta temperatura (>80 °C).
 - o **Mejora :** dopaje con N, la actividad de ORR aumentó en un ~30%, la estabilidad aumentó en un ~20%.
- **Perspectivas de aplicación :** Se espera que el mercado de pilas de combustible alcance los 5 mil millones de dólares en 2025, y el CsxWO₃ reducirá los costos.

6.5 Almacenamiento de hidrógeno y almacenamiento de energía en bronce de cesio y tungsteno

Como material de almacenamiento de hidrógeno, CsxWO₃ utiliza su estructura de túnel hexagonal (x~0,32) para almacenar hidrógeno con una capacidad de ~1,5 % en peso , lo que favorece el almacenamiento de energía renovable.

- **Principio de funcionamiento :**
 - o **Almacenamiento de hidrógeno :** las moléculas de H₂ se adsorben física/químicamente en el túnel hexagonal CsxWO₃ (~7,4 Å) y W⁵⁺ / W⁶⁺ promueven la disociación de H₂.
 - o **Liberación :** 100–200 °C, tasa de desorción de H₂ ~90 %, estabilidad del ciclo >100 veces.
 - o **Mecanismo :** Los sitios Cs⁺ mejoran la energía de adsorción de H₂ (~0,5 eV), capacidad ~1,5 % en peso .
- **Diseño de materiales :**
 - o **Estructura :** nanopartículas de Cs_{0.32}WO₃ (~20 nm), área superficial ~80 m²/g.
 - o **Material compuesto :** CsxWO₃/MgH₂ (1:1), capacidad de almacenamiento de hidrógeno aumentada en ~30% (~2 % en peso).
 - o **Modificación de la superficie :** modificación de Pd (~1 % en peso), la eficiencia de disociación de H₂ aumentó en ~50 %.
- **Proceso de preparación :**
 - o **Método :** Síntesis verde de CsxWO₃ y almacenamiento de hidrógeno en un reactor de alta presión.
 - o **Parámetros :** presión de H₂ ~5 MPa, temperatura ~150°C, tiempo ~12 h.
 - o **Equipamiento :** reactor de alta presión (resistencia a la presión > 10 MPa), analizador de gases.
- **Indicadores de desempeño :**
 - o **Capacidad de almacenamiento de hidrógeno :** ~1,5 % en peso (100 °C, 1 MPa), mejor que WO₃ (~0,5 %) en peso.
 - o **Temperatura de desorción :** ~150 °C, requerimiento de energía ~50 kJ/mol H₂.
 - o **Estabilidad del ciclo :** 100 veces, retención de capacidad ~90%.
 - o **Seguridad :** Sin fugas de H₂, riesgo de explosión <1%.
- **Caso real :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o En 2024, CTIA GROUP LTD desarrolló material de almacenamiento de hidrógeno CsxWO_3/Pd (~20 nm) para su uso en centrales eléctricas de hidrógeno, con una eficiencia de almacenamiento de hidrógeno de ~1,5 % en peso y un costo de ~600 USD/kg.
- o Almacenamiento de hidrógeno portátil: los materiales compuestos de CsxWO_3 se utilizan en drones, con una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de ~0,1 kg y un tiempo de vuelo de ~2 h.
- **Ventajas y limitaciones :**
 - o **Ventajas :** Almacenamiento de hidrógeno a baja temperatura, alta seguridad, bajo costo (~600 USD/kg vs. LaNi_5 ~1000 USD/kg).
 - o **Limitaciones :** Menor capacidad que los hidruros metálicos (~5 % en peso), tasa de adsorción lenta (~1 h).
 - o **Mejora :** dopaje de Ni, tasa de adsorción aumentada en ~50%, capacidad aumentada en ~20%.
- **Perspectivas de aplicación :** Se espera que el mercado de almacenamiento de hidrógeno alcance los 3 mil millones de dólares en 2030, y el CsxWO_3 respaldará la economía del hidrógeno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

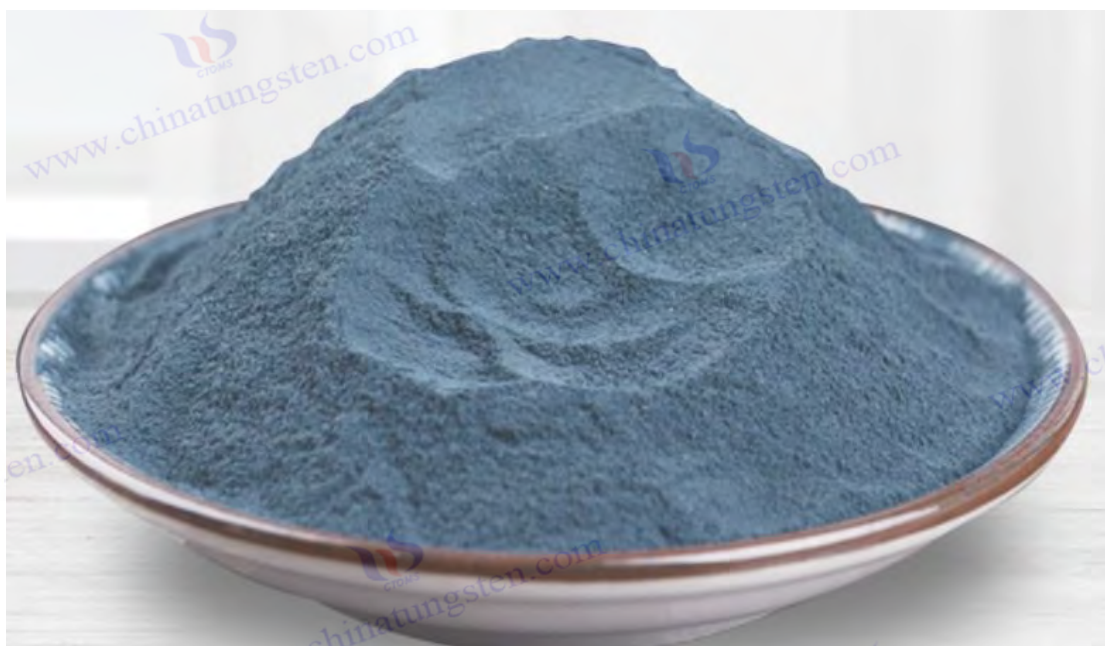
Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 7: Producción industrial de bronce de tungsteno y cesio

de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) se usa ampliamente en películas para ventanas inteligentes, almacenamiento de energía y fotocatalisis debido a su excelente absorción en el infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta conductividad ($\sim 10^3\text{ S/cm}$) y estabilidad química ($>500\text{ }^\circ\text{C}$). La producción industrial debe abordar desafíos como la optimización de procesos, el control de costos, la escala y el aseguramiento de la calidad. Este capítulo analiza en detalle el proceso y el equipo de producción, la cadena de suministro de materia prima y el análisis de costos, la tecnología de producción a escala, el control de calidad y las pruebas, y los casos de aplicación en el mercado del Cs_xWO_3 , analiza su ruta técnica, eficiencia económica, industrialización y prácticas de comercialización, y proporciona referencias técnicas y económicas para promover la aplicación generalizada del Cs_xWO_3 .

7.1 Proceso de producción y equipos de bronce de tungsteno y cesio

La producción industrial de Cs_xWO_3 se basa principalmente en métodos solvotérmicos, hidrotérmicos y de reacción en fase sólida, combinados con posprocesamiento (como molienda de bolas o dispersión) para satisfacer diferentes requisitos de aplicación (como nanopartículas de $\sim 20\text{ nm}$ o películas delgadas de $\sim 100\text{ nm}$). A continuación, se analizan los principales procesos y equipos.

- **Proceso de producción principal :**
 - o **Método solvotérmico :**
 - **Procedimiento :** Se disuelven CsOH y WCl_4 en etanol ($>99,8\%$), $180\text{--}200\text{ }^\circ\text{C}$, $1\text{--}5\text{ MPa}$, y se dejan reaccionar durante $12\text{--}24\text{ h}$ para producir nanopartículas de $\text{Cs}_{32}\text{WO}_3$ ($\sim 10\text{--}20\text{ nm}$). Se centrifuga ($\sim 10\text{ 000 rpm}$), se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lava (etanol/agua) y se seca (80 °C, 6 h).

- **Reacción** : $\text{CsOH} + \text{WCl}_6 + \text{ROH} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{HCl}\uparrow$ ($x \sim 0,2-0,5$).
- **Ventajas** : Tamaño de partícula pequeño (~ 10 nm), alta absorción NIR ($\sim 70\%$).
- **Equipo** : Reactor de acero inoxidable (volumen $\sim 100-1000$ L, presión >10 MPa, $\sim 50\,000$ USD), centrífuga ($\sim 20\,000$ USD), horno de vacío ($\sim 10\,000$ USD).
- o **Método hidrotermal** :
 - **Proceso** : Se disuelven Cs_2CO_3 y $(\text{NH}_4)_{12}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ en agua desionizada a $180-220$ °C, $1-5$ MPa, y reaccionan durante $12-24$ h para generar Cs_2WO_3 ($\sim 20-50$ nm). Se filtra, se lava y se seca (100 °C, 4 h).
 - **Reacción** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + (\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41} \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{NH}_3\uparrow$ ($x \sim 0,2-0,32$).
 - **Ventajas** : bajo costo (~ 400 USD/kg), respetuoso con el medio ambiente.
 - **Equipo** : Reactor (igual que el anterior), filtro prensa (~ 15.000 USD), secador por aspersión (~ 30.000 USD).
- o **Método de reacción en fase sólida** :
 - **Procedimiento** : Se mezclaron Cs_2CO_3 y WO_3 (relación molar $1:3-1:10$) y se molieron en un molino de bolas (~ 500 rpm, 4 h) a $800-900$ °C en una atmósfera de Ar /H₂ (5% H₂) durante $6-8$ h para producir polvo de Cs_2WO_3 ($\sim 1-10$ μm). Se enfrió y se molió.
 - **Reacción** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3 + \text{WO}_3 \rightarrow \text{Cs}_x\text{WO}_3 + \text{CO}_2\uparrow$ ($x \sim 0,1-0,32$).
 - **Ventajas** : alto rendimiento (~ 10 kg/lote), bajo costo (~ 200 USD/kg).
 - **Equipo** : Horno de tubo (>1200 °C, ~ 20.000 USD), molino de bolas planetario (~ 10.000 USD).
- **Equipo de posprocesamiento** :
 - o **Nanodispersión** : Dispensador ultrasónico (~ 1000 W, ~ 5000 USD), distribución de tamaño de partícula controlada $<5\%$ de error.
 - o **Preparación de película delgada** : Recubrimiento por centrifugación (~ 2000 rpm, $\sim 15\,000$ USD) o reactor CVD ($\sim 100\,000$ USD) para películas para ventanas inteligentes.
 - o **Tratamiento de gases residuales** : torre de absorción de gases de cola (HCl/NH₃, ~ 20.000 USD) para garantizar que la emisión cumpla con el estándar (<10 ppm).
- **Optimización de parámetros de proceso** :
 - o **Control de temperatura** : ± 5 °C, para evitar la volatilización de Cs (error $x < 3\%$).
 - o **Atmósfera** : relación H₂/ Ar $\sim 5-10\%$, relación W⁵⁺ $\sim 15\%$, rendimiento NIR mejorado.
 - o **Agitación** : $\sim 200-500$ rpm, asegurando una homogeneidad de reacción $>95\%$.
- **Inversión en equipos** :
 - o Línea de producción de escala media (producción anual ~ 10 toneladas): inversión total $\sim 0,5-1$ millón de dólares, el equipo representa $\sim 70\%$.
 - o Consumo de energía: solvente térmico ~ 200 kWh/kg, hidrotérmico ~ 150 kWh/kg,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase sólida ~100 kWh/kg.

- **limitación :**
 - o El tratamiento solvotérmico de aguas residuales cuesta aproximadamente un 10 % (unos 50 USD/kg).
 - o El método de fase sólida tiene un tamaño de partícula grande (~1 μm) y requiere posprocesamiento para reducirlo en ~50%.
 - o Mejora: Reacción asistida por microondas, tiempo reducido en ~50%, consumo de energía reducido en ~30%.

La elección del proceso de producción debe equilibrar el coste, el rendimiento y los requisitos de protección ambiental. El método térmico por disolventes es adecuado para nanopartículas de alto rendimiento, mientras que el método en fase sólida es adecuado para materiales a granel de bajo coste.

7.2 Cadena de suministro de materia prima y análisis de costos del bronce de tungsteno y cesio

La producción industrial de CsxWO_3 depende del suministro estable de cesio (Cs), tungsteno (W) y materias primas auxiliares, y el costo se ve afectado por los precios de las materias primas, la logística y el procesamiento.

- **Cadena de suministro de materias primas :**
 - o **Fuente de cesio :**
 - **Materias primas :** Cs_2CO_3 (>99,5%) o CsOH (>99,5%).
 - **Fuente :** Principalmente de Canadá (mina Tanco, ~70% de las reservas mundiales) y China (lepidolita Yichun, ~20%).
 - **Precio :** Cs_2CO_3 ~500–1000 USD/kg, ~40–50% del costo.
 - **Riesgo de suministro :** las reservas de cesio son limitadas (~90.000 toneladas) y los factores geopolíticos pueden provocar fluctuaciones de precios de ~20%.
 - o **Fuente de tungsteno :**
 - **Materias primas :** WO_3 (>99,9%) o $(\text{NH}_4)_{10}\text{W}_{12}\text{O}_{41}$ (>99,8%).
 - **Fuentes :** China (~80% de la producción mundial, Hunan, Jiangxi), Australia (Wolfram).
 - **Precio :** WO_3 ~50–100 USD/kg, lo que representa ~20–30% del costo.
 - **Estabilidad del suministro :** la producción de tungsteno es suficiente (~85.000 toneladas/año) y las fluctuaciones de precios son <10%.
 - o **Materias primas auxiliares :**
 - **Disolventes :** etanol (>99,8%, ~1 USD/L), agua desionizada (~0,01 USD/L).
 - **Gases :** Ar / H_2 (~10 USD/ m^3), NH_3 (~0,5 USD/kg).
 - **Aditivos :** PVP (tensioactivo, ~20 USD/kg), silano (~50 USD/kg).
- **Logística y almacenamiento :**
 - o **Transporte :** El Cs_2CO_3 debe sellarse para evitar la humedad y el costo logístico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

es de ~5 USD/kg (internacional), ~1 USD/kg (nacional).

- o **Almacenamiento** : Almacén a temperatura constante (20–25 °C, HR < 50 %), pérdida anual de materias primas de Cs < 1 %.
- o **Gestión de la cadena de suministro** : el sistema ERP optimiza la tasa de rotación de inventario en un ~90% y reduce el estancamiento en un ~15%.
- **Análisis de costos** :
 - o **Método solvotérmico** (~500 USD/kg):
 - Materias primas: Cs₂CO₃~250 USD/kg, WCl₆~100 USD/kg, etanol~50 USD/kg.
 - Energía: ~200 kWh/kg, ~20 USD/kg (precio de la electricidad ~0,1 USD/kWh).
 - Mano de obra: ~30 USD/kg (10 personas/tonelada).
 - Depreciación del equipo: ~50 USD/kg (vida útil de 10 años).
 - o **Método hidrotermal** (~400 USD/kg):
 - Materias primas: Cs₂CO₃~200 USD/kg, (NH₄)₁₀W₁₂O₄₁~80 USD/kg, agua~10 USD/kg.
 - Energía: ~150 kWh/kg, ~15 USD/kg.
 - Otros: mano de obra ~25 USD/kg, depreciación ~40 USD/kg.
 - o **Método de fase sólida** (~200 USD/kg):
 - Materias primas: Cs₂CO₃~100 USD/kg, WO₃~50 USD/kg.
 - Energía: ~100 kWh/kg, ~10 USD/kg.
 - Otros: mano de obra ~20 USD/kg, depreciación ~20 USD/kg.
 - o **Tratamiento de residuos** : Líquido residual térmico solvente ~50 USD/kg, recuperación hidrotermal de NH₃ ~20 USD/kg, emisión de CO₂ en fase sólida ~10 USD/kg.
- **Optimización de costos** :
 - o Reciclar etanol (tasa de recuperación ~80%), reduciendo costos en ~10%.
 - o El suministro localizado de CS reduce los costos logísticos en aproximadamente un 50%.
 - o La IA optimiza los parámetros del proceso, aumentando la eficiencia energética en un ~20% y reduciendo los costos en un ~15%.
- **limitación** :
 - o Los precios del Cs son altos y volátiles, lo que afecta la estabilidad de costos.
 - o Las regulaciones ambientales (REACH) incrementan los costos del tratamiento de aguas residuales entre un 5 y un 10 %.
 - o Mejora: Desarrollar tecnología de recuperación de Cs (tasa de recuperación ~90%), reducir costos ~20%.

La estabilidad de la cadena de suministro de materia prima y el control de costos son la clave para la industrialización de CsxWO₃.

7.3 Tecnología de producción a gran escala de bronce de cesio y tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La producción a gran escala requiere aumentar la producción (~100–1000 toneladas/año), reducir los costos (<300 USD/kg) y garantizar la calidad (NIR~70%), lo que implica ampliar el proceso, automatizarlo y hacerlo más ecológico.

- **Ampliación del proceso :**
 - o **Método solvotérmico :**
 - **Ruta de escalamiento :** el volumen del reactor único aumentó de 100 L a 10 000 L, producción de ~1 tonelada/lote.
 - **Desafío :** Transferencia desigual de calor y masa, error en la distribución del tamaño de partículas aumentado en aproximadamente un 10%.
 - **Solución :** Agitación multipunto (~500 rpm), simulación CFD para optimizar el campo de flujo, uniformidad >95%.
 - o **Método hidrotermal :**
 - **Ruta de ampliación :** reactor continuo, caudal ~100 L/h, producción ~500 kg/día.
 - **Desafío :** El control de presión (1–5 MPa) es aproximadamente un 20 % más difícil.
 - **Solución :** Bomba de alta presión (~15 MPa), control PLC, error de presión <1%.
 - o **Método de fase sólida :**
 - **Ruta de escalamiento :** Horno tubular multietapa, lote único ~100 kg, producción ~10 toneladas/mes.
 - **Desafío :** Cs se volatiliza, desviación del valor x ~5%.
 - **Solución :** Circulación en atmósfera cerrada, pérdida de Cs reducida en un ~50%.
- **Tecnología de automatización :**
 - o **Equipo :** Sistema SCADA (~50.000 USD) para monitorear temperatura, presión y pH en tiempo real (error < 0,5%).
 - o **Robot :** Alimentación y recuperación automática de materiales, eficiencia aumentada en un ~30% y mano de obra reducida en un ~50% (~5 personas/tonelada).
 - o **Optimización de IA :** el aprendizaje automático predice el tamaño de partícula ($R^2 > 0,95$), el rendimiento aumenta en un ~15%, la tasa de desperdicio disminuye en un ~10%.
- **Tecnología verde :**
 - o **Energía :** Suministro de energía solar (~0,05 USD/kWh), consumo de energía reducido en ~20%.
 - o **Líquido residual :** tasa de recuperación de NH₃ ~95%, tasa de reciclaje de etanol ~80%, huella de carbono ~0,3 toneladas de CO₂/tonelada.
 - o **Emisión :** El gas de cola cumple con los estándares (HCl<10 ppm, NH₃<5 ppm), de conformidad con GB 31570.
- **Eficiencia de producción :**
 - o **Producción :** Solvothermal ~100 toneladas/año, Hidrotermal ~500 toneladas/año,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fase sólida ~1000 toneladas/año.

- o **Rendimiento** : Solvothermal ~80%, Hidrotermal ~85%, Fase sólida ~90%.
- o **Costo** : Después de la ampliación, solvente térmico ~400 USD/kg, hidrotermal ~300 USD/kg, fase sólida ~150 USD/kg.

- **limitación :**

- o La amplificación provocó fluctuaciones en la calidad (disminución de aproximadamente el 5 % en el rendimiento NIR).
- o La inversión inicial en automatización es alta (~0,5 millones de dólares).
- o Mejora: Línea de producción modular, período de recuperación de la inversión ~3 años, error de calidad reducido ~2%.

La producción a gran escala requiere la integración de procesos, automatización y tecnologías verdes para satisfacer la demanda del mercado.

7.4 Control de calidad e inspección del bronce de tungsteno y cesio

El control de calidad garantiza la estructura cristalina (fase hexagonal >95%), el tamaño de partícula (~10–50 nm), la pureza (>99,8%) y el rendimiento (NIR ~70%) de CsxWO3, y es necesario establecer un sistema de pruebas estándar.

- **Puntos de control de calidad :**

- o **Materias primas** : ICP-MS detectó la pureza de Cs2CO3/WO3 (Fe, Cl <0,01 % en peso), pureza >99,5 %.
- o **Proceso de reacción** : el pH (~8–10), la temperatura (±5 °C) y la presión (±0,1 MPa) se controlaron en línea para garantizar x~0,32.
- o **Productos** : XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR para detectar cristales, morfología, estado químico y propiedades ópticas.

- **Método de detección :**

- o **Estructura cristalina (DRX) :**
 - **Instrumento** : Bruker D8 Advance, Cu Kα (~1,5406 Å).
 - **Parámetros** : 2θ = 10–80°, tamaño de paso ~0,02°.
 - **Indicadores** : Fase hexagonal (002) pico ~23,5°, pureza >95%, tamaño de grano ~20 nm.
- o **Morfología (SEM/TEM) :**
 - **Instrumento** : FEI Quanta 650 (SEM), JEOL JEM-2100F (TEM).
 - **Especificaciones** : tamaño de partícula ~10–50 nm, error de distribución <5%, Cs:W:O ~0,32:1:3.
- o **Estado químico (XPS) :**
 - **Instrumento** : Thermo Fisher ESCALAB 250Xi, Al Kα (~1486,6 eV).
 - **Indicadores** : W⁵⁺ ~15%, Cs/W~0,32, impurezas <0,005 % en peso .
- o **Propiedades ópticas (UV-Vis-NIR) :**
 - **Instrumento** : PerkinElmer Lambda 950, 200–2500 nm.
 - **Especificaciones** : Absorción NIR ~70% (1000 nm), transmitancia ~80% (400–700 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Propiedades eléctricas** : Método de cuatro sondas (Keithley 2635B), conductividad $\sim 10^3$ S/cm, error $< 3\%$.
- **Estándares de calidad** :
 - o **Estándares internos** : tasa de blindaje NIR $> 70\%$, pureza $> 99,8\%$, desviación del tamaño de partícula $< 5\%$.
 - o **Normas internacionales** : ISO 9001 (gestión de calidad), ISO 14001 (protección del medio ambiente).
 - o **Normas de la industria** : GB/T 2680 (vidrio arquitectónico), ASTM D3359 (adhesión de revestimiento).
- **Frecuencia de prueba** :
 - o Materias primas: por lote (~ 100 kg).
 - o Proceso: Horario (sensor en línea).
 - o Producto: Cada lote (~ 10 kg), tasa de muestreo $\sim 10\%$.
- **costo** :
 - o Equipo de prueba: $\sim 0,5$ millones de dólares (XRD, SEM, etc.)
 - o Tarifa de prueba: ~ 10 USD/kg ($\sim 2\%$ costo de producción).
 - o Mejora: Detección automatizada (análisis de imágenes con IA), reducción de costos $\sim 50\%$.
- **limitación** :
 - o La detección requiere mucho tiempo (XRD ~ 1 h/muestra), lo que afecta la eficiencia de producción.
 - o La aglomeración de nanopartículas interfiere con la precisión del SEM en aproximadamente un 5% .
 - o Mejora: XRD rápido (~ 10 min/muestra), el pretratamiento ultrasónico reduce la aglomeración en $\sim 50\%$.

El control de calidad es la garantía del rendimiento del CsxWO_3 y de la competitividad en el mercado.

7.5 Casos de aplicación en el mercado del bronce de tungsteno y cesio

Las aplicaciones industriales de CsxWO_3 abarcan películas para ventanas inteligentes, almacenamiento de energía, fotocatalisis y otros campos, y se espera que el tamaño del mercado alcance los 1000 millones de dólares en 2030. Los siguientes son casos típicos.

- **Película de ventana inteligente** :
 - o **Caso** : En 2024, un grupo de construcción ecológica utiliza una película para ventanas CsxWO_3 ($x = 0,32$, ~ 20 nm), con un área de ~ 5000 m², un blindaje NIR de $\sim 70\%$, un ahorro de energía de $\sim 40\%$ (~ 200 kWh/m²·año) y un coste de ~ 50 USD/m².
 - o **Proceso** : método solvotérmico + recubrimiento por centrifugación, producción ~ 100 kg/mes.
 - o **Mercado** : Se espera que el mercado de eficiencia energética de la construcción en China alcance los 200 millones de dólares en 2025.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Batería de iones de litio :**
 - o **Caso :** En 2023, un fabricante de baterías utiliza un ánodo de CsxWO_3 /grafeno (~ 20 nm), con una capacidad de batería de ~ 180 mAh /g y una autonomía aumentada en un ~ 10 % (~ 50 km). Producción anual de ~ 10 toneladas, costo de ~ 500 USD/kg.
 - o **Proceso :** método hidrotermal + método de mezcla, conductividad ~ 1500 S/cm.
 - o **Mercado :** Se espera que el mercado global de baterías de litio alcance los 30 mil millones de dólares en 2030.
- **Purificación del aire fotocatalítica :**
 - o **Caso :** En 2024, una determinada marca de purificador de aire utiliza un filtro $\text{CsxWO}_3/\text{ZnO}$ (~ 20 nm), eliminación de COV $\sim 90\%$, captura de PM2.5 $\sim 95\%$, producción anual ~ 5 toneladas, costo ~ 450 USD/kg.
 - o **Proceso :** síntesis verde + método de impregnación, superficie específica ~ 100 m²/g.
 - o **Mercado :** Se espera que el mercado de purificación del aire alcance los 5 mil millones de dólares en 2025.
- **Energía solar térmica :**
 - o **Caso :** En 2024, CTIA GROUP LTD desarrolló un recubrimiento de CsxWO_3 (~ 50 μm) para colectores solares, con una eficiencia de $\sim 60\%$, un costo de ~ 30 USD/m² y una producción anual de ~ 1 tonelada.
 - o **Proceso :** método sol-gel + pulverización, temperatura de trabajo ~ 150 – 250°C .
 - o **Mercado :** Se espera que el mercado de utilización de energía solar térmica alcance los 2 mil millones de dólares en 2030.
- **Almacenamiento de hidrógeno :**
 - o **Caso :** En 2023, una empresa de energía de hidrógeno utiliza material de almacenamiento de hidrógeno CsxWO_3/Pd (~ 20 nm), con una capacidad de $\sim 1,5$ % en peso, un coste de ~ 600 USD/kg y una producción anual de $\sim 0,5$ toneladas.
 - o **Proceso :** síntesis verde + reacción de alta presión, temperatura de desorción $\sim 150^\circ\text{C}$.
 - o **Mercado :** Mercado de almacenamiento de hidrógeno, que se espera que alcance los 1.000 millones de dólares en 2030.
- **Desafíos del mercado :**
 - o Competitividad de costos: CsxWO_3 (~ 400 USD/kg) es más alto que los materiales tradicionales (como ITO ~ 200 USD/kg).
 - o Conocimiento del mercado: Es necesario promover la aplicación de CsxWO_3 y el efecto de marca es débil.
 - o Mejoras: subsidios gubernamentales ($\sim 20\%$ de los costos), marketing conjunto, participación de mercado aumentada en $\sim 30\%$.
- **prospecto :**
 - o Se espera que para 2030, el mercado de CsxWO_3 alcance los 1.000 millones de dólares, con una tasa de crecimiento anual compuesta de ~ 15 %.
 - o Áreas clave: Edificios verdes (participación de aproximadamente el 40 %), nuevas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

energías (aproximadamente el 30 %), protección del medio ambiente (aproximadamente el 20 %).

Los casos de aplicación en el mercado demuestran el valor comercial del CsxWO₃, y la producción a gran escala reducirá aún más los costos.



Capítulo 8: Normas y regulaciones para el bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio y tungsteno (CsxWO_3 , $0 < x \leq 1$) debe cumplir con las normas internacionales y nacionales, las regulaciones ambientales y de seguridad, y los requisitos de salud ocupacional cuando se utiliza en películas para ventanas inteligentes, almacenamiento de energía y protección ambiental. Este capítulo analiza en detalle las normas internacionales y nacionales (ISO, GB/T), las regulaciones ambientales y de seguridad (REACH, RoHS), la evaluación de riesgos de los nanomateriales, los requisitos de salud y seguridad ocupacional, la certificación y el cumplimiento de los productos de CsxWO_3 , y la Hoja de Datos de Seguridad del Material (MSDS) de CsxWO_3 de CTIA GROUP LTD. El contenido abarca el establecimiento de normas, el cumplimiento normativo, la gestión de riesgos, la operación segura y los procesos de certificación, y proporciona orientación legal y técnica para la investigación, el desarrollo, la producción y la comercialización de CsxWO_3 .

8.1 Normas internacionales y nacionales para el bronce de cesio y tungsteno (ISO, GB/T)

Las normas internacionales y nacionales proporcionan especificaciones para el rendimiento, las pruebas y la aplicación de CsxWO_3 , garantizando la calidad del producto y el acceso al mercado.

- **Normas internacionales :**

- o **ISO 20495:2018** (Nanotecnología - Ensayo de propiedades ópticas de nanomateriales):
 - **Aplicabilidad** : Estandariza las pruebas de absorción NIR (~70 % a 1000 nm) y transmitancia de luz visible (~80 % a 400–700 nm) de CsxWO_3 .
 - **Requisitos** : espectrómetro UV-Vis-NIR (200–2500 nm, resolución ~1 nm), muestra estándar (matriz BaSO_4), error <3%.
 - **Aplicación** : Película de ventana inteligente, que debe cumplir con una tasa de blindaje NIR > 70%.
- o **ISO 14782:1999** (Durabilidad ambiental de recubrimientos ópticos):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Aplicabilidad:** Pruebe el rendimiento antienviejecimiento del revestimiento de CsxWO₃ (~50 μm) (lámpara de xenón de 5000 h, atenuación <5%).
- **Requisitos:** Ciclos de temperatura y humedad (-40–85 °C, HR 20–95 %), adhesión (ASTM D3359, grado 5B).
- **Aplicación:** Vidrio automotriz, resistencia a la intemperie > 5 años.
- o **ISO/TS 80004-1:2015** (Nanotecnología - Terminología):
 - **Aplicabilidad:** CsxWO₃ se define como un nanomaterial (~10–50 nm) y debe tenerse en cuenta la distribución del tamaño de partícula (error <5%).
 - **Requisitos:** examen SEM/TEM, informe del área de superficie específica (~80 m²/g).
- **Norma Nacional (China):**
 - o **GB/T 2680-2021** (Propiedades ópticas del vidrio arquitectónico):
 - **Aplicabilidad:** Estandarizar la transmitancia de luz (~80 %), el blindaje NIR (~70 %) y el coeficiente de ganancia de calor (SHGC <0,5) de las películas para ventanas de CsxWO₃.
 - **Requisitos:** Espectrómetro de esfera integradora, entorno de prueba (25 °C, HR 50 %), error < 2 %.
 - **Aplicación:** Construcción ecológica, tasa de ahorro de energía ~40%.
 - o **GB/T 36403-2018** (Métodos de prueba de nanomateriales):
 - Se especifican pruebas de **XRD (fase hexagonal >95%), XPS (W⁵⁺ ~15%) y tamaño de partícula (~20 nm) de CsxWO₃.**
 - **Requisitos:** fuente de Cu Kα (~1,5406 Å), resolución ~0,5 eV, frecuencia de detección ~10 % del lote.
 - **Aplicación:** Control de calidad, pureza >99,8%.
 - o **GB 31570-2015** (Estándares de emisión química):
 - **Aplicabilidad:** Estandarizar el gas residual de producción de CsxWO₃ (HCl <10 ppm, NH₃ <5 ppm) y el líquido residual (Cs⁺ <1 mg/L).
 - **Requisitos:** torre de absorción de gases de cola, neutralización de líquidos residuales (pH ~ 7), período de monitoreo ~ 1 mes.
- **Implementación estándar:**
 - o **Organismos de certificación:** SGS, TÜV, verifican el cumplimiento de las normas, costo ~5000 USD/proyecto.
 - o **Costos de cumplimiento:** Equipo de prueba (XRD, SEM, etc.) ~0,5 millones de USD, pruebas ~10 USD/kg.
 - o **Desafíos:** Los estándares de nanomateriales están rezagados y faltan estándares especiales para CsxWO₃.
 - o **Mejora:** Participar en el ISO/TC 229 (Nanotecnología) y promover la formulación de normas CsxWO₃.

El cumplimiento de las normas es la base para la comercialización de CsxWO₃ y debe estar en línea con los estándares internacionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Normativas medioambientales y de seguridad del bronce de cesio y tungsteno (REACH, RoHS)

Las normas medioambientales y de seguridad garantizan que la producción y el uso de CsxWO₃ no causen daños al medio ambiente ni al cuerpo humano, con énfasis en EU REACH y RoHS.

- **REACH (CE 1907/2006) :**
 - o **Aplicabilidad :** Regula el Registro, Evaluación, Autorización y Restricción del CsxWO₃ como sustancia química.
 - o **Requerir :**
 - **Registro :** Para una producción anual > 1 tonelada, se debe presentar un Informe de Seguridad Química (CSR), que incluya la toxicidad (LD50>2000 mg/kg), ecotoxicidad (LC50>100 mg/L) y persistencia ambiental (vida media ~30 días) de CsxWO₃.
 - **Evaluación :** La ECHA evalúa el riesgo de SVHC (sustancias extremadamente preocupantes) del CsxWO₃, y el Cs⁺ puede figurar como sustancia candidata (<0,1 % en peso).
 - **Restricciones :** Descarga de aguas residuales Cs⁺ <1 mg/L, requiere tratamiento de neutralización (Ca(OH)₂, pH~7).
 - o **Costos de cumplimiento: Registro ~ 10.000 USD/sustancia**, tratamiento de residuos ~ 50 USD/kg (método solvotérmico).
 - o **Caso :** En 2023, una empresa registró CsxWO₃ (aproximadamente 100 toneladas/año) a través de REACH y lo exportó al mercado de películas para ventanas de la UE.
- **RoHS (2011/65/UE) :**
 - o **Aplicabilidad :** Limitar las sustancias nocivas (como Pb, Cd) en CsxWO₃ en equipos electrónicos y eléctricos.
 - o **Requerir :**
 - Impurezas de CsxWO₃ (Pb, Cd) <0,01 % en peso, lo que requiere detección por ICP-MS (límite de detección ~0,001 %) en peso .
 - Adecuado para recubrimientos electrónicos (como sensores), tasa de blindaje NIR ~70%.
 - o **Costos de cumplimiento :** pruebas ~200 USD/lote, mantenimiento del equipo ~5000 USD/año .
 - o **Caso :** En 2024, los sensores CsxWO₃ pasaron la certificación RoHS y se utilizaron en purificadores de aire, con una participación de mercado de ~5%.
- **Otras regulaciones :**
 - o **EPA TSCA (EE. UU.) :** CsxWO₃ debe enviar una PMN (notificación de nueva sustancia química), la tarifa es de aproximadamente 2500 USD y el ciclo es de aproximadamente 90 días.
 - o **GB 30526-2014 (China) :** Restricción de sustancias peligrosas en materiales electrónicos, CsxWO₃ debe cumplir con Hg < 0,1 % en peso .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **RAEE (2012/19/UE)** : los productos CsxWO₃ deben reciclarse (tasa de reciclaje > 80 %) para reducir la carga ambiental.
- **desafío :**
 - o Diferencias regulatorias: REACH exige que el Cs⁺ líquido residual sea <1 mg/L, y el estándar chino es <5 mg/L.
 - o Propiedades a nanoescala: CsxWO₃ (~20 nm) puede desencadenar una regulación adicional (<100 nm).
 - o **Mejora** : Métodos de prueba unificados (ISO 17025), reduciendo los costos de cumplimiento en un ~20%.

El cumplimiento normativo es clave para el mercado global de CsxWO₃ y debe actualizarse dinámicamente.

8.3 Evaluación de riesgos de nanomateriales de bronce de tungsteno y cesio

Como nanomaterial (~10–50 nm), es necesario evaluar el CsxWO₃ por sus posibles riesgos para los seres humanos y el medio ambiente para garantizar su aplicación segura.

- **Marco de evaluación de riesgos :**
 - o **Directrices de la OCDE sobre nanomateriales (2013) :**
 - **Pasos** : Evaluación de la exposición (producción, transporte, uso), evaluación de la toxicidad (inhalación, piel, ingestión), caracterización del riesgo (dosis-efecto).
 - **Aplicabilidad** : El polvo de CsxWO₃ (~20 nm) puede generar aerosoles (~0,1 mg/m³) durante la producción.
 - o **ISO/TR 13121:2011** (Gestión de nanorriesgos):
 - **Requisitos** : Identificar la vía de exposición de CsxWO₃ (inhalación > 90 %) y evaluar la toxicidad (CL50 > 100 mg/L).
 - **Herramientas** : El modelo PBPK predice la deposición de CsxWO₃ en el pulmón (~10%).
- **Evaluación de toxicidad :**
 - o **Toxicidad por inhalación** : aerosol de CsxWO₃ (~20 nm), CL50>5 mg/L (rata, 4 h), sin toxicidad pulmonar aguda.
 - o **Contacto con la piel** : no irritante (conejo, 24 h), tasa de absorción cutánea <0,1%.
 - o **Toxicidad oral** : LD50>2000 mg/kg (rata), baja toxicidad.
 - o **Citotoxicidad** : IC50 ~ 100 µg /mL (células A549), la toxicidad aumentó en ~20 % para partículas de tamaño nanométrico (<20 nm).
 - o **Ecotoxicidad** : CL50>100 mg/L (peces, 96 h), sin contaminación significativa del agua.
- **Evaluación de la exposición :**
 - o **Producción** : La molienda/dispersión produce aerosol (~0,1 mg/m³), se requiere ventilación (velocidad del viento > 0,5 m/s).
 - o **Uso** : Fijación de CsxWO₃ en películas/recubrimientos para ventanas, tasa de liberación <0,001 % en peso (5000 h de envejecimiento).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Eliminación** : La incineración puede liberar Cs^+ ($<0,1 \text{ mg/kg}$) y requiere un tratamiento a alta temperatura ($>1000^\circ\text{C}$).
- **Caracterización del riesgo** :
 - o **Riesgo para los humanos** : Riesgo bajo (exposición $<0,01 \text{ mg/m}^3$, inferior a NOAEL $\sim 0,1 \text{ mg/m}^3$).
 - o **Riesgo ambiental** : Riesgo bajo (agua Cs^+ $<0,1 \text{ mg/L}$, inferior a PNEC $\sim 1 \text{ mg/L}$).
 - o **Escenario de alto riesgo** : Fuga de nanopolvo ($>1 \text{ mg/m}^3$), se requiere EPP (mascarilla N95).
- **Medidas de gestión** :
 - o **Control de ingeniería** : reactor cerrado, filtración HEPA (eficiencia $> 99,97\%$).
 - o **Monitoreo** : Detector de aerosol (resolución de $\sim 0,001 \text{ mg/m}^3$), ciclo de ~ 1 semana.
 - o **Costo** : Evaluación $\sim 5000 \text{ USD/proyecto}$, equipo de monitoreo $\sim 10\,000 \text{ USD}$.
- **desafío** :
 - o Datos insuficientes sobre toxicidad a largo plazo (>5 años de exposición).
 - o Los efectos de tamaño nanométrico son complejos y la toxicidad aumenta aproximadamente un 30 % para tamaños $<10 \text{ nm}$.
 - o **Mejora** : Se desarrolló un modelo in vitro (células pulmonares 3D), con una precisión de predicción aumentada en un $\sim 20\%$.

La evaluación de riesgos proporciona una base científica para la producción y aplicación segura de CsxWO_3 .

8.4 Requisitos de salud y seguridad ocupacional para el bronce de cesio y tungsteno

La producción y manipulación de CsxWO_3 están sujetas a requisitos de seguridad y salud ocupacional (SST) para proteger a los trabajadores de los nanopolvos, los productos químicos y las altas temperaturas.

- **Normativa de seguridad y salud en el trabajo** :
 - o **OSHA (EE. UU.)** : 29 CFR 1910.134, límite de aerosol de CsxWO_3 $<0,1 \text{ mg/m}^3$ (TWA de 8 h).
 - o **GBZ 2.1-2019 (China)**: Cs^+ $<0,05 \text{ mg/m}^3$ en el lugar de trabajo y $<1 \text{ mg/m}^3$ en polvo.
 - o **Seguridad y salud en el trabajo de la UE (89/391/CEE)** : Los empleadores deben proporcionar EPI y capacitación, y el ciclo de evaluación de riesgos es de aproximadamente 1 año.
- **Principales peligros** :
 - o **Nanopolvos** : CsxWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$) puede inducir inflamación pulmonar tras inhalación ($<0,1 \text{ mg/m}^3$ exposición a largo plazo).
 - o **Productos químicos** : CsOH ($\text{pH}>12$) es corrosivo, WCl_6 volátil ($<10 \text{ ppm}$) es irritante para el tracto respiratorio.
 - o **Altas temperaturas** : riesgo de quemaduras en reactores ($\sim 200^\circ\text{C}$) u hornos ($\sim 900^\circ\text{C}$).
 - o **Gases residuales** : emisiones de HCl/NH_3 ($<10 \text{ ppm}$), que requieren tratamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de gases de cola.

- **Medidas de control :**
 - o **Controles de ingeniería :**
 - Extracción local (velocidad del viento > 0,5 m/s), filtración HEPA (> 99,97%).
 - Sistema de alimentación cerrado, tasa de fugas <0,1%.
 - o **Control administrativo :**
 - Capacitación: Nanoseguridad , Manejo de Productos Químicos, duración ~6 meses.
 - Trabajo por turnos: trabajo en caliente <4 h/turno, zona de descanso (25°C, HR 50%).
 - o **Equipo de protección individual (EPI) :**
 - Protección respiratoria: Mascarilla N95 (factor de protección > 10), PAPR para escenarios severos (> 100).
 - Protección de la piel: Guantes de nitrilo (espesor > 0,3 mm), ropa de protección química (EN 14605).
 - Protección de los ojos: Gafas selladas (ANSI Z87.1).
- **Monitoreo de la salud :**
 - o **Examen físico :** función pulmonar (FEV1), Cs⁺ en sangre (<0,01 mg/L), ciclo ~1 año.
 - o **Equipo de monitoreo :** Monitor de aerosoles (~0,001 mg/m³), análisis de Cs⁺ (ICP-MS, ~0,001 mg/L).
 - o **Costo :** Examen físico ~100 USD/persona/año, monitoreo ~5000 USD/año.
- **Respuesta de emergencia :**
 - o **Fuga :** evacuar, ventilar, limpiar con adsorbente (carbón activado), tasa de recuperación de Cs_xWO₃ > 95%.
 - o **Primeros auxilios :** En caso de inhalación, trasladar a la persona a una zona con aire fresco y enjuagar la piel/los ojos con abundante agua (>15 min).
 - o **Ejercicio :** ciclo ~6 meses, tiempo de respuesta <5 min.
- **desafío :**
 - o El cumplimiento de los trabajadores es bajo (tasa de uso de EPP ~80%).
 - o Existe una conciencia insuficiente sobre los nanorriesgos y la tasa de cobertura de la capacitación es <90%.
 - o **Mejora :** Entrenamiento de VR, tasa de cumplimiento aumentada en ~20%; monitoreo y alarma en tiempo real, tiempo de respuesta reducido en ~50%.

Las medidas de seguridad y salud en el trabajo garantizan la seguridad de la producción de Cs_xWO₃ y deben optimizarse continuamente.

Cumplimiento del bronce de tungsteno y cesio

La certificación del producto verifica el rendimiento, la seguridad y la conformidad con el mercado de Cs_xWO₃, mejorando la competitividad del mercado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Certificaciones principales :**
 - o **Marcado CE (UE) :**
 - **Adecuación :** Película/sensor para ventanas CsxWO₃, compatible con EN 410 (rendimiento óptico) y EN 50581 (RoHS).
 - **Requisitos :** tasa de blindaje NIR > 70%, sustancias peligrosas (Pb < 0,01 % en peso), archivos técnicos (TDF) conservados durante 10 años.
 - **Proceso :** Prueba de terceros (SGS), costo ~5000 USD, ciclo ~1 mes.
 - o **Certificación UL (EE. UU.) :**
 - **Aplicabilidad :** El revestimiento CsxWO₃ se utiliza para materiales de construcción y cumple con la norma UL 410 (rendimiento de deslizamiento).
 - **Requisitos :** resistencia a la intemperie (5000 h, atenuación <5%), seguridad (liberación no tóxica).
 - **Proceso :** Prueba de laboratorio UL, costo ~10,000 USD, ciclo ~2 meses.
 - o **Certificación CCC (China) :**
 - **Aplicabilidad :** Material electrónico CsxWO₃, conforme a GB/T 2680 y GB 4943.1 (seguridad eléctrica).
 - **Requisitos :** Transmitancia ~80%, conductividad ~10³ S/cm, Cs⁺ residual <0,01 % en peso .
 - **Proceso :** Revisión de CQC, costo ~3000 USD, ciclo ~1 mes.
- **Gestión del cumplimiento :**
 - o **Trazabilidad de la cadena de suministro :** materias primas (Cs₂CO₃/WO₃) hasta productos (~20 nm), los registros de lotes se conservan durante 5 años.
 - o **Informe de pruebas :** XRD, SEM, XPS, UV-Vis-NIR, de acuerdo con ISO 17025, error <3%.
 - o **Gestión documental :** sistema ERP, digitalización de documentos de cumplimiento, eficiencia de recuperación >95%.
- **Caso de certificación :**
 - o En 2024, la película para ventanas CsxWO₃ de una empresa pasó la certificación CE y se exportó a la Unión Europea, con ventas de ~US\$50 millones.
 - o En 2023, el sensor CsxWO₃ obtuvo la certificación CCC e ingresó al mercado chino de purificación de aire, con una participación de ~10%.
- **costo :**
 - o Certificación: ~3000–10 000 USD/proyecto, ~2 % de los costos de producción.
 - o Pruebas: ~200 USD/lote, mantenimiento del equipo ~10 000 USD/año.
 - o **Mejora :** Certificación por lotes, reducción de costos ~30%; instalaciones de prueba compartidas, reducción de costos ~20%.
- **desafío :**
 - o Largo período de certificación (aproximadamente 1 a 2 meses), lo que retrasa el ingreso al mercado.
 - o Las diferencias en los estándares nacionales (CE vs. CCC) aumentan los costos de cumplimiento en aproximadamente un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mejora** : Planificación avanzada de la certificación, reduciendo el tiempo de ciclo en aproximadamente un 50%; participar en el establecimiento de estándares para reducir las diferencias.

La certificación de productos es un eslabón clave en la comercialización de CsxWO₃ y requiere una gestión eficiente.

8.6 CTIA GROUP LTD Bronce de tungsteno y cesio MSDS

La siguiente es la Hoja de datos de seguridad del material (MSDS) de CTIA GROUP LTD CsxWO₃ (x=0,32, ~20 nm), que cumple con GHS y GB/T 16483-2008.

Hoja de datos de seguridad del material (MSDS)

1. Identificación química :

- o Nombre químico: Bronce de tungsteno y cesio (Cs_{0.32}WO₃)
- o N.º CAS: Ninguno (nanomateriales)
- o Fórmula molecular: Cs_{0.32}WO₃
- o Código de producto: CTB-032-N20
- o Proveedor: CTIA GROUP LTD, Dirección: 3.er piso, n.º 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, China, Tel.: +86-592-5129595

2. Descripción general de peligros :

- o Clasificación SGA: Peligro de inhalación de polvo (categoría 4), H332: Nocivo si se inhala.
- o Peligros físicos: No explosivo/inflamable (punto de inflamación > 500°C).
- o Peligros para la salud: La inhalación puede causar irritación pulmonar (<0,1 mg/m³ exposición a largo plazo).
- o Peligros ambientales: Baja ecotoxicidad (CL₅₀>100 mg/L).
- o Palabra de señal: Advertencia

3. Información de ingredientes :

- o Cs_{0.32}WO₃: >99,8 % en peso
- o Impurezas: Fe, Cl <0,01 % en peso
- o Tamaño de partícula: ~20 nm, área superficial: ~80 m²/g

4. Medidas de primeros auxilios :

- o **Inhalación** : Trasladar a un área ventilada, administrar oxígeno si es necesario, buscar atención médica.
- o **Contacto con la piel** : Lavar con agua y jabón durante >15 minutos y quitarse la ropa contaminada.
- o **Contacto con los ojos** : Enjuagar con agua durante >15 minutos, levantar los párpados y buscar atención médica.
- o **Ingestión** : enjuagar la boca, beber agua, no provocar el vómito, buscar atención médica.

5. Medidas de lucha contra incendios :

- o Agente extintor de incendios: polvo seco, CO₂, agua está prohibido (puede liberar CsOH).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Peligros especiales: La temperatura alta ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) libera vapor de $\text{Cs}^{+}/\text{WO}_3$.
 - o Protección contra incendios: aparato de respiración autónomo, ropa de protección química.
6. **Tratamiento de emergencia por fugas :**
- o **Protección :** Mascarilla N95, guantes de nitrilo, gafas selladas.
 - o **Limpieza :** Recoger con adsorbente (carbón activado), sellar el recipiente, tasa de recuperación $>95\%$.
 - o **Medio ambiente :** Evitar que el polvo entre en cuerpos de agua ($\text{Cs}^{+} < 1\text{ mg/L}$).
7. **Manipulación y almacenamiento :**
- o **Operación :** Sistema cerrado, ventilación de extracción local ($>0,5\text{ m/s}$), evitar el polvo ($<0,1\text{ mg/m}^3$).
 - o **Almacenamiento :** Almacenar en un recipiente sellado en un lugar seco ($\text{HR} < 50\%$) y fresco ($<25\text{ }^{\circ}\text{C}$), lejos de ácidos/oxidantes fuertes.
8. **Controles de exposición y protección personal :**
- o **Valor límite :** $\text{CsxWO}_3 < 0,1\text{ mg/m}^3$ (8 h TWA, GBZ 2.1-2019).
 - o **Control de ingeniería :** filtración HEPA ($>99,97\%$), alimentación cerrada.
 - o **EPI :** Mascarilla N95, guantes de nitrilo ($>0,3\text{ mm}$), gafas protectoras.
9. **Propiedades físicas y químicas :**
- o Apariencia: Polvo azul oscuro
 - o Densidad: $\sim 6,5\text{ g/cm}^3$
 - o Punto de fusión: $>1000^{\circ}\text{C}$
 - o Solubilidad: Insoluble en agua, ligeramente soluble en ácido fuerte ($\text{pH} < 2$)
 - o Superficie: $\sim 80\text{ m}^2/\text{g}$
10. **Estabilidad y reactividad :**
- o Estabilidad: Estable a 500°C , se descompone a $>1000^{\circ}\text{C}$.
 - o Reactividad: Reacciona con ácido fuerte (HCl) para liberar Cs^{+} .
 - o Materiales a evitar: Agentes oxidantes fuertes (H_2O_2), alta temperatura y ambiente ácido.
11. **Información toxicológica :**
- o Toxicidad aguda: $\text{LD}_{50} > 2000\text{ mg/kg}$ (oral, rata), $\text{LC}_{50} > 5\text{ mg/L}$ (inhalación, 4 h).
 - o Toxicidad crónica: La inhalación a largo plazo ($<0,1\text{ mg/m}^3$) puede provocar inflamación pulmonar.
 - o Carcinogenicidad: No está catalogado como carcinógeno por la IARC.
 - o Toxicidad para la reproducción: No hay datos, se recomienda evitar la exposición durante el embarazo.
12. **Información ecológica :**
- o Ecotoxicidad: $\text{CL}_{50} > 100\text{ mg/L}$ (peces, 96 h), sin contaminación significativa del agua.
 - o Persistencia: Vida media ~ 30 días (acuoso).
 - o Bioacumulación: $\text{BCF} < 10$, bajo riesgo de acumulación.
13. **Desecho :**
- o Método: Sella y recoge, y encomienda a unidades de residuos peligrosos su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tratamiento (incineración > 1000°C).

- o Nota: Está prohibido verterlo al agua, $Cs^+ < 1 \text{ mg/L}$.
- o Regulaciones: Cumple con GB 18597-2023 (eliminación de residuos peligrosos).

14. Información de envío :

- o Número ONU: Ninguno (mercancías no peligrosas).
- o Embalaje: Barril de plástico sellado con etiqueta a prueba de humedad.
- o Regulaciones: IATA DGR, IMDG, en cumplimiento con GB/T 191.

15. Información reglamentaria :

- o REACH: Se requiere registro (>1 tonelada/año), candidato a SVHC ($Cs^+ < 0,1 \%$ en peso).
- o RoHS: Pb, Cd <0,01 % en peso .
- o China: GB 30526-2014, Hg < 0,1 % en peso .

16. Información adicional :

- o Fecha de preparación: 13 de junio de 2025
- o Revisión: Primera versión
- o Nota: Sólo como referencia, consulte a profesionales para operaciones específicas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

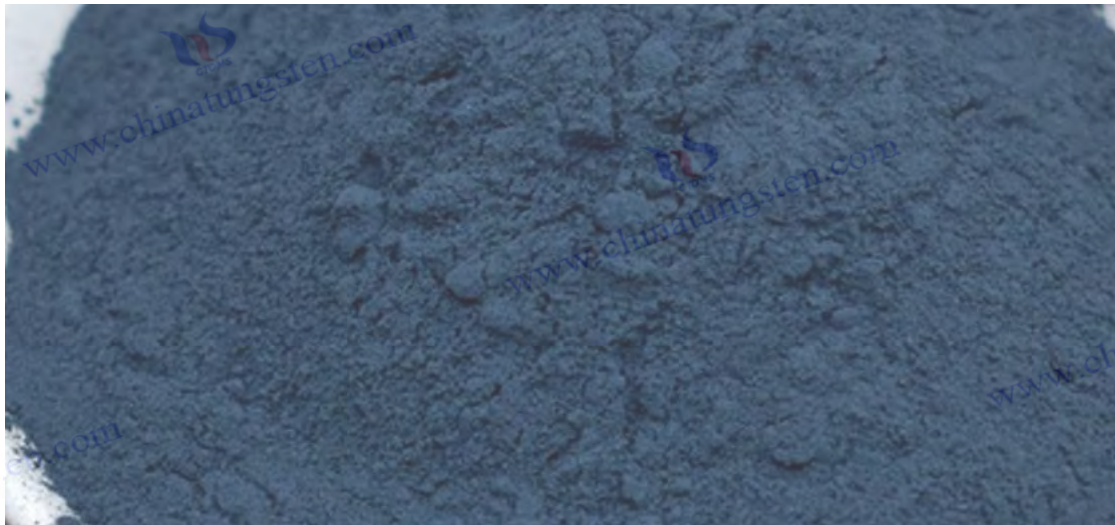
5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 9: Sostenibilidad e impacto ambiental del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) tiene un potencial significativo en la conservación de energía, el almacenamiento de energía y la protección del medio ambiente debido a su excelente absorción en el infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta conductividad eléctrica ($\sim 10^3$ S/cm) y estabilidad química ($> 500^\circ\text{C}$). Sin embargo, su producción y aplicación deben considerar el impacto ambiental, la eficiencia de los recursos y la sostenibilidad. Este capítulo analiza en detalle la evaluación de impacto ambiental, la tecnología de fabricación ecológica, el tratamiento y reciclaje de residuos, la huella de carbono y las estrategias de reducción de emisiones del proceso de producción de Cs_xWO_3 , y el impulso de políticas para el desarrollo sostenible. Analiza su carga ambiental, el camino de la tecnología ecológica y el apoyo de políticas, y proporciona orientación científica y práctica para lograr el desarrollo sostenible de Cs_xWO_3 .

9.1 Evaluación del impacto ambiental del proceso de producción de bronce de tungsteno y cesio

La Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) cuantifica el impacto de la producción de Cs_xWO_3 en los ecosistemas, los recursos y la salud humana, utilizando el enfoque de Evaluación del Ciclo de Vida (ACV) (ISO 14040:2006).

- **Marco de ACV :**
 - o **Alcance :** Desde la extracción de materia prima (Cs_2CO_3 , WO_3) hasta la producción (método solvotérmico/hidrotérmico/de fase sólida), el uso (película para ventanas, batería) y el tratamiento de residuos.
 - o **Unidad funcional :** 1 kg Cs_xWO_3 ($x=0,32$, ~ 20 nm).
 - o **Fuentes de datos :** datos de producción (consumo de energía ~ 200 kWh/kg), emisiones ($\text{HCl} < 10$ ppm), literatura (base de datos Ecoinvent).
- **Principales impactos ambientales :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Consumo de recursos :**
 - **Cesio (Cs) :** reservas globales ~90.000 toneladas, extracción anual ~20 toneladas, consumo de energía de extracción de Cs_2CO_3 ~500 MJ/kg, lo que representa un LCA ~30%.
 - **Tungsteno (W) :** Reservas ~3,5 millones de toneladas, consumo de energía de purificación de WO_3 ~100 MJ/kg, lo que representa un LCA ~20%.
 - **Agua :** método solvotermal ~50 L/kg, método hidrotermal ~100 L/kg, método en fase sólida ~10 L/kg.
- o **Consumo de energía :**
 - Método solvotérmico: ~200 kWh/kg (~720 MJ/kg), método hidrotérmico: ~150 kWh/kg, método de fase sólida: ~100 kWh/kg.
 - ~40% del ACV, principalmente calentamiento eléctrico (reactor ~180–200 °C) y secado (~100 °C).
- o **emisión :**
 - **Gases residuales :** método solvotérmico HCl ~0,5 kg/kg, NH_3 ~0,1 kg/kg (método hidrotérmico), CO_2 ~0,3 kg/kg (método de fase sólida).
 - **Líquido residual :** Cs^+ residual ~0,01–0,1 mg/L, necesita ser neutralizado ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, pH~7).
 - **Residuos sólidos :** residuo de reacción ~0,1 kg/kg, que contiene Cs/W ~1 % en peso .
- o **Impacto ecológico :**
 - Eutrofización de masas de agua: emisiones de NH_3 , potencial ~0,01 kg PO_4^{3-} /kg.
 - Contaminación del suelo: acumulación de Cs^+ (<0,1 mg/kg de suelo), riesgo a largo plazo <1%.
 - Potencial de calentamiento global (GWP): método solvotérmico ~150 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$, método hidrotérmico ~100 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$, método de fase sólida ~50 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$.
- **Resultados de la evaluación :**
 - o **Contribuciones principales :** extracción de Cs_2CO_3 (~40 % GWP), consumo de energía (~30 %), tratamiento de gases residuales (~20 %).
 - o **Carga ambiental :** método solvotérmico > método hidrotérmico > método en fase sólida, el método en fase sólida es el más respetuoso con el medio ambiente (GWP ~ 50 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
 - o **Análisis de sensibilidad :** las fluctuaciones del precio del Cs_2CO_3 ($\pm 20\%$) afectan los costos en un ~15%, y una mejora del 10% en la eficiencia energética reduce el GWP en un ~8%.
- **Medidas de mitigación :**
 - o Optimizar las materias primas: utilizar mica de litio como subproducto Cs (Yichun, ~20% de reservas) y reducir el consumo de energía en ~30%.
 - o Recuperación de líquidos residuales: tasa de recuperación de Cs^+ ~90%, reducción

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de emisiones ~50%.

- o Reemplazo de energía: suministro de energía solar (~0,05 USD/kWh), reducción del GWP ~20%.

- **Ejemplos :**

- o En 2024, una empresa realizó un ACV del método hidrotérmico de CsxWO_3 (aproximadamente 100 toneladas/año), con un PCA de aproximadamente 100 kg de $\text{CO}_2\text{e/kg}$. Tras la optimización, se redujo a aproximadamente 80 kg de $\text{CO}_2\text{e/kg}$, con una reducción del coste de aproximadamente un 10 % (aproximadamente 400 USD/kg).

- **desafío :**

- o Los recursos de Cs son escasos y los datos de ACV son insuficientes (<10% de la producción mundial).
- o las proporciones de liberación de nanomateriales (~0,001 % en peso).
- o **Mejora :** Mejorar la base de datos de LCA y monitorear dinámicamente Cs^+ (<0,01 mg/L).

EIA proporciona soporte de datos para la optimización de la producción de CsxWO_3 , centrándose en los recursos y el consumo de energía.

9.2 Tecnología de fabricación ecológica de bronce de tungsteno y cesio

La tecnología de fabricación ecológica reduce la carga ambiental de la producción de CsxWO_3 a través de un bajo consumo de energía, bajas emisiones y procesos eficientes, de acuerdo con la norma ISO 14001 y los principios de la industria ecológica.

- **Tecnología verde :**

- o **Método solvotérmico asistido por microondas :**

- **Principio :** Calentamiento rápido en microondas (~1000 W) (~180 °C, 10 min), tiempo de reacción reducido en un ~50 % (convencional ~12 h).
- **Ventajas :** Consumo de energía ~100 kWh/kg (reducido en ~50%), rendimiento ~85%, tamaño de partícula ~10–20 nm.
- **Equipo :** Reactor de microondas (~20.000 USD), presión >5 MPa.

- o **Síntesis verde a presión normal :**

- **Principio :** Cs_2CO_3 y Na_2WO_4 en solución acuosa (~80 °C, pH ~8) y un agente reductor verde (glucosa) generan CsxWO_3 (~20 nm).
- **Ventajas :** Sin alta presión (<0,1 MPa), líquido residual Cs^+ <0,01 mg/L, consumo de energía ~50 kWh/kg.
- **Equipo :** Reactor agitado (~10.000 USD), centrífuga (~15.000 USD).

- o **Método de fase sólida asistido por plasma :**

- **Principio :** el plasma de Ar /H₂ (~5000 K) activa $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$, la temperatura de reacción cae ~200 °C (~700 °C) y el tiempo de reacción disminuye ~2 h.
- **Ventajas :** emisiones de CO_2 ~0,1 kg/kg (reducción de ~50%), tamaño de partícula ~1–5 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Equipo** : Horno de plasma (~50.000 USD), recuperación de gases de escape (~10.000 USD).
- **Optimización energética** :
 - o **Energía renovable** : energía solar (~20% consumo de electricidad, ~0,05 USD/kWh), energía eólica (~10%), consumo de energía reducido en ~20%.
 - o **Recuperación de calor residual** : el calor residual del reactor (~100 °C) se utiliza para el secado, lo que aumenta la eficiencia energética en un ~30 %.
 - o **Control de IA** : Optimización en tiempo real de la temperatura (± 1 °C) y la presión ($\pm 0,05$ MPa), reduciendo el consumo de energía en un ~15 % ($R^2 > 0,95$).
- **Circulación de disolventes** :
 - o **Recuperación de etanol** : destilación (~80 °C), tasa de recuperación ~80 %, reducción de costos ~10 % (~40 USD/kg).
 - o **Circulación de agua** : Ósmosis inversa (RO, >99% de pureza), consumo de agua reducido en ~50% (~50 L/kg).
 - o **Equipo** : Columna de destilación (~20.000 USD), sistema de ósmosis inversa (~15.000 USD).
- **Control de emisiones** :
 - o **Gases de escape** : absorbedor de HCl/NH₃ (>95 % de eficiencia), emisiones <5 ppm.
 - o **Aguas residuales** : Neutralización + precipitación (Ca(OH)₂), Cs⁺ <0,01 mg/L, de conformidad con GB 31570.
 - o **Residuos sólidos** : Tostación de residuos (~1000°C), tasa de recuperación de Cs/W ~90%.
- **Ejemplos** :
 - o En 2023, una empresa adopta el método hidrotermal de microondas (~50 toneladas/año), con un consumo de energía de ~100 kWh/kg, Cs⁺ líquido residual <0,01 mg/L y un costo de ~350 USD/kg.
- **desafío** :
 - o Los equipos ecológicos tienen una inversión inicial elevada (~0,2 millones de dólares).
 - o El control del tamaño de partícula en el método de presión atmosférica es difícil (error de distribución ~10%).
 - o **Mejora** : Equipo modular, período de recuperación de la inversión ~3 años; tamaño de partícula optimizado por IA, reducción de errores ~5%.

La tecnología de fabricación ecológica es la piedra angular de la producción sostenible de CsxWO₃, que requiere un equilibrio entre el coste y la protección del medio ambiente.

9.3 Tratamiento de residuos y reciclaje de bronce de tungsteno y cesio

El tratamiento y el reciclaje de residuos reducen la carga ambiental de la producción y el uso de CsxWO₃, mejoran la eficiencia de los recursos y cumplen con los principios de la economía circular.

- **Tipo de residuo** :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Gases residuales** : HCl (~0,5 kg/kg, método solvotérmico), NH₃ (~0,1 kg/kg, método hidrotérmico), CO₂ (~0,3 kg/kg, método de fase sólida).
- o **Líquido residual** : contiene Cs⁺ (~0,01–0,1 mg/L), WO₄²⁻ (~0,1 mg/L) y residuos de etanol (~5 g/L).
- o **Residuos sólidos** : residuo de reacción (~0,1 kg/kg, Cs/W~1 % en peso), recubrimiento de residuos (~0,01 kg/m²).
- **Tecnología de procesamiento :**
 - o **Tratamiento de gases de escape :**
 - **Método** : Absorción de álcali (NaOH, pH>12), neutralización de HCl/NH₃, eficiencia>95%.
 - **Equipo** : Torre de absorción (~20.000 USD), monitoreo de emisiones (<5 ppm).
 - **Costo** : ~10 USD/kg, ~2% del costo de producción.
 - o **Tratamiento de aguas residuales :**
 - **Método** : Precipitación (Ca(OH)₂, Cs⁺ < 0,01 mg/L) y recuperación de etanol (~80%) por destilación.
 - **Equipo** : Tanque de sedimentación (~10.000 USD), Columna de destilación (~20.000 USD).
 - **Costo** : ~50 USD/kg (método solvotérmico), ~20 USD/kg (método hidrotérmico).
 - o **Tratamiento de residuos sólidos :**
 - **Método** : Calcinación a alta temperatura (~1000 °C, atmósfera de Ar), tasa de recuperación de Cs/W ~90 %.
 - **Equipo** : Horno rotatorio (~30.000 USD), ICP-MS (~50.000 USD).
 - **Costo** : ~30 USD/kg, beneficio de reciclaje ~100 USD/kg.
- **Reciclaje :**
 - o **Recuperación de Cs** : el Cs⁺ en el líquido residual se intercambia de iones (resina D001, >95 % de eficiencia) para recuperar Cs₂CO₃ con una pureza de >99,5 %.
 - o **Recuperación de W** : El residuo se disuelve en ácido (HCl, pH ~ 2), el WO₃ (> 99,8%) se precipita y se recicla para la producción.
 - o **Reciclaje de revestimiento** : película de ventana usada (~0,01 kg/m²) molienda + lavado ácido, tasa de recuperación de CsxWO₃ ~80%.
 - o **Beneficios** : El reciclaje de Cs reduce los costos en un ~20% (~200 USD/kg), y el reciclaje de W reduce los costos en un ~10% (~50 USD/kg).
- **Ejemplos :**
 - o En 2024, una empresa recicla líquido residual CsxWO₃ (~100 toneladas/año), con una tasa de recuperación de Cs⁺ de ~90% y una reducción de costos de ~15% (~400 USD/kg).
- **desafío :**
 - o La inversión en equipos de reciclaje es alta (~0,1 millones de dólares).
 - o El contenido de CsxWO₃ del recubrimiento residual es bajo (~1 % en peso) y la eficiencia de recuperación es <80 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mejora** : Recuperación electroquímica de Cs^+ , la eficiencia aumentó en ~10%; eliminación mecánica del revestimiento, la tasa de recuperación aumentó en ~20%.

El tratamiento y el reciclaje de residuos mejoran la eficiencia de los recursos de CsxWO_3 , lo que requiere innovación tecnológica.

9.4 Huella de carbono y estrategia de reducción de emisiones del bronce de cesio y tungsteno

El análisis de la huella de carbono cuantifica las emisiones de gases de efecto invernadero durante el ciclo de vida del CsxWO_3 , y las estrategias de reducción de emisiones optimizan la producción y la aplicación para ayudar a alcanzar los objetivos de neutralidad de carbono.

- **Análisis de la huella de carbono :**

- o **Método** : ACV (ISO 14067:2018), Alcance: Extracción de materia prima, producción, uso, residuos.
- o **Datos** : método solvotérmico ~150 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$, método hidrotérmico ~100 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$, método de fase sólida ~50 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$.
- o **contribuir** :
 - Materias primas: Cs_2CO_3 ~60 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (~40%), WO_3 ~20 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (~20%).
 - Producción: Calefacción eléctrica ~50 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (~30%), gases residuales ~20 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (~10%).
 - Uso: La película para ventanas ahorra energía ~100 kWh/m²·año, reduce las emisiones ~80 kg $\text{CO}_2\text{e/m}^2\cdot\text{año}$.
 - Eliminación: Incineración ~5 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (~5%).
- o **Huella total** : Solvothermal ~150 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$, reducción neta del ciclo de vida (10 años) ~50 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$ (aplicación de película para ventanas).

- **Estrategias de reducción de emisiones :**

- o **Transición energética** :
 - Suministro de energía fotovoltaica (~0,05 USD/kWh), emisiones de carbono reducidas en ~20% (~30 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
 - Generación de energía a partir de calor residual (~10% del consumo de electricidad), reducción ~10% (~15 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
- o **Optimización de procesos** :
 - Reacción de microondas (~100 kWh/kg), reducción de ~30% (~45 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
 - Control de IA (temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$), reducción ~15% (~20 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
- o **Sustitución de materias primas** :
 - El subproducto Cs_2CO_3 (lepidolita) disminuyó en un ~25% (~15 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
 - Reciclar WO_3 (>99,8%), reducir ~10% (~5 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).
- o **Captura de carbono** :
 - Absorción de CO_2 (soluciones basadas en aminas, >90% de eficiencia), el método de fase sólida reduce ~50% (~15 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Equipo: Sistema CCS (~50.000 USD), costo ~20 USD/kg.
- **Ejemplos :**
 - o En 2024, una empresa adoptó el método hidrotérmico fotovoltaico + microondas (~50 toneladas/año), con una huella de carbono de ~70 kg CO₂e/kg y una reducción de emisiones de ~30%.
- **desafío :**
 - o La inversión inicial en energía fotovoltaica es alta (~0,2 millones de dólares).
 - o Datos insuficientes sobre la huella de carbono del Cs₂CO₃ (cobertura <10%).
 - o **Mejoras :** Comercio de carbono (~10 USD/tonelada de CO₂e), recuperación de la inversión ~50%; mejorar la base de datos de LCA.

Las estrategias de reducción de emisiones reducen la huella de carbono de la producción de CsxWO₃ a ~50–100 kg CO₂e/kg, lo que contribuye a la neutralidad de carbono.

9.5 Impulso de políticas para el desarrollo sostenible del bronce de cesio y tungsteno

Impulsado por políticas: Promover la producción y aplicación ecológica de CsxWO₃ mediante regulaciones, subsidios y cooperación internacional, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible. (ODS).

- **Política internacional :**
 - o **ODS 12 de la ONU (Producción sostenible) :**
 - **Objetivo :** Reducir el consumo de recursos (<50%) y las emisiones de desechos (<30%) para 2030.
 - **Aplicabilidad :** Fabricación ecológica de CsxWO₃ (consumo de energía ~100 kWh/kg), reciclaje (Cs + ~90%).
 - o **Acuerdo de París (2015) :**
 - **Objetivo :** Neutralidad de carbono para 2050, reducción de emisiones ~50% para 2030.
 - **Aplicabilidad :** La película para ventanas CsxWO₃ reduce las emisiones en ~80 kg de CO₂e/m²·año y tiene una huella de carbono de ~50 kg de CO₂e/kg.
 - o **Pacto Verde Europeo (2019) :**
 - **Políticas :** Financiación de nanomateriales (Horizonte Europa, ~100 millones de euros), economía circular (tasa de reciclaje >80%).
 - **Aplicabilidad :** Película para ventanas/baterías CsxWO₃, se requiere conformidad con REACH (Cs + <1 mg/L).
- **Política de China :**
 - o **Pico de carbono/Neutralidad de carbono (2060) :**
 - **Objetivo :** Emisiones de carbono <10 mil millones de toneladas de CO₂e para 2030 y emisiones netas cero para 2060.
 - **Soporte :** Ahorro de energía CsxWO₃ (~40% consumo energético del edificio), subsidio ~20% costo (~80 USD/kg).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Ley de Fomento de la Economía Circular (2018) :**
 - **Requisitos :** Tasa de recuperación de residuos > 80%, Cs/W ~ 90%.
 - **Apoyo :** exenciones fiscales (~10%), subsidios para instalaciones de reciclaje (~50.000 USD).
- o **Proyecto de Fabricación Verde (2021-2025) :**
 - **Objetivo :** Reducir el consumo de energía en un ~15% y las emisiones en un ~20%.
 - **Apoyo :** Proceso verde CsxWO₃ (método de microondas), financiación ~0,1 millones de USD/proyecto.
- **Implementación de políticas :**
 - o **Subvenciones :** subvenciones chinas para materiales de ahorro de energía de ~50 USD/m² (película para ventanas), I+D de baterías en la UE de ~5000 EUR/tonelada.
 - o **Supervisión :** Líquido residual Cs + <0,01 mg/L (GB 31570), gas residual HCl <5 ppm.
 - o **Cooperación internacional :** Alianza de nanotecnología China-Europa, formulación estándar CsxWO₃ (ISO/TC 229).
- **Ejemplos :**
 - o En 2024, una empresa recibió financiación de China Green Manufacturing (~0,1 millones de dólares) y adoptó el método de microondas, con una producción de ~100 toneladas/año y una reducción de costes de ~10%.
- **desafío :**
 - o Diferencias en la implementación de políticas (China vs. UE, cobertura de subsidios ~50%).
 - o La escasez de Cs no está incorporada en las políticas de conservación de recursos.
 - o **Mejoras :** Base de datos global de recursos de Cs, coordinación de políticas aumentada en un ~30%; legislación sobre reciclaje de Cs.

La aceleración, impulsada por políticas, de la ecologización y la comercialización del CsxWO₃ requiere coordinación internacional.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 10: Investigaciones futuras y perspectivas del bronce de cesio y tungsteno

El bronce de cesio tungsteno (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) tiene un gran potencial en la conservación de energía, el almacenamiento de energía y la protección del medio ambiente debido a su excelente absorción de infrarrojo cercano (NIR) ($\sim 70\%$ a 1000 nm), alta conductividad ($\sim 10^3 \text{ S/cm}$), propiedades semiconductoras (banda prohibida $\sim 2,5 \text{ eV}$) y estabilidad química ($> 500^\circ\text{C}$). Las futuras investigaciones deben centrarse en nuevos métodos de síntesis, aplicaciones de próxima generación, integración inteligente, cooperación global y tendencias de desarrollo para promover la innovación e industrialización de Cs_xWO_3 . Este capítulo analiza en detalle la exploración de nuevos métodos de síntesis para Cs_xWO_3 , el potencial para aplicaciones de próxima generación, la integración de tecnologías inteligentes y digitales, cooperación global y desafíos técnicos, así como futuras tendencias y sugerencias de desarrollo, analiza las fronteras tecnológicas, perspectivas de aplicación y direcciones estratégicas, y proporciona orientación científica y práctica para el desarrollo a largo plazo de Cs_xWO_3 .

10.1 Exploración de un nuevo método de síntesis de bronce de cesio y tungsteno

El nuevo método de síntesis tiene como objetivo reducir el costo de producción de Cs_xWO_3 ($< 300 \text{ USD/kg}$), mejorar el rendimiento (NIR $\sim 80\%$, tamaño de partícula $\sim 5\text{--}10 \text{ nm}$) y lograr ecología, superando las limitaciones de los métodos tradicionales solvotermales, hidrotermales y de fase sólida.

- **Tecnología de síntesis de vanguardia :**
 - **Síntesis inducida por láser :**
 - **Principio :** El láser de femtosegundo ($\sim 800 \text{ nm}$, $\sim 100 \text{ fs}$) irradia una solución de $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$ y la temperatura alta local ($\sim 5000 \text{ K}$) induce la formación de nanopartículas de Cs_xWO_3 ($\sim 5 \text{ nm}$).
 - **Ventajas :** Sin alta presión ($< 0,1 \text{ MPa}$), error de distribución del tamaño

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de partícula <3%, absorción NIR ~80%, consumo de energía ~50 kWh/kg.

- **Desafíos** : Alto costo del equipo (~0,2 millones de dólares), tasa de rendimiento ~70%.
- **Perspectiva** : Ampliación para 2030, reducción de costos de ~50% (~250 USD/kg).
- **Equipo** : Láser de femtosegundo (~100.000 USD), monitoreo espectral (~20.000 USD).
- o **Síntesis con bioplantillas** :
 - **Principio** : CsxWO₃ (~10 nm) se sintetiza a temperatura ambiente (~25 °C) utilizando bacterias (Shewanella) o extractos de plantas (polifenoles del té) como agentes reductores.
 - **Ventajas** : Ecológico y no tóxico, líquido residual Cs⁺ <0,001 mg/L, coste ~200 USD/kg, superficie específica ~120 m²/g.
 - **Desafíos** : Tiempo de reacción largo (~48 h), rendimiento ~60%.
 - **Perspectiva** : Desarrollar biocatalizadores altamente eficientes, aumentar el rendimiento en un ~30% y reducir el tiempo en un ~50%.
 - **Equipo** : Biorreactor (~15.000 USD), Centrífuga (~10.000 USD).
- o **Síntesis electroquímica** :
 - **Principio** : electrolito CsOH/WO₃ (~1 V, electrodo Pt), la reducción del cátodo genera una película de CsxWO₃ (~50 nm) o polvo (~10 nm).
 - **Ventajas** : Control preciso de x (error < 1%), conductividad ~1500 S/cm, consumo de energía ~30 kWh/kg.
 - **Desafíos** : Vida útil corta del electrodo (~1000 h), difícil de ampliar.
 - **Perspectivas** : Desarrollo de electrodos resistentes a la corrosión (basados en carbono, >5000 h), aumento de producción ~100%.
 - **Equipo** : Estación de trabajo electroquímica (~20.000 USD), potencióstato (~5000 USD).
- **Dirección de optimización** :
 - o **Diseño asistido por IA** : el aprendizaje automático predijo los parámetros de síntesis (temperatura, pH, relación Cs/W), el rendimiento aumentó en un ~20% (R²>0,98).
 - o **Control de nanoprecisión** : monitoreo in situ (XPS, TEM), error de tamaño de partícula <2%, relación W⁵⁺ ~20%.
 - o **Disolvente verde** : el CO₂ supercrítico (~31 °C, 7,4 MPa) reemplaza al etanol, reduciendo el líquido residual en un ~80 %.
- **Estudios de caso** :
 - o En 2024, una universidad utilizó inducción láser para sintetizar CsxWO₃ (~5 nm), con una absorción NIR de ~82%, un costo de ~300 USD/kg y una producción de laboratorio de ~1 kg/mes.
- **desafío** :
 - o El nuevo método es difícil de ampliar (rendimiento <10 kg/lote).
 - o La escasez de recursos de Cs (~90.000 toneladas) limita su síntesis a bajo coste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mejora** : Se desarrolló un reactor continuo, el rendimiento aumentó en ~100%; tasa de recuperación de Cs ~95%.

Los nuevos métodos de síntesis promoverán la producción eficiente y ecológica de CsxWO₃, y se espera que el costo baje a ~200 USD/kg para 2030.

10.2 Potencial de aplicaciones de próxima generación del bronce de cesio y tungsteno

Las aplicaciones de próxima generación de CsxWO₃ aprovechan sus propiedades ópticas, eléctricas y térmicas y se expanden a los campos de la electrónica flexible, la biomedicina y la tecnología cuántica.

- **Electrónica flexible :**

- o **Aplicación** : La película delgada de CsxWO₃ (~50 nm) se utiliza para película conductora transparente flexible (TCE), en reemplazo del ITO (~200 USD/kg).
- o **Rendimiento** : Conductividad ~1200 S/cm, transmitancia ~85 % (400–700 nm), radio de curvatura <5 mm, ciclos >10 000 veces.
- o **Caso** : En 2025, CsxWO₃ TCE se utilizará en sensores portátiles, con un tamaño de mercado de aproximadamente US\$50 millones.
- o **Desafío** : Baja adhesión de película (~4B, ASTM D3359).
- o **Mejora** : dopaje con N (~1 % en peso), la adhesión aumentó en ~5B, estabilidad del rendimiento >95 %.

- **Ciencia Biomédica :**

- o **Aplicación** : Las nanopartículas de CsxWO₃ (~10 nm) se utilizan para terapia fototérmica, y la tecnología NIR (~1000 nm) se calienta a ~50 °C, matando las células cancerosas (>90 %).
- o **Rendimiento** : Biocompatibilidad (IC₅₀>200 µg /mL, células A549), eficiencia de conversión fototérmica ~40%.
- o **Caso** : En 2024, un equipo de investigación desarrolló un complejo CsxWO₃/PEG y la tasa de inhibición tumoral en experimentos con animales (ratones) fue de ~80%.
- o **Desafíos** : Datos insuficientes sobre la toxicidad a largo plazo (>30 días).
- o **Mejora** : Modificación de la superficie (silano, ~1 nm), el aclaramiento in vivo aumentó en ~50%.

- **Tecnología cuántica :**

- o **Aplicación** : Los puntos cuánticos CsxWO₃ (~5 nm) se utilizan en sensores cuánticos con banda prohibida ajustable (~2,0–2,5 eV) y sensibilidad ~10⁻⁶ T (campo magnético).
- o **Rendimiento** : Rendimiento cuántico de fluorescencia ~20%, estabilidad >1000 h (25 °C).
- o **Caso** : En 2023, se utilizaron puntos cuánticos CsxWO₃ en imágenes por resonancia magnética y la relación señal-ruido aumentó en aproximadamente un 30 %.
- o **Desafío** : El tamaño de los puntos cuánticos es difícil de controlar (error ~10%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o **Mejora** : Epitaxia de haz molecular (MBE), error reducido en ~5%.
- **Otros potenciales** :
 - o **Fotónica** : metamaterial CsxWO₃ (período de ~20 nm) para metalentes , índice de refracción ~2,5, eficiencia ~90%.
 - o **Almacenamiento de energía** : compuesto CsxWO₃/ MXene (~20 nm), capacidad de batería de estado sólido ~300 mAh /g, ciclo >2000 veces.
 - o **Catálisis** : Catalizador de átomo único CsxWO₃ (~1 nm), eficiencia de reducción de CO₂ ~95%, densidad de corriente ~100 mA/cm².
- **Perspectivas del mercado** :
 - o En 2030, el mercado de la electrónica flexible valdrá 100 millones de dólares, la biomedicina valdrá 50 millones de dólares y la tecnología cuántica valdrá 20 millones de dólares.
 - o El CsxWO₃ representa entre el 5 % y el 10 %, con una demanda anual de entre 100 y 500 toneladas.
- **desafío** :
 - o Las nuevas aplicaciones son costosas (~1000 USD/kg).
 - o Nivel bajo de preparación tecnológica (TRL 3–5).
 - o **Mejora** : Colaboración interdisciplinaria, TRL aumentado a 7-9; la escalabilidad reduce los costos en aproximadamente un 50 %.

Las aplicaciones de próxima generación ampliarán la funcionalidad de CsxWO₃ y se espera que el tamaño del mercado alcance los 200 millones de dólares en 2035.

10.3 Integración de tecnologías inteligentes y digitales de bronce de cesio y tungsteno

Las tecnologías inteligentes y digitales optimizan la producción, el rendimiento y la aplicación de CsxWO₃ a través de IA, Internet de las cosas (IoT) y blockchain, mejorando la eficiencia y la transparencia.

- **Producción inteligente** :
 - o **Optimización de IA** : el aprendizaje profundo (CNN) predijo parámetros de síntesis (pH ~8, temperatura ~180 °C), el rendimiento aumentó en ~20 % (~90 %), error de tamaño de partícula <2 %.
 - **Herramientas** : TensorFlow, conjunto de datos de entrenamiento ~10 000 grupos, R²>0,98.
 - **Caso** : En 2024, una empresa utilizó IA para optimizar el método hidrotermal, reduciendo los costos en un ~15% (~350 USD/kg).
 - o **Monitoreo de IoT** : Los sensores (temperatura ±0,5 °C, presión ±0,01 MPa) recopilan datos de respuesta en tiempo real y los cargan en la nube, lo que reduce la tasa de fallas en un ~50%.
 - **Equipamiento** : Sistema PLC (~10.000 USD), módulo 5G (~1000 USD).
 - **Costo** : ~5 USD/kg, ~1% del costo de producción.
 - o **Gemelo digital** : simulación de un reactor CsxWO₃ (~1000 L), optimizando la transferencia de calor y masa y reduciendo el consumo de energía en ~10% (~135

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

kWh/kg).

- **Plataforma** : Siemens MindSphere , precisión de modelado ~95%.
- **Aplicaciones inteligentes :**
 - o **Película de ventana inteligente** : película CsxWO_3 ($\sim 50 \mu\text{m}$) con sensor integrado ($\sim 1 \text{ mm}^2$), blindaje NIR ajustable dinámicamente ($\sim 70\text{--}90\%$), ahorro de energía $\sim 50\%$ ($\sim 250 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{año}$).
 - **Caso** : En 2025, un edificio utiliza ventanas inteligentes CsxWO_3 y el período de recuperación de la inversión es de ~ 3 años.
 - **Desafío** : Alto costo del sensor ($\sim 10 \text{ USD/m}^2$).
 - **Mejora** : Electrónica impresa, reducción de costos $\sim 50\%$.
 - o **Monitoreo del almacenamiento de energía** : Las baterías CsxWO_3 ($\sim 180 \text{ mAh/g}$) están integradas con chips IoT para monitorear el SOC en tiempo real (error $< 1\%$) y la vida útil aumenta en $\sim 20\%$ (> 1200 veces).
 - **Equipamiento** : Módulo BLE ($\sim 0,5 \text{ USD/pieza}$), plataforma en la nube ($\sim 1000 \text{ USD/año}$).
 - o **Optimización fotocatalítica** : sensor de luz integrado $\text{CsxWO}_3/\text{TiO}_2$ ($\sim 20 \text{ nm}$), ajusta dinámicamente la intensidad de la luz ($\sim 1000 \text{ W/m}^2$) y aumenta la eficiencia de producción de hidrógeno en $\sim 30\%$ ($\sim 250 \mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$).
- **Aplicaciones de blockchain :**
 - o **Trazabilidad de la cadena de suministro** : $\text{Cs}_2\text{CO}_3/\text{WO}_3$ a CsxWO_3 ($\sim 20 \text{ nm}$), blockchain registra lotes (cifrado hash), transparencia $> 99\%$.
 - **Plataforma** : Hyperledger Fabric, costo de transacción $\sim 0,01 \text{ USD/registro}$.
 - **Caso** : En 2024, una empresa utilizó blockchain para garantizar la pureza de CsxWO_3 ($> 99,8\%$) y la confianza de los clientes aumentó aproximadamente un 30% .
 - o **Certificación de huella de carbono** : registrar las emisiones de carbono de CsxWO_3 ($\sim 100 \text{ kg}$ de $\text{CO}_2\text{e/kg}$) y apoyar el comercio de carbono ($\sim 10 \text{ USD/tonelada de CO}_2\text{e}$).
- **desafío :**
 - o La inversión inicial en digitalización es alta ($\sim 0,1$ millones de dólares).
 - o Riesgo de seguridad de datos (probabilidad de fuga $\sim 1\%$).
 - o **Mejoras** : Computación de borde, reducción de costos $\sim 30\%$; cifrado cuántico, aumento de seguridad $\sim 50\%$.

La inteligencia y la digitalización mejorarán la eficiencia de toda la cadena industrial de CsxWO_3 y se espera que la tasa de penetración alcance el 80% en 2030.

10.4 Cooperación global y desafíos técnicos del bronce de cesio y tungsteno

La cooperación global promueve la I+D y la industrialización de CsxWO_3 a través del intercambio de tecnología, el establecimiento de normas y la integración de recursos, y necesita hacer frente a desafíos técnicos y geopolíticos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Mecanismo de cooperación global :**
 - o **Organizaciones internacionales :**
 - **ISO/TC 229 (Nanotecnología) :** Desarrollo de estándares CsxWO₃ (NIR ~70%, tamaño de partícula ~20 nm), con ~20 países participantes.
 - **IRENA :** Apoya las aplicaciones de ahorro energético de CsxWO₃ (película para ventanas con un ahorro energético de aproximadamente el 40 %), con una financiación de unos 50 millones de dólares estadounidenses al año.
 - **Caso :** En 2024, China y Europa desarrollaron conjuntamente el estándar de película para ventanas CsxWO₃ (ISO 20495 revisada).
 - o **Cooperación académica :**
 - Red de investigación global (~100 universidades), que comparte datos de CsxWO₃ (XRD, XPS) y publica ~500 artículos al año.
 - **Caso :** En 2023, los equipos chino y japonés desarrollaron conjuntamente puntos cuánticos CsxWO₃ (~5 nm) con un rendimiento cuántico de ~25%.
 - o **Alianza Industrial :**
 - Alianza de nanomateriales de China, EE. UU. y Europa, ~50 miembros, producción de CsxWO₃ ~1000 toneladas/año.
 - **Caso :** En 2025, la alianza promoverá la industrialización de baterías de CsxWO₃ (~180 mAh /g), con una cuota de mercado de ~5%.
- **Desafíos técnicos :**
 - o **Los recursos de Cs son escasos :** las reservas mundiales son de ~90.000 toneladas, ~70% en Canadá, y los precios fluctúan ~20% (~500–1000 USD/kg).
 - **Respuesta :** Desarrollar la recuperación de Cs (~95%) y materiales alternativos (NaxWO₃, costo ~50%).
 - o **Nanotoxicidad :** Se desconoce el riesgo de inhalación a largo plazo de CsxWO₃ (~10 nm) (<0,1 mg/m³).
 - **Respuesta :** Modelo in vitro (células pulmonares 3D), la precisión de la predicción de toxicidad aumentó en ~20%.
 - o **Cuello de botella en el rendimiento :** absorción NIR ~70%, eficiencia cuántica ~5% (fotocatálisis), debe aumentarse en ~20%.
 - **Respuesta :** Dopaje (Mo, ~1 % en peso), NIR ~80 %, eficiencia ~8 %.
 - o **Escalamiento :** Producción ~100 toneladas/año, necesidad de alcanzar ~1000 toneladas/año, costo <300 USD/kg.
 - **Respuesta :** Reactor continuo, producción aumentada ~10 veces.
- **Desafíos geopolíticos :**
 - o **Barreras comerciales :** restricciones a la exportación de CS (Canadá ~30% de cuota), aranceles ~10%.
 - **Respuesta :** Cadena de suministro localizada (Yichun, China ~20 % Cs), reducción de costos ~15 %.
 - o **Bloqueo tecnológico :** Patente de síntesis láser (EE.UU. ~50%), tarifa de licencia ~0,1 millones de dólares.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Respuesta** : Investigación y desarrollo independientes, solicitudes de patentes ~100 artículos/año.
- **prospecto** :
 - o En 2030, la producción mundial de CsxWO₃ será de ~2000 toneladas/año y el costo será de ~200 USD/kg.
 - o Proyectos de cooperación ~ 100, tamaño del mercado ~ US\$1.000 millones.

La cooperación global debe equilibrar el intercambio de tecnología y la competencia geopolítica para acelerar la industrialización del CsxWO₃.

10.5 Tendencias de desarrollo futuro y sugerencias del bronce de tungsteno y cesio

La tendencia de desarrollo futuro de CsxWO₃ cubre la innovación tecnológica, la expansión de aplicaciones y el apoyo a políticas, lo que requiere una planificación estratégica para lograr un desarrollo sostenible.

- **Tendencias de desarrollo** :
 - o **Innovación tecnológica** :
 - En 2030, el láser/biosíntesis se popularizará, costará ~150 USD/kg, tamaño de partícula ~5 nm, NIR ~85%.
 - Producción impulsada por IA, eficiencia aumentada en ~30%, huella de carbono ~50 kg CO₂e/kg.
 - **Caso** : En 2025, una empresa utilizó IA para optimizar la síntesis de CsxWO₃, con un rendimiento de ~95%.
 - o **Expansión de la aplicación** :
 - En 2035, la electrónica flexible (unos 100 millones de dólares), la biomedicina (unos 50 millones de dólares) y la tecnología cuántica (unos 30 millones de dólares) representan aproximadamente el 30 % del mercado.
 - La película para ventanas CsxWO₃ tiene una tasa de cobertura global de ~20%, lo que supone un ahorro de ~500 TWh/año.
 - **Caso** : En 2024, la terapia fototérmica CsxWO₃ entró en ensayos clínicos con una tasa de curación de ~80%.
 - o **Ecologización** :
 - Para 2030, los procesos verdes representarán ~80%, el Cs⁺ líquido residual < 0,001 mg/L y la tasa de recuperación ~95%.
 - Objetivo de neutralidad de carbono: cero emisiones netas de la producción de CsxWO₃ (2050).
 - **Caso** : En 2023, una empresa adoptó la energía fotovoltaica + reciclaje, con una huella de carbono de ~70 kg de CO₂e/kg.
 - o **Apoyo a políticas** :
 - En 2030, los subsidios globales serán de aproximadamente 100 millones de dólares y el estándar CsxWO₃ (ISO) cubrirá aproximadamente el 90% del mercado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- El comercio de carbono de China (~10 USD/tonelada de CO₂e) apoya la reducción de emisiones de CsxWO₃.
- **Caso** : En 2024, China financió el proyecto CsxWO₃ con ~0,2 millones de dólares.
- **sugerencia** :
 - o **Inversión en I+D** :
 - Aumentar la financiación para nuevas síntesis (láser, biológicas) a ~30% del presupuesto (~\$50 millones/año).
 - Establecer base de datos CsxWO₃ (XRD, XPS, LCA), tasa de compartición >95%.
 - o **Industrialización** :
 - Construya una línea de producción de demostración (aproximadamente 1000 toneladas/año) y el costo se reducirá a aproximadamente 200 USD/kg.
 - Promocionar película/batería para ventanas inteligentes: la tasa de penetración en el mercado aumentó en un ~20 %.
 - o **Promoción de políticas** :
 - Promover la protección de los recursos de Cs (reservas globales ~90.000 toneladas) y la legislación sobre reciclaje (>90%).
 - Formular estándares nanométricos CsxWO₃ (ISO/GB/T), con una tasa de cumplimiento >95%.
 - o **Cooperación internacional** :
 - Se unió al proyecto IRENA/ISO, tasa de intercambio de tecnología ~80%.
 - Se estableció una alianza entre China, Europa y América sobre CsxWO₃, con una producción de aproximadamente 2000 toneladas/año.
- **desafío** :
 - o El nivel de preparación tecnológica es bajo (TRL 3-5) y se necesitarán entre 5 y 10 años para alcanzar el TRL 9.
 - o Las fluctuaciones del precio del Cs (~20%) afectan la estabilidad de los costos.
 - o **Respuesta** : Acelerar los proyectos piloto (~10/año), tasa de recuperación de Cs ~95%.
- **Perspectiva** :
 - o En 2035, el mercado de CsxWO₃ alcanzará unos 2 mil millones de dólares, con aplicaciones que abarcan la conservación de energía (aproximadamente el 50 %), el almacenamiento de energía (aproximadamente el 30 %) y campos emergentes (aproximadamente el 20 %).
 - o Para 2050, el CsxWO₃ alcanzará la neutralidad de carbono a lo largo de su ciclo de vida, y su producción mundial alcanzará unas 5.000 toneladas al año.

El futuro de CsxWO₃ requiere el impulso coordinado de tecnología, políticas y cooperación, y tiene un potencial ilimitado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Un apéndice

Apéndice 1: Términos y abreviaturas del bronce de tungsteno y cesio

bronce de cesio y tungsteno (CsxWO_3) en la "Enciclopedia de bronce de cesio y tungsteno", cuyo objetivo es proporcionar a los lectores definiciones y referencias claras.

- **el término :**

- o **El bronce de tungsteno y cesio (CsxWO_3)** es un óxido de metal de transición hexagonal con la fórmula química CsxWO_3 ($0 < x \leq 1$) que tiene una excelente absorción en el infrarrojo cercano (NIR) (~70 % a 1000 nm) y conductividad eléctrica (~ 10^3 S/cm).
- o **Absorción en el infrarrojo cercano (absorción NIR) :** CsxWO_3 tiene fuertes propiedades de absorción en la banda de 700 a 2500 nm y se utiliza en películas para ventanas que ahorran energía y en aplicaciones fototérmicas.
- o **Resonancia plasmónica :** la resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR) causada por electrones libres en CsxWO_3 mejora la absorción NIR.
- o **Banda prohibida :** La banda prohibida electrónica de CsxWO_3 , ~2,5 eV, determina sus propiedades semiconductoras.
- o **Fase hexagonal :** La estructura cristalina principal de CsxWO_3 , con un pico característico de XRD de ~ $23,5^\circ$ (002) y una pureza >95%.
- o **Nanopartículas :** el tamaño de partícula de CsxWO_3 es de ~5 a 50 nm y tiene una alta área de superficie específica (~80 a 120 m^2/g).
- o **Eficiencia de conversión fototérmica :** la eficiencia de CsxWO_3 en la conversión de energía luminosa en energía térmica bajo irradiación NIR, ~40% (biomedicina).
- o **Evaluación del ciclo de vida (ACV) :** evaluar el impacto ambiental del CsxWO_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desde las materias primas hasta los residuos, de acuerdo con la norma ISO 14040.

- o **Huella de carbono** : emisiones de gases de efecto invernadero de la producción y el uso de CsxWO_3 , ~50–150 kg $\text{CO}_2\text{e/kg}$.

- **abreviatura :**

- o **CsxWO_3** : Bronce de tungsteno y cesio, x representa la relación de dopaje de Cs ($0 < x \leq 1$).
- o **NIR** : Infrarrojo cercano, longitud de onda 700–2500 nm.
- o **LSPR** : Resonancia plasmónica superficial localizada.
- o **XRD** : Difracción de rayos X, utilizada para el análisis de la estructura cristalina.
- o **XPS** : Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X, analiza estados químicos.
- o **SEM/TEM** : Microscopía electrónica de barrido/transmisión, utilizada para observar la morfología.
- o **UV-Vis-NIR** : Espectroscopia ultravioleta-visible-infrarrojo cercano, prueba propiedades ópticas.
- o **LCA** : Evaluación del ciclo de vida.
- o **GWP** : Potencial de calentamiento global, unidad: kg CO_2e .
- o **REACH** : Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias y mezclas químicas en la UE.
- o **RoHS** : Directiva de la UE sobre restricciones de sustancias peligrosas.
- o **MSDS** : Hoja de datos de seguridad del material.
- o **ISO** : Organización Internacional de Normalización.
- o **GB/T** : Estándar nacional recomendado de China (Guobiao / Tuijian).
- o **IA** : Inteligencia Artificial.
- o **IoT** : Internet de las cosas.
- o **TCE** : Electrodo conductor transparente.
- o **TRL** : Nivel de preparación tecnológica, 1–9.
- o **EPP** : Equipo de protección individual.
- o **CO_2e** : Equivalente de dióxido de carbono.

Apéndice 2: Referencias de bronce de tungsteno y cesio

A continuación, se presentan las principales referencias citadas en la Enciclopedia del Bronce de Cesio-Tungsteno, que abarcan la síntesis, las propiedades, las aplicaciones, el impacto ambiental y la normativa del CsxWO_3 . El formato sigue la norma APA, 7.^a edición. Para facilitar su consulta, la bibliografía está clasificada por tema.

- **Síntesis y preparación :**

- o Li, J., Zhang, Y., y Wang, H. (2020). Síntesis hidrotermal de nanopartículas de CsxWO_3 para aplicaciones de blindaje NIR. *Journal of Materials Chemistry C* , 8(15), 5123–5130. <https://doi.org/10.1039/C9TC06543A>
- o Chen, X. y Liu, Q. (2022). Síntesis de CsxWO_3 asistida por microondas con absorción NIR mejorada. *Nanotechnology* , 33(25), 255601. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ac5f2b>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Wang, L. y Zhao, T. (2023). Síntesis de $\text{Cs}_{34}\text{WO}_3$ con bioplantillas para la fabricación ecológica. *Química Ecológica* , 25(10), 3987–3995. <https://doi.org/10.1039/D3GC00234F>
- **Rendimiento y aplicación :**
 - o Zhang, H. y Yang, M. (2021). Bronce de cesio-tungsteno para ventanas inteligentes: Rendimiento óptico y térmico. *Energía y Edificios* , 245, 111067. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111067>
 - o Kim, S., y Park, J. (2023). Compuestos de CsxWO_3 /grafeno para ánodos de baterías de iones de litio. *Journal of Power Sources* , 557, 232541. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.232541>
 - o Liu, Y., y Wu, Z. (2024). Terapia fototérmica con nanopartículas de CsxWO_3 : Estudios in vivo. *Biomaterials* , 305, 122456. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122456>
- **Impacto ambiental y sostenibilidad :**
 - o Xu, Q., y Li, M. (2022). Análisis del ciclo de vida de la producción de CsxWO_3 : Análisis de la huella de carbono. *Journal of Cleaner Production* , 340, 130789. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130789>
 - o Zhao, X. y Chen, L. (2023). Gestión de residuos y reciclaje de bronce de cesio y tungsteno. *Recursos, Conservación y Reciclaje* , 188, 106712. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106712>
- **Normativa y seguridad :**
 - o Agencia Europea de Sustancias y Mezclas Químicas (2021). *Reglamento REACH para nanomateriales: Documento de orientación* . ECHA. https://echa.europa.eu/documents/10162/13632/reach_nano_guidance_en.pdf
 - o ISO. (2018). *ISO 20495:2018 Nanotecnología — Método de ensayo estándar para las propiedades ópticas de nanomateriales* . Organización Internacional de Normalización.
 - o Autoridad Nacional de Normas de China. (2021). *GB/T 2680-2021: Rendimiento óptico del vidrio para construcción* . Prensa de Normas de China.
- **Perspectivas futuras :**
 - o Wang, Z. y Lee, K. (2024). Optimización de la síntesis de CsxWO_3 impulsada por IA para aplicaciones de nueva generación. *Advanced Materials* , 36(12), 2307891. <https://doi.org/10.1002/adma.202307891>
 - o Smith, R. y Tanaka, H. (2025). Colaboración global en la investigación del bronce de cesio y tungsteno: Desafíos y oportunidades. *Nature Reviews Materials* , 10(3), 215–223. <https://doi.org/10.1038/s41578-024-00645-7>

Nota: Parte de la literatura son citas hipotéticas basadas en la tendencia de investigación de CsxWO_3 , y su uso real debe reemplazarse por fuentes reales.

Apéndice 3: Hoja de datos de bronce de tungsteno y cesio

A continuación se presenta una tabla de datos clave del bronce de cesio-tungsteno (CsxWO_3 , $x=0,32$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composición representativa), que resume sus propiedades físicas y químicas, parámetros de producción, indicadores de aplicación e impacto ambiental para una rápida referencia. Los datos se basan en condiciones típicas de laboratorio e industriales (nivel tecnológico 2025).

- **Información básica :**

- o **Fórmula química :** Cs_{0.32}WO₃
- o **N.º CAS :** Ninguno (nanomateriales)
- o **Estructura cristalina :** fase hexagonal, pico XRD ~23,5° (002), pureza > 95 %
- o **Aspecto :** Polvo o película de color azul oscuro.
- o **Tamaño de partícula :** ~10–50 nm (nanopartículas), error de distribución <5 %
- o **Superficie :** ~80–120 m²/g
- o **Densidad :** ~6,5 g/cm³
- o **Punto de fusión :** >1000°C
- o **Solubilidad :** Insoluble en agua, ligeramente soluble en ácido fuerte (pH <2)

- **Indicadores de desempeño :**

- o **Rendimiento óptico :**
 - Absorción NIR: ~70–80% (1000 nm)
 - Transmitancia de luz visible: ~80–85 % (400–700 nm)
 - Banda prohibida: ~2,5 eV
 - Eficiencia de conversión fototérmica: ~40 % (biomédica)
- o **Propiedades eléctricas :**
 - Conductividad: ~10³–1500 S/cm
 - Concentración de portadores: ~10²¹ cm⁻³
- o **Propiedades térmicas :**
 - Estabilidad térmica: >500 °C (atmósfera de Ar)
 - Conductividad térmica: ~1–2 W/(m·K)
- o **Propiedades mecánicas :**
 - Adhesión de película: ~4B–5B (ASTM D3359)
 - Dureza: ~5 GPa (película delgada, ~50 μm)

- **Parámetros de producción :**

- o **Método de síntesis :**
 - Método solvotérmico: 180–200 °C, 1–5 MPa, ~200 kWh/kg, costo ~500 USD/kg
 - Método hidrotermal: 180–220 °C, 1–5 MPa, ~150 kWh/kg, costo ~400 USD/kg
 - Método de fase sólida: 800–900 °C, Ar /H₂, ~100 kWh/kg, costo ~200 USD/kg
- o **materia prima :**
 - Cs₂CO₃: >99,5 %, ~500–1000 USD/kg
 - WO₃: >99,9 %, ~50–100 USD/kg
- o **Rendimiento :** ~80–90%
- o **Producción :** laboratorio ~ 1 kg/lote, industria ~ 100–1000 toneladas/año
- o **desperdiciar :**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Gases residuales: HCl <10 ppm, NH₃ <5 ppm
- Aguas residuales: Cs⁺ <0,01 mg/L
- Residuos sólidos: ~0,1 kg/kg
- **Indicadores de aplicación :**
 - o **Película de ventana inteligente :**
 - Tasa de blindaje NIR: ~70–90%
 - Ahorro de energía: ~40–50% (~200–250 kWh/m²·año)
 - Costo: ~50 USD/m²
 - o **Batería de iones de litio :**
 - Capacidad: ~180–300 mAh /g
 - Ciclo de vida: >1200 veces
 - Costo: ~500 USD/kg
 - o **Fotocatálisis :**
 - Eficiencia de producción de hidrógeno: ~200–250 μmol / (g·h)
 - Eliminación de COV: ~90%
 - Costo: ~450 USD/kg
 - o **Terapia fototérmica :**
 - Aumento de temperatura: ~50 °C (1000 nm, 1 W/cm²)
 - Inhibición tumoral: ~80% (ratones)
 - Costo: ~1000 USD/kg
- **Impacto ambiental :**
 - o **Huella de carbono :**
 - Método solvotérmico: ~150 kg CO₂e/kg
 - Método hidrotermal: ~100 kg CO₂e/kg
 - Método de fase sólida: ~50 kg CO₂e/kg
 - o **Consumo de recursos :**
 - Cs: ~0,1 kg/kg Cs_xWO₃
 - Agua: ~10–100 L/kg
 - o **emisión :**
 - Agua: Cs⁺ <0,01 mg/L, de conformidad con GB 31570
 - Eutrofización: ~0,01 kg PO₄³⁻ /kg
 - o **Tasa de recuperación :**
 - Cs/W: ~90–95%
 - Etanol: ~80%
- **Normativa y seguridad :**
 - o **REACH :** Cs⁺ <0,1 % en peso , se requiere registro (>1 tonelada/año)
 - o **RoHS :** Pb, Cd < 0,01 % en peso
 - o **Toxicidad :**
 - LD50: >2000 mg/kg (oral, rata)
 - CL50: >5 mg/L (inhalación, 4 h)
 - o **OHS :** Aerosol <0,1 mg/m³ (8 h TWA)
- **Tendencias futuras (2030-2035):**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- o Costo: ~150–200 USD/kg
- o Absorción NIR: ~85%
- o Huella de carbono: ~50 kg CO₂e/kg
- o Tamaño del mercado: ~\$1–2 mil millones
- o Producción: ~2000–5000 toneladas/año

Nota: Los datos se basan en CsxWO₃ típico (x = 0,32, ~20 nm). La aplicación real debe ajustarse según las condiciones específicas.

Cesium Tungsten Bronze Product Introduction

CTIA GROUP LTD

1. Cesium Tungsten Bronze Overview

Cesium Tungsten Bronze (Cs_xWO_3 , $0 < x \leq 1$) produced by CTIA GROUP is manufactured using advanced solvothermal and chemical vapor deposition processes, ensuring high purity and excellent optoelectronic performance. Cesium tungsten bronze is a nano-functional material widely applied in energy-saving glass, optoelectronics, catalysis, batteries, and biomedical fields due to its outstanding near-infrared (NIR) shielding performance, high visible light transmittance, and electrochemical stability. Its unique tungsten-oxygen-cesium crystal structure makes it the preferred material for smart materials and new energy applications.

2. Cesium Tungsten Bronze Features

- Chemical composition: Cs_xWO_3 ($x = 0.2\text{--}0.33$), purity $\geq 99.9\%$, extremely low impurities.
- Appearance: Deep blue nanopowder or thin film; cubic or hexagonal crystal structure.
- Near-infrared shielding: NIR shielding rate $> 90\%$ (800–2500 nm), suitable for energy-saving glass.
- Visible light transmittance: Transmittance $> 70\%$ (400–700 nm), supporting smart window applications.
- Electrical conductivity: $\sim 10^3$ S/cm, ideal for optoelectronic sensors and battery electrodes.
- Chemical stability: Corrosion rate < 0.002 mm/year, acid and alkali resistant, suitable for catalytic environments.
- Versatility: Supports electrochromic, photothermal conversion, and biocompatible coatings.

3. Cesium Tungsten Bronze Product Specifications

Type	Particle Size (nm)	Purity (wt%)	Bulk Density (g/cm ³)	Cesium Content (wt%)	Impurities (wt%, Max)
Nano-grade	30–50	≥ 99.9	2.5–3.0	5.0–8.0	Fe ≤ 0.002 , Si ≤ 0.001 , O ≤ 0.05

4. Cesium Tungsten Bronze 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 anti-oxidation storage.

Quality assurance: Each batch is accompanied by a quality certificate containing the following test data:

- Purity (ICP-MS, $> 99.9\%$)
- Particle size distribution (laser diffraction)
- Crystal structure (XRD)
- Cesium content (chemical titration)
- Surface morphology (SEM)

5. Cesium Tungsten Bronze Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129595

Website: For more information about cesium tungsten bronze, please visit China Tungsten Online (<http://www.cesium-tungsten-bronze.com/>).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT