




www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Guía completa sobre el óxido de tungsteno nano de alta pureza

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



Contenido

Prefacio

Propósito y público objetivo

Importancia de la investigación y la aplicación del óxido de nanotungsteno de alta pureza

Guía de estructura y uso del libro

Abreviaturas y símbolos

Abreviaturas de uso común (como $WO_{2.9}$, BTO, APT)

Símbolos y unidades físicas y químicas

Texto

Capítulo 1 Introducción

1.1 Historia y descubrimiento del óxido de nanotungsteno de alta pureza

1.2 Clasificación del óxido de tungsteno no estequiométrico (WO_3 , $WO_{2.9}$, $WO_{2.72}$, WO_2)

1.3 El estado del óxido de nanotungsteno de alta pureza en la cadena industrial del tungsteno 1.4 Estado actual y tendencias de la investigación y la aplicación 1.5 Alcance y objetivos de este libro

Capítulo 2 Propiedades básicas del óxido de nanotungsteno de alta pureza

2.1 Composición química y propiedades no estequiométricas

2.1.1 Fórmula química y relación oxígeno-tungsteno

Rango de contenido de $WO_{2.9}$ y oxígeno (19,0-19,5 % en peso)

Comparación con WO_3 , $WO_{2.72}$, WO_2

2.1.2 Mecanismo de formación de la relación no estequiométrica

Generación y estabilidad de vacantes de oxígeno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Efectos de las desviaciones estequiométricas en el rendimiento

2.1.3 Control de impurezas y pureza

Fuentes comunes de impurezas (Fe, Mo, Si)

Estructura cristalina y mecanismo del defecto de oxígeno

2.2.1 Tipo de estructura cristalina

Características estructurales de la fase monoclinica ($P2_1/n$)

Diferencias estructurales respecto al WO_3

2.2.2 Distribución microscópica de vacantes de oxígeno

Tipos de defectos puntuales y defectos superficiales

Cálculo de la densidad de vacantes de oxígeno ($10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$)

2.2.3 Métodos de caracterización estructural

Análisis de picos característicos de los espectros XRD y Raman

Relación entre los parámetros de red y los defectos

2.2.4 Estabilidad térmica y cambio de fase

Efecto de la temperatura en la estructura cristalina (estable a $<600 \text{ }^\circ\text{C}$)

2.3 Propiedades físicas de las transiciones de fase durante la oxidación y la reducción

2.3.1 Energía de banda prohibida

Rango de banda prohibida de $WO_{2.9}$ (2,4-2,8 eV)

Mecanismo de regulación de los defectos de oxígeno en la banda prohibida

Absorción característica de los espectros UV-Vis

2.3.2 Área superficial específica y tamaño de partícula

m^2/g de escala micrométrica (10-50 μm) y nanométrica (50-100 nm)

Efecto de la distribución del tamaño de partículas en el rendimiento

2.3.3 Características morfológicas

Morfologías comunes (nanopartículas, nanobarras, películas delgadas)

Termodinámica y cinética de la formación de la morfología

2.3.4 Propiedades ópticas

Causa del color (azul oscuro)

Propiedades de absorción y reflexión de la luz

2.3.5 Propiedades térmicas y mecánicas

Conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica

2.4 Resistencia mecánica de las nanoestructuras

2.4.1 Estado de oxidación y reactividad

Estados de oxidación mixtos de W^{5+} / W^{6+}

Reactividad con O_2 y H_2

2.4.2 Química de la superficie y sitios activos

Efecto catalítico de los defectos de oxígeno superficial

Rendimiento de adsorción (H_2O , CO_2 , NO_2)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4.3 Conductividad y propiedades electroquímicas

Rango de conductividad (10^{-3} - 10^{-2} S/cm)

Transferencia de electrones en reacciones electroquímicas

2.4.4 Resistencia a la corrosión y estabilidad

Estabilidad en ambientes ácidos y alcalinos

Riesgo de oxidación durante el almacenamiento a largo plazo

2.5 Nanoefectos en el rendimiento

2.5.1 Base física del efecto del tamaño

Confinamiento cuántico y efectos de superficie

Regulación de banda prohibida por tamaño nanométrico

2.5.2 Mecanismo de mejora del rendimiento

Eficiencia fotocatalítica mejorada ($>400 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)

Optimización del rendimiento electrocromático y de almacenamiento de energía.

2.5.3 Desafíos del nanoescalamiento

Problemas de aglomeración y dispersión

El equilibrio entre preparación y aplicación

Capítulo 3 Tecnología de preparación de óxido de nanotungsteno de alta pureza

3.1 Clasificación y descripción general de los métodos de preparación

3.2 Método en fase gaseosa (CVD, PVD)

3.2.1 Principios y parámetros del proceso

3.2.2 Ventajas y desventajas y escenarios de aplicación

3.3 Método de fase líquida (método hidrotérmico, método solvotérmico, reducción electroquímica)

3.3.1 Explicación detallada del proceso hidrotérmico

3.3.2 Control de la morfología por método solvotérmico

3.3.3 Ventajas ecológicas de la reducción electroquímica

3.4 Método de fase sólida (reducción de hidrógeno, mejorada con plasma)

3.4.1 Optimización del proceso de reducción de hidrógeno

3.4.2 Síntesis rápida mejorada con plasma

3.5 Desafíos y soluciones de la nanotecnología 3.6 Comparación entre la preparación industrial y de laboratorio

Capítulo 4 Detección y caracterización de óxido de nanotungsteno de alta pureza

4.1 Descripción general de la tecnología de detección

4.2 Análisis de la composición química (XRF, ICP-MS, determinación del contenido de oxígeno) 4.3

Caracterización de la estructura cristalina (XRD, espectroscopia Raman) 4.4 Análisis de morfología y

tamaño de partículas (SEM, TEM, analizador de tamaño de partículas) 4.5 Prueba de propiedades físicas

(BET, UV-Vis, conductividad) 4.6 Estándares y procesos de control de calidad

4.7 Problemas y soluciones comunes

Capítulo 5 Tecnología de producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Producción a escala de laboratorio (5 g, proceso de horno tubular)

5.1.1 Flujo del proceso y parámetros

5.1.2 Requisitos de equipos e instrumentos

5.2 Producción a escala industrial (100 kg/lote, proceso de horno rotatorio)

5.2.1 Diseño y flujo del proceso

Principio del proceso y mecanismo de reacción

Descripción general del proceso y disposición del equipo

5.2.2 Optimización de parámetros del proceso

Control de temperatura (650-750°C)

Caudal y relación de hidrógeno (5-10 m³/h)

Velocidad del horno y tiempo de residencia (1-2 rpm, 4-6 h)

Ajuste de la velocidad de alimentación (50-100 kg/h)

Monitoreo y retroalimentación en tiempo real

5.2.3 Sistemas de automatización y control

Integración y funcionalidad del sistema PLC

Configuración del sensor (temperatura, caudal, presión)

Operación remota y registro de datos

5.2.4 Gestión y optimización del consumo energético

Estimación del consumo de energía (2-3 kWh/kg)

Recuperación de calor residual y selección de energía

Optimización del aislamiento y mejora de la eficiencia

5.2.5 Consistencia del lote y control de calidad

Medidas de consistencia

5.3 Proceso de inspección de calidad y manejo de excepciones 5.3

Selección y pretratamiento de materia prima

5.3.1 Tipos y requisitos de materia prima

Especificaciones APT y WO₃

Fuente y reciclaje

5.3.2 Proceso de pretratamiento

Trituración y cribado

Precalentar para eliminar el agua y el NH₃

Normas de inspección de calidad

5.3.3 Almacenamiento y transporte

Condiciones de almacenamiento (sellado, a prueba de humedad)

5.4 Tratamiento de gases residuales y subproductos

5.4.1 Composición y fuentes de los gases de escape

NH₃, vapor de agua, H₂ residual

5.4.2 Proceso de tratamiento

Absorción en torre de pulverización (NaOH 2 M)

Adsorción de carbón activado y control de emisiones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4.3 Recuperación y utilización de subproductos

Reciclaje de NH_3 para la producción de fertilizantes

Reciclaje de materiales residuales de tungsteno

5.4.4 Normas y seguimiento ambiental

Límite de emisión ($\text{NH}_3 < 10$ ppm)

5.5 Requisitos de seguridad de producción y protección ambiental para el sistema de monitoreo en línea

5.5.1 Medidas de seguridad

Plan de prevención y emergencia de fugas de H_2

Equipos a prueba de explosiones y sistemas de protección contra incendios

5.5.2 Normas de protección ambiental

Objetivos de emisiones de carbono y consumo de energía

Clasificación y tratamiento de residuos

5.5.3 Capacitación del personal y procedimientos operativos

Contenido de la formación en seguridad

Manual de operaciones y requisitos de registro

5.6 Análisis de costos y evaluación económica

5.6.1 Estructura de costos

Costo de la materia prima (APT/WO_3)

Depreciación de energía y equipos

Costos de mano de obra y mantenimiento

5.6.2 Evaluación económica

Costo estimado por kg (40-50 USD)

Análisis del efecto de escala y de los beneficios

5.6.3 Estrategia de optimización

Reducir el consumo de energía y materias primas

Mejorar la productividad y la automatización

Capítulo 6 Campos de aplicación del óxido de tungsteno nano de alta pureza

6.1 Aplicaciones fotocatalíticas (descomposición del agua, control de la contaminación)

6.1.1 Mecanismo fotocatalítico

6.1.2 Estrategia de optimización del rendimiento

6.1.3 Datos sobre la eficiencia de producción de hidrógeno y la tasa de degradación

6.1.4 Casos reales y aplicaciones industriales

6.2 Aplicaciones electrocrómicas (ventanas inteligentes, pantallas)

6.2.1 Principio electrocrómico

6.2.2 Diseño y rendimiento del dispositivo

6.2.3 Optimización de la tasa de modulación y del tiempo de respuesta

6.2.4 Dispositivos electrocrómicos flexibles

6.3 Aplicaciones de almacenamiento de energía (supercondensadores, baterías de iones de litio)

6.3.1 Mecanismo de almacenamiento de energía y ventajas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los principios básicos del almacenamiento de energía electroquímica
Nano-WO_{2.9} de alta pureza (alta superficie específica, defectos de oxígeno)
Comparación con materiales tradicionales (grafito, MnO₂)
6.3.2 Aplicación de supercondensadores
6.3.2.1 Principios básicos de los supercondensadores
Mecanismo de doble capa y pseudocapacitancia
WO_{2.9} (alta conductividad, actividad superficial)
6.3.2.2 Diseño del material del electrodo
Preparación del electrodo de WO_{2.9} puro
Compuestos con materiales de carbono (CNT, grafeno)
Control de morfología (nanopartículas, nanocables)
6.3.2.3 Parámetros de rendimiento
Capacitancia específica (500-700 F/g)
Estabilidad en ciclismo (>10⁴ veces)
Potencia y densidad energética (40-50 Wh /kg)
6.3.2.4 Estrategia de optimización
Modificación del dopaje (elementos N, S)
Selección de electrolitos (acuosos vs orgánicos)
Aplicaciones flexibles de supercondensadores
6.3.2.5 Caso de industrialización
Proceso de producción en masa de supercondensadores
Escenarios de aplicación (vehículos eléctricos, estaciones de almacenamiento de energía)
6.3.3 Aplicaciones de las baterías de iones de litio
6.3.3.1 Principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio
Mecanismo de inserción del litio y el papel del WO_{2.9}
Compatibilidad de electrodos negativos y positivos
6.3.3.2 Diseño del material del electrodo
Síntesis de WO_{2.9} como material de electrodo negativo
Estrategia compuesta con Si y C
Efecto de la nanoestructura en el rendimiento de la inserción de litio
6.3.3.3 Parámetros de rendimiento
Capacidad específica (200-300 mAh /g)
Ciclo de vida (500-1000 veces)
Eficiencia de carga y descarga (>95%)
6.3.3.4 Estrategia de optimización
Recubrimiento de superficie (capa de carbono, polímero)
Combinación de electrolitos y aditivos
Mejora del rendimiento a gran escala
6.3.3.5 Caso de industrialización
Aplicación de WO_{2.9} en la producción de baterías de litio
Casos de vehículos y dispositivos portátiles de nueva energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 6.3.4 Otros sistemas de almacenamiento de energía
 - Potencial en baterías de iones de sodio
 - Compatibilidad de baterías de estado sólido con WO_{2,9}
 - Dirección de desarrollo futuro (alta densidad de energía, carga rápida)
- 6.4 Sensor de gas (detección de NO₂, H₂S)
 - 6.4.1 Mecanismo de detección
 - 6.4.2 Sensibilidad y selectividad
 - 6.4.3 Ventajas de detección de nanoestructuras
 - 6.4.4 Casos de aplicación práctica
- 6.5 Aplicaciones antibacterianas y biomédicas
 - 6.5.1 Principio de esterilización fotocatalítica
 - 6.5.2 Recubrimientos y dispositivos médicos
 - 6.5.3 Eficacia y seguridad antimicrobianas
 - 6.5.4 Investigación en biocompatibilidad
- 6.6 Electrónica flexible y campos emergentes
 - Preparación de WO₂ sobre sustratos flexibles
 - 6.6.2 Aplicaciones de dispositivos portátiles
 - 6.6.3 Campos emergentes (dispositivos cuánticos, materiales de IA)

Capítulo 7 Desafíos y desarrollo futuro del óxido de nanotungsteno de alta pureza

- 7.1 Desafíos técnicos (control de morfología, estabilidad, costo)
- 7.2 Producción ecológica y sostenibilidad
- 7.3 Tendencias de inteligencia y automatización
- 7.4 Potencial de aplicación emergente (diseño de materiales de IA, dispositivos cuánticos)
- 7.5 Futuras direcciones y perspectivas de investigación

Capítulo 8 Análisis de casos y guía práctica

- 8.1 Casos de preparación de laboratorio (nanobarras y películas)
- 8.2 Casos de producción industrial (optimización de 100 kg/lote)
- 8.3 Casos de aplicación (fotocatalizadores, ventanas electrocrómicas)
- 8.4 Solución de problemas y mejora de procesos
- 8.5 Guía de capacitación para profesionales

Capítulo 9 Diversos problemas de la tecnología de producción de óxido de tungsteno nano de alta pureza (catálogo detallado)

9.1 ¿Cómo controlar la pureza al preparar óxido de tungsteno nano de alta pureza?

- 9.1.1 Principios y requisitos del control de pureza
- 9.1.2 Principales factores que afectan la pureza (materias primas, proceso, equipos)
- 9.1.3 Tecnología de preparación de alta pureza (método químico húmedo, método en fase gaseosa)
- 9.1.4 Métodos de prueba y verificación de pureza

9.2 ¿Cómo preparar óxido de tungsteno nano de ultra alta pureza?

- 9.2.1 Definición y requisitos de aplicación de pureza ultraalta (>99,999 %)
- 9.2.2 Desafíos de la preparación de pureza ultraalta (impurezas traza, control ambiental)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2.3 Tecnología de ultrapurificación (intercambio iónico, purificación por destilación)

9.2.4 Análisis de caso: Práctica de preparación de $WO_{2.9}$ de ultraalta pureza

9.3 ¿Cómo eliminar impurezas como Fe en óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.3.1 Fuentes y efectos de impurezas como el Fe

9.3.2 Métodos químicos y físicos para la eliminación de impurezas

9.3.3 Optimización de procesos y estrategia de control de impurezas

9.3.4 Métodos para detectar y evaluar el contenido de Fe

9.4 ¿Cómo lograr nanopartículas al preparar óxido de nano-tungsteno de alta pureza?

9.4.1 Mecanismo de formación de nanopartículas

9.4.2 Factores clave que afectan la nanocristalización (nucleación, crecimiento)

9.4.3 Tecnología de preparación de nanopartículas (método hidrotérmico, método solvotérmico)

9.4.4 Caracterización y optimización de nanopartículas

9.5 ¿Cómo preparar una suspensión de dispersión de óxido de nano-tungsteno de alta pureza?

9.5.1 Propiedades y aplicaciones de las suspensiones de dispersión

9.5.2 Problemas de aglomeración y estabilidad durante la dispersión

9.5.3 Tecnología de dispersión (ultrasonido, modificación de superficies)

9.5.4 Caso de preparación de dispersión y control de calidad

9.6 ¿Cómo preparar partículas de óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.6.1 Definición y uso de pellets

9.6.2 Control del tamaño de partículas y morfología en la preparación de pellets

9.6.3 Tecnología de granulación (secado por aspersion, liofilización)

9.6.4 Pruebas de rendimiento y aplicación de pellets

9.7 ¿Cómo recubrir materiales de óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.7.1 Principios básicos de la tecnología de recubrimiento

9.7.2 Problemas de uniformidad y adhesión durante el recubrimiento

9.7.3 Método de recubrimiento (recubrimiento por pulverización, recubrimiento por centrifugación, rollo a rollo)

9.7.4 Optimización del proceso de recubrimiento y casos de aplicación industrial

apéndice

Apéndice A: Glosario de términos relacionados con el óxido de nanotungsteno de alta pureza

Soporte multilingüe en chino, inglés, japonés, coreano y alemán.

Apéndice B: Plan experimental para la preparación de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Procedimiento de laboratorio (escala 5 g, horno de tubo)

Proceso industrial (100 kg/lote, horno rotatorio)

Apéndice C: Lista de patentes relacionadas con el óxido de nanotungsteno de alta pureza

Número de patente, título, resumen

Apéndice D: Lista de normas para óxido de tungsteno nano de alta pureza

Comparación con estándares chinos, japoneses, alemanes, rusos, coreanos e internacionales

Apéndice E: Referencias de óxido de tungsteno nano de alta pureza

Artículos académicos (40 artículos)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Patentes (10 artículos)

Apéndice F: Lista de equipos e instrumentos necesarios para la producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Equipos de laboratorio e industriales

Apéndice G: Base de datos de morfología y rendimiento de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Datos de rendimiento de diferentes formas

Apéndice H: Preguntas frecuentes (FAQ)

Preguntas y respuestas sobre preparación, prueba y aplicación

CTIA GROUP LTD High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability, needs to avoid contamination
Calcium	≤ 5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification
Magnesium	≤ 5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed
		Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na and Cl affect electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors. Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details	
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control

Procurement Information

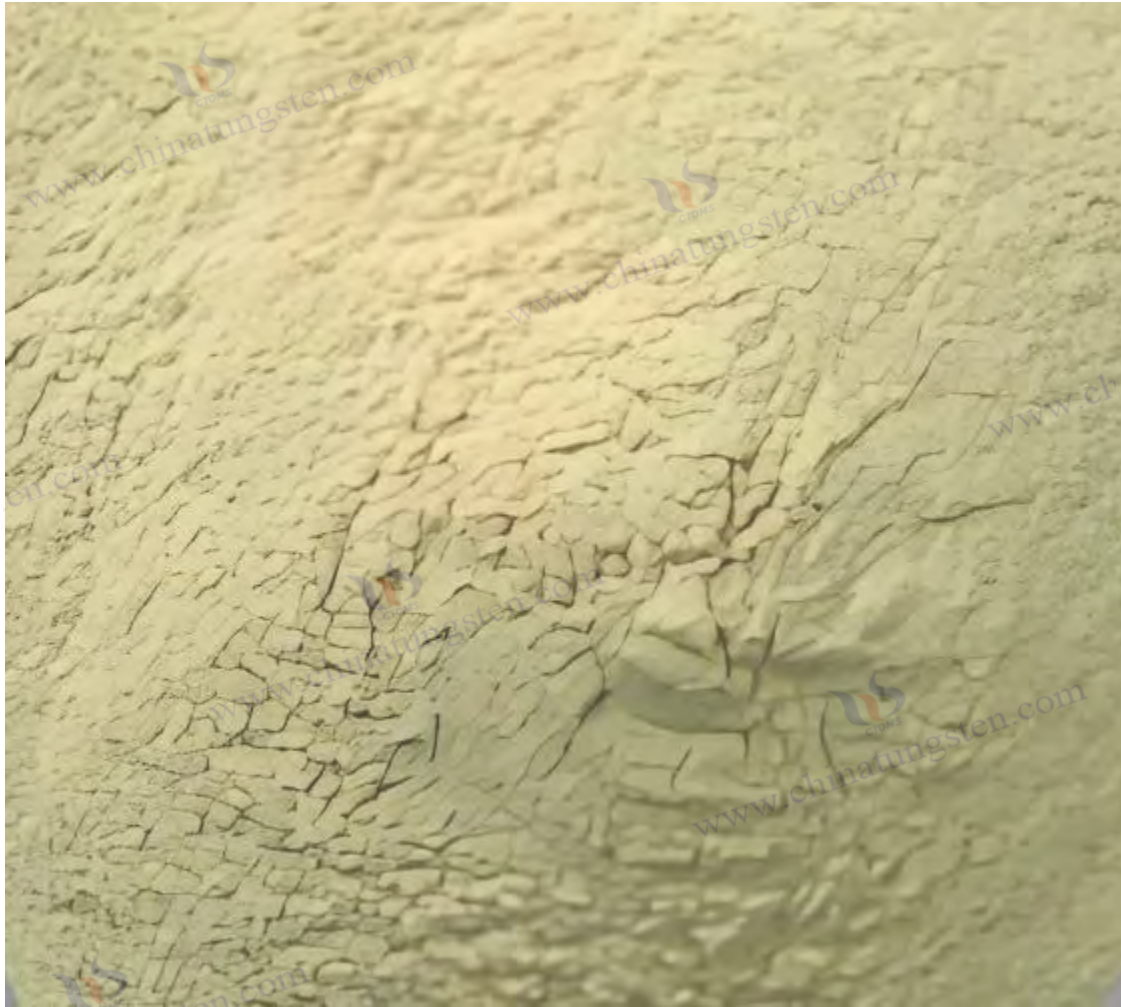
Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: <http://www.tungsten-powder.com>(product details, comments)

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

1.1 Historia y descubrimiento del óxido de nanotungsteno de alta pureza

El óxido de tungsteno nano de alta pureza, especialmente el óxido de tungsteno azul (BTO) representado por $WO_{2.9}$, es un importante objeto de investigación en la ciencia de los materiales de tungsteno, y su historia se remonta a la exploración química del siglo XIX. En 1867, el químico británico Henry Enfield Roscoe informó por primera vez de la formación de óxido de tungsteno azul en el laboratorio de la Royal Society en Londres. Observó la formación de un compuesto azul oscuro calentando ácido tungstico (H_2WO_4) a unos 500 °C en una atmósfera de hidrógeno (H_2), que más tarde se confirmó que era $WO_{2.9}$ no estequiométrico. Los registros experimentales de Roscoe mostraron que el color del compuesto provenía del estado de oxidación mixto del tungsteno (W^{5+} y W^{6+}), e inicialmente especuló que había defectos de oxígeno en su estructura. Su montaje experimental era sencillo, consistía únicamente en un tubo de vidrio y un generador de hidrógeno, pero este descubrimiento no sólo reveló el polimorfismo del elemento tungsteno, sino que también sentó las bases para investigaciones posteriores sobre los óxidos de tungsteno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ya en 1781, el químico sueco Carl Wilhelm Scheele descubrió el elemento tungsteno al descomponer scheelita (CaWO_4), pero el enfoque de la investigación en ese momento estaba en la extracción de tungsteno metálico, no en la forma de óxido. Scheele usó ácido nítrico para descomponer el mineral y obtener un precipitado de ácido tungstico amarillo, y este proceso se convirtió en el prototipo de la hidrometalurgia moderna. No fue hasta mediados del siglo XIX que el estudio de los óxidos de tungsteno se desarrolló gradualmente con el avance de la tecnología de análisis químico. El experimento de reducción de hidrógeno de Roscoe fue un punto de inflexión clave, y su método inspiró la posterior tecnología de preparación industrial. En la década de 1870, el químico alemán Robert Bunsen verificó aún más este proceso, usando un mechero Bunsen para calentar ácido tungstico y registró las condiciones de formación de óxido de tungsteno azul a diferentes concentraciones de oxígeno, como el color azul era más obvio cuando la concentración de oxígeno era inferior al 5%. Estos primeros estudios se basaban en la operación manual y la precisión del control de temperatura era de solo ± 20 °C, pero proporcionaron una valiosa inspiración para el desarrollo teórico de la química del tungsteno.

A principios del siglo XX, la investigación sobre óxidos de tungsteno pasó del laboratorio a la industrialización. En 1905, el químico francés Henri Moissan utilizó un horno de arco eléctrico para reducir el trióxido de tungsteno (WO_3), observó la generación estable de $\text{WO}_{2.9}$ a 500-600 °C y registró la ley de su cambio de color con la temperatura (600 °C azul, 800 °C púrpura). El trabajo de Moissan vinculó por primera vez los óxidos de tungsteno con la tecnología metalúrgica. Propuso que el $\text{WO}_{2.9}$ podría ser un intermediario en la producción de polvo de tungsteno. Esta idea se verificó en la década de 1920, cuando General Electric comenzó a utilizar $\text{WO}_{2.9}$ para preparar filamentos de tungsteno para la producción de lámparas incandescentes. En aquel entonces, el $\text{WO}_{2.9}$ tenía un gran tamaño de partícula (aproximadamente 20-50 μm) y una pureza de tan solo el 97-98 %, limitada por el calentamiento ineficiente de los hornos de lecho fijo (consumo de energía de 6-8 kWh/kg). Moissan también analizó la estabilidad del $\text{WO}_{2.9}$ en un entorno ácido y descubrió que su velocidad de disolución era inferior a 0,1 g/l a un $\text{pH} < 2$, lo que respalda teóricamente su aplicación industrial.

El auge de los materiales debido a la Segunda Guerra Mundial, y el valor industrial del óxido de tungsteno azul se destacó aún más. En la década de 1940, la American Tungsten Corporation desarrolló un horno de reducción continua, que aumentó la eficiencia de producción de $\text{WO}_{2.9}$ en aproximadamente un 30% y aumentó la pureza al 99%. El proceso implica la reducción de WO_3 con H_2 a 600-700 °C, y el producto se utiliza para fabricar carburo cementado y acero de tungsteno militar, como aleaciones a base de tungsteno para blindaje de tanques (dureza > 85 HRA). Durante este período, la investigación sobre $\text{WO}_{2.9}$ todavía se realizaba principalmente a nivel micrométrico, y el concepto de nanotecnología aún no había surgido. En la década de 1950, los científicos soviéticos propusieron un método de reducción de múltiples etapas, que optimizó el control del contenido de oxígeno a través del calentamiento paso a paso (500 °C, 650 °C, 800 °C), haciendo que la distribución del defecto de oxígeno del $\text{WO}_{2.3}$ sea más uniforme y reduciendo la desviación del contenido de oxígeno de $\pm 0,5$ % en peso a $\pm 0,3$ % en peso, sentando las bases para la tecnología moderna.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Desde el siglo XXI, los avances en nanotecnología han transformado por completo el nanoóxido de tungsteno de alta pureza. Después del año 2000, los investigadores utilizaron el método hidrotérmico (180 °C, 12-24 h, presión 1-2 MPa), la deposición en fase de vapor (CVD, 700 °C, gas portador Ar /H₂) y otras tecnologías para reducir el tamaño de partícula de WO_{2.9} a 50-100 nm y aumentar la superficie específica a 10-40 m²/g. Este cambio ha demostrado un gran potencial en los campos de la fotocatalisis, el electrocromismo, el almacenamiento de energía, etc. En 2005, un equipo de investigación de la Universidad de Tokio en Japón informó por primera vez que la eficiencia de producción de hidrógeno fotocatalítico de nano WO_{2.9} alcanzó los 300 μmol·g⁻¹·h⁻¹, superando ampliamente los 50-100 μmol·g⁻¹·h⁻¹ de los materiales de tamaño micrométrico. CTIA GROUP ha estado involucrado en la producción de óxido de tungsteno desde la década de 1990 y ha sido testigo de esta transformación. Introdujo la nanotecnología después de 2010 y produce alrededor de 500 toneladas de nano WO_{2.9} anualmente, lo que representa el 20% del mercado nacional.

El WO_{2.9} a escala nanométrica no solo mejora el rendimiento, sino que también amplía los escenarios de aplicación. En la década de 2010, una investigación del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) mostró que la brecha de banda (2,4-2,8 eV) del nano-WO_{2.9} es adecuada para la absorción de luz visible, y la conductividad (10⁻³-10⁻² S/cm) admite aplicaciones de almacenamiento de energía. En 2015, el Instituto Max Planck de Alemania reveló la distribución de defectos de oxígeno en la superficie del WO_{2.9} (densidad de aproximadamente 10¹⁹-10²¹ cm⁻³) mediante microscopía de efecto túnel de barrido (STM), lo que proporcionó una explicación microscópica de su actividad fotocatalítica. Como país con abundantes recursos de tungsteno (las reservas representan el 60 % del mundo), China ha tomado la delantera en este campo. En 2018, el programa “Horizonte 2020” de la UE financió un proyecto de división de agua basado en WO_{2.9}, con una producción anual de hidrógeno de 1.000 kg (escala de laboratorio), demostrando su potencial en energía limpia.

La historia del nanoóxido de tungsteno de alta pureza también está estrechamente relacionada con el auge de la tecnología de protección ambiental. Después de 2010, la demanda mundial de energía limpia se disparó y las propiedades fotocatalíticas del WO_{2.9} se estudiaron ampliamente. Por ejemplo, la Universidad Nacional Australiana utilizó nano-WO_{2.9} para desarrollar un recubrimiento fotocatalítico con una eficiencia del 90 % en la degradación de COV (compuestos orgánicos volátiles). Su aplicación en el campo del electrocromismo ha impulsado el desarrollo del mercado de ventanas inteligentes, y se espera que el tamaño del mercado global alcance los mil millones de dólares estadounidenses en 2025. CTIA GROUP ha desarrollado una tecnología de reducción asistida por microondas en colaboración con universidades, reduciendo el consumo de energía a 1,5-2 kWh/kg y acortando el tiempo de reacción a 1-2 horas. Estos nodos históricos muestran que el óxido de nanotungsteno de alta pureza ha pasado de ser una curiosidad química en el siglo XIX a un material multifuncional en el siglo XXI, y ha experimentado una profunda transformación de la teoría a la práctica.

estequiometría (WO₃, WO_{2.9}, WO_{2.83}, WO_{2.72}, WO₂)

El tungsteno tiene una variedad de estados de oxidación (+2 a +6) debido a su alta estructura de capa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrónica ($5d^4 6s^2$), y sus óxidos muestran una variedad de características no estequiométricas, es decir, compuestos con razones oxígeno-tungsteno (O/W) que se desvían de los números enteros. Estos óxidos difieren significativamente en la estructura cristalina, las propiedades físicas y químicas y los campos de aplicación, y son los principales objetos de investigación de la ciencia de los materiales de tungsteno. La clasificación de los óxidos de tungsteno no estequiométricos no solo refleja la complejidad de la química del tungsteno, sino que también afecta directamente su uso industrial y la selección de tecnología. Esta sección presenta en detalle la composición química, las características estructurales, los métodos de preparación, las diferencias de propiedades y el valor de aplicación de cuatro formas típicas: WO_3 (trióxido de tungsteno), $WO_{2.9}$ (óxido de tungsteno azul), $WO_{2.72}$ (óxido de tungsteno púrpura) y WO_2 (dióxido de tungsteno), proporcionando apoyo teórico para los capítulos posteriores.

1.2.1 Trióxido de tungsteno/óxido de tungsteno amarillo/tungsteno amarillo (trióxido de tungsteno, WO_3 , óxido de tungsteno amarillo, YTO)

El WO_3 es un compuesto de tungsteno completamente oxidado, con una relación oxígeno-tungsteno de 3:1 y un contenido teórico de oxígeno del 20,69 % en peso. Presenta un aspecto amarillo o amarillo claro, y su estructura cristalina es principalmente monoclinica (P_2/c , grupo espacial), con parámetros de red de $a = 7,306 \text{ \AA}$, $b = 7,540 \text{ \AA}$, $c = 7,692 \text{ \AA}$ y $\beta = 90,91^\circ$. La energía de banda prohibida del WO_3 se encuentra entre 2,6 y 3,0 eV, y es un semiconductor de banda prohibida ancha con una alta capacidad de absorción de luz ultravioleta (borde de absorción de aproximadamente 400 nm). Su estructura es una red tridimensional formada por octaedros WO_6 conectados por vértices comunes o aristas comunes, con un punto de fusión de aproximadamente $1473 \text{ }^\circ\text{C}$, una estabilidad térmica extremadamente alta y puede mantener la integridad estructural incluso a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, con un coeficiente de expansión térmica de aproximadamente $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

El WO_3 se prepara generalmente calcinando paratungstato de amonio (APT, $(NH_4)_{10} [H_2W_{12}O_{42}] \cdot 4H_2O$) o ácido tungstico (H_2WO_4) a $500\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$ en aire. En la industria, el horno de calcinación debe estar equipado con un sistema de control de temperatura preciso (precisión $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) para evitar que la sobrecombustión genere $WO_{2.9}$ o pérdida por volatilización. En la década de 1870, los químicos alemanes prepararon por primera vez WO_3 calcinando ácido tungstico para usarlo como colorante de vidrio. Su tono amarillo proviene de las transiciones de electrones dd. En la década de 1890, empresas estadounidenses lo aplicaron a la producción de polvo de tungsteno, convirtiéndolo en $WO_{2.9}$ mediante reducción de hidrógeno como precursor del óxido de tungsteno azul. Datos industriales muestran que la pureza del WO_3 puede alcanzar el 99,95 %, y el contenido de impurezas (como Fe, Mo, Si) se controla por debajo de 20 ppm, lo que permite satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta gama como la fotocatalisis y el electrocromismo.

WO_3 sienta las bases para su aplicación. Su energía de banda prohibida le da alta actividad fotocatalítica bajo luz ultravioleta. Por ejemplo, la eficiencia de degradación del colorante Rodamina B puede alcanzar el 90%, y la constante de velocidad de reacción es de aproximadamente $0,05 \text{ min}^{-1}$. Sin embargo, la tasa de utilización de la luz visible es solo de alrededor del 40%, y el rendimiento debe mejorarse

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante dopaje (como Ti, N) o modificación de la superficie. El rendimiento electrocromico se basa en el mecanismo de inserción/extracción de Li^+ o H^+ , con una tasa de modulación del 70-80% y una vida útil de >5000 veces, que es adecuada para ventanas y pantallas inteligentes. Los sensores de gas utilizan su adsorción superficial para detectar NO_2 con una sensibilidad de hasta 50 y un tiempo de respuesta de aproximadamente 10 s. El WO_3 es más estable en ambientes ácidos (pH 2-4) que en ambientes alcalinos (pH >10) y la tasa de disolución es <0,05 g/L.

El WO_3 surgió a principios del siglo XX. En la década de 1920, la General Electric Company de Estados Unidos utilizó WO_3 para producir alambre de tungsteno con una producción anual de aproximadamente 500 toneladas, lo que impulsó el desarrollo de la industria de la iluminación. El proceso consiste en reducir WO_3 a 700 °C para producir polvo de tungsteno con una pureza de aproximadamente el 99 %. En la década de 1940, el WO_3 se utilizó para fabricar herramientas de carburo cementado, y la pureza de su polvo de tungsteno reducido influyó directamente en la dureza de la herramienta (>90 HRA). Después del siglo XXI, la aplicación del WO_3 en el campo de la fotocatalisis ha cobrado gran importancia. En 2010, un equipo de investigación alemán informó que la eficiencia de producción de oxígeno del WO_3 en agua en descomposición bajo luz ultravioleta alcanzó los $200 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, y la eficiencia de producción de hidrógeno fue de aproximadamente $100 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Estos casos demuestran que el WO_3 es el material básico de la cadena industrial del tungsteno y que su funcionalidad se amplía aún más mediante modificaciones.

1.2.2 Tungsteno azul, $\text{WO}_{2.9}$ (Óxido de tungsteno azul, BTO)

$\text{WO}_{2.9}$ es el objeto principal de investigación de este libro. La relación oxígeno-tungsteno es de aproximadamente 2,9:1, el contenido de oxígeno varía entre el 19,0 y el 19,5 % en peso, y tiene una apariencia azul oscura debido a la presencia de defectos de oxígeno. Su estructura cristalina es monoclinica ($\text{P2}_1/\text{n}$), los parámetros de red están ligeramente distorsionados ($a = 7,285 \text{ \AA}$, $b = 7,518 \text{ \AA}$, $c = 7,670 \text{ \AA}$), la brecha de banda se reduce a 2,4-2,8 eV y la tasa de absorción de la luz visible (400-700 nm) es del 70-80 %. Aproximadamente el 10-15 % de los átomos de tungsteno en la estructura están en el estado de oxidación +5 (W^{5+}), y el resto están en el estado +6 (W^{6+}). Este estado de oxidación mixto mejora la conductividad ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$) y la actividad superficial. La densidad de defectos de oxígeno es de aproximadamente $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$, medida mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS), lo que mejora significativamente sus propiedades fotocatalíticas y electroquímicas.

El $\text{WO}_{2.9}$ se logra principalmente reduciendo WO_3 o APT con hidrógeno, con condiciones típicas de 600-750 °C, un caudal de H_2 de 5-10 m^3/h y un aislamiento de 2 a 4 horas. Durante el proceso de reducción, la formación de defectos de oxígeno se controla mediante la temperatura, la concentración de H_2 y el tiempo de residencia. Por ejemplo, el $\text{WO}_{2.72}$ se genera fácilmente cuando la temperatura sube a 800 °C, mientras que el WO_3 permanece por debajo de 550 °C. En la década de 1890, químicos alemanes estudiaron sistemáticamente este proceso por primera vez y registraron la ley de generación del $\text{WO}_{2.9}$ utilizando un horno tubular. La concentración de H_2 debe mantenerse entre el 20 y el 30 % en volumen para garantizar una reducción uniforme. A mediados del siglo XX, la industria estadounidense amplió su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

escala y lo produjo en un horno de lecho fijo, con una producción anual de unas 1.000 toneladas, un consumo energético de unos 5-6 kWh/kg y una desviación del contenido de oxígeno de $\pm 0,3\%$ en peso .

nanoescala logró un gran avance en el siglo XXI. Después del año 2000, el método hidrotérmico ($180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 12-24 h, presión 1-2 MPa) y la deposición en fase de vapor (CVD, $700\text{ }^{\circ}\text{C}$, gas portador Ar /H₂) se convirtieron en la corriente principal, con un tamaño de partícula controlado de 50-100 nm y una superficie específica de 10-40 m²/g. En 2005, un equipo de investigación japonés sintetizó nanopartículas de WO_{2.9} mediante el método hidrotérmico, con una uniformidad morfológica del 90 %, y el análisis TEM mostró que la desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula era <10 nm. CTIA GROUP logró una producción de 100 kg/lote mediante un horno rotatorio, con una desviación del contenido de oxígeno controlada a $\pm 0,1\%$ en peso , una pureza >99,5 %, un rendimiento del 85 % y un consumo de energía reducido a 2-3 kWh/kg. La tecnología de reducción asistida por microondas acorta el tiempo de reacción a 1-2 horas, lo que demuestra el potencial de ecologización.

WO_{2.9} se beneficia de su versatilidad. En el campo de la fotocatalisis, su eficiencia de producción de hidrógeno puede alcanzar $400\text{-}500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, la eficiencia de degradación de materia orgánica (como el tolueno) es >95%, y la constante de velocidad de reacción es de aproximadamente $0,1\text{ min}^{-1}$. La tasa de modulación de la película electrocrómica es >85%, el tiempo de respuesta es <5 s, y la vida útil es >10⁴ veces, lo que es adecuado para ventanas y pantallas inteligentes. En el campo del almacenamiento de energía, la capacitancia específica alcanza 500-700 F/g y la densidad de potencia es 40-50 Wh /kg, que es mejor que los materiales de carbono tradicionales (como el carbón activado, 200-300 F/g). La sensibilidad del sensor de gas para detectar NO₂ alcanza 100, el tiempo de respuesta es <8 s y el límite de detección es <1 ppm. Estas características lo convierten en un punto clave en la investigación sobre nanomateriales.

El WO_{2.9} ya era evidente a mediados del siglo XX. En la década de 1950, la Unión Soviética producía polvo de tungsteno mediante WO_{2.9}, con una producción anual de unas 2000 toneladas, que se utilizaba para álabes de turbinas de motores de aeronaves, y la uniformidad del tamaño de partícula de su polvo de tungsteno alcanzaba el 95 %. Después del siglo XXI, su aplicación en campos de alta tecnología se ha expandido rápidamente. En 2015, las empresas estadounidenses utilizaron nano WO_{2.9} para fabricar ventanas electrocrómicas, con un valor de producción anual de unos 200 millones de dólares estadounidenses y un espesor de película de unos 500 nm. El WO_{2.9} también es el principal intermediario para la producción de polvo de tungsteno. Alrededor del 60 % del polvo de tungsteno del mundo depende de esta ruta. Su economía (40-50 USD/kg) y su equilibrio de rendimiento lo convierten en la primera opción. En 2018, un equipo de investigación coreano informó que la aplicación de WO_{2.9} en la electrónica flexible aumentó la conductividad en un 20%, lo que demuestra su potencial emergente.

1.2.3 Óxido de tungsteno violeta, WO_{2.72} (Óxido de tungsteno violeta, VTO)

WO_{2.72} es 2.72:1, el contenido de oxígeno es de aproximadamente 18.5-19.0 % en peso y la apariencia es púrpura o púrpura oscuro. Su estructura cristalina es monoclinica (P2₁/m), y los parámetros de red

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

son $a = 12.10 \text{ \AA}$, $b = 3.78 \text{ \AA}$, $c = 5.95 \text{ \AA}$, $\beta = 94.5^\circ$. En comparación con $\text{WO}_{2.9}$, tiene más defectos de oxígeno, la brecha de banda se reduce a 2.1-2.3 eV y la tasa de absorción de luz infrarroja aumenta al 60%. Su morfología es principalmente en forma de aguja o forma de varilla (200-500 nm de largo y 20-50 nm de diámetro), con un área superficial específica de hasta $50 \text{ m}^2/\text{g}$, fuerte actividad superficial y adecuado para aplicaciones catalíticas. La espectroscopia Raman muestra que sus picos característicos están a 680 cm^{-1} y 820 cm^{-1} , lo que refleja el modo de vibración de los defectos de oxígeno.

$\text{WO}_{2.72}$ requiere condiciones reductoras más fuertes, como $750\text{-}850 \text{ }^\circ\text{C}$, caudal de H_2 de $10\text{-}15 \text{ m}^3/\text{h}$ y tiempo de reacción de 3-5 horas. En la década de 1920, los científicos soviéticos prepararon por primera vez $\text{WO}_{2.72}$ mediante reducción a alta temperatura de WO_3 , registrando su morfología acicular con una distribución de longitud de $100\text{-}600 \text{ nm}$. El análisis SEM mostró que la relación de aspecto era de aproximadamente 10:1. Después de 2000, el método hidrotérmico combinado con el proceso de reducción logró la síntesis de $\text{WO}_{2.72}$ a nanoescala, con una precisión de control de la morfología de $\pm 10 \text{ nm}$. Su densidad de defectos de oxígeno (aproximadamente 10^{21} cm^{-3}) le permite un buen rendimiento en reacciones catalíticas. Por ejemplo, la eficiencia de producción de oxígeno en la descomposición del agua es un 20-30% mayor que la del WO_3 , alcanzando $250 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, y la eficiencia de producción de hidrógeno es de aproximadamente $150 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$.

$\text{WO}_{2.72}$ tiene poca estabilidad térmica ($>900 \text{ }^\circ\text{C}$ se convierte fácilmente en WO_2), lo que limita su aplicación a alta temperatura. En la industria, se utiliza como un intermedio alternativo en la producción de polvo de tungsteno. Su estructura similar a una aguja mejora la fluidez y la densidad de compactación del polvo de tungsteno (alrededor del 15%). En la década de 1950, las empresas estadounidenses intentaron reemplazar $\text{WO}_{2.72}$ con $\text{WO}_{2.9}$, pero debido a su alto costo de producción ($50\text{-}60 \text{ USD/kg}$) y el consumo de energía de $3\text{-}4 \text{ kWh/kg}$, no fue ampliamente promovido. Los experimentos de CTIA GROUP han demostrado que $\text{WO}_{2.72}$ tiene potencial en portadores de catalizadores específicos, como la eficiencia de descomposición de COV que alcanza el 90%, pero su eficiencia económica aún necesita ser optimizada y el costo necesita ser reducido a menos de 40 USD/kg .

La investigación de aplicaciones de $\text{WO}_{2.72}$ se aceleró a principios del siglo XXI. En 2010, un equipo de investigación coreano informó que la sensibilidad de las nanobarras de $\text{WO}_{2.72}$ en sensores de gas alcanzó 120, que era mejor que los 100 de $\text{WO}_{2.9}$, y el tiempo de respuesta fue $<6 \text{ s}$. Sin embargo, su dificultad de preparación y problemas de estabilidad limitan su industrialización. La producción anual mundial de $\text{WO}_{2.72}$ es de aproximadamente 500 toneladas, lo que representa solo el 5% del óxido de tungsteno, y se utiliza principalmente en campos especiales como catalizadores de aviación y nanorecubrimientos. En 2015, las empresas japonesas utilizaron $\text{WO}_{2.72}$ para desarrollar recubrimientos antibacterianos con una tasa de esterilización de $>95\%$, lo que demuestra su potencial en biomedicina.

1.2.4 Tungsteno marrón, Óxido de tungsteno marrón, WO_2 (Óxido de tungsteno marrón)

WO_2 tiene una relación oxígeno-tungsteno de 2:1 y un contenido de oxígeno de aproximadamente 16,03 % en peso . Es marrón o marrón oscuro y es el óxido de tungsteno con el estado de oxidación más bajo. Su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructura cristalina es monoclinica ($P2_1/c$), con parámetros reticulares de $a=5,57 \text{ \AA}$, $b=4,89 \text{ \AA}$, $c=5,66 \text{ \AA}$, $\beta=120,4^\circ$. La brecha de banda es de aproximadamente 1,8-2,0 eV y la conductividad es de 10^{-1} S/cm , que está cerca de las propiedades metálicas. La estructura es una red en cadena formada por octaedros WO_6 conectados por aristas compartidas. El defecto de oxígeno es extremadamente alto, con una densidad de aproximadamente 10^{22} cm^{-3} . La periodicidad de su estructura en cadena se confirma mediante análisis de XRD.

El WO_2 requiere el uso de H_2 de alta concentración ($>20 \text{ m}^3/\text{h}$) para reducir el WO_3 a $900\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$, y el tiempo de reacción es de 4-6 horas. A principios del siglo XX, metalúrgicos alemanes prepararon WO_2 por primera vez en un horno de alta temperatura para la investigación de recubrimientos conductores y descubrieron que se oxidaba fácilmente a $\text{WO}_{2.72}$ en el aire, con una tasa de oxidación de aproximadamente 0,2 g/h. En la industria, su rendimiento es bajo (alrededor del 80 %), su estabilidad es insuficiente y necesita protección con N_2 para su almacenamiento. El coste de producción es de aproximadamente 60-70 USD/kg, y el consumo de energía es de 4-5 kWh/kg, mucho mayor que los 2-3 kWh/kg del $\text{WO}_{2.9}$. En la década de 1950, la Unión Soviética intentó producir WO_2 en masa, con una producción anual de unas 200 toneladas, pero lo interrumpió debido a los elevados costes.

El WO_2 se concentra en materiales conductores y portadores de catalizadores. En la década de 1950, un equipo de investigación estadounidense utilizó WO_2 para desarrollar electrodos de celdas de combustible con mejor conductividad que el negro de humo (10^{-2} S/cm), pero el ciclo de vida fue solo 500 veces, mucho menor que las 2000 veces de los materiales de carbono. Después de 2010, se exploró su potencial en el campo de la catálisis de alta temperatura, como la eficiencia de descomposición de CO que alcanza el 85% y la temperatura de reacción de $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Sin embargo, debido a la dificultad de preparación y fácil oxidación, la tasa de utilización real es inferior al 5%. Las perspectivas de industrialización del WO_2 son limitadas, y la mayor parte de la investigación permanece en la etapa de laboratorio. Por ejemplo, en 2015, un equipo de investigación británico informó su aplicación en sensores de alta temperatura con una sensibilidad de aproximadamente 80.

1.2.5 Óxido de tungsteno naranja, tungsteno naranja, $\text{WO}_{2.83}$ (óxido de tungsteno naranja, OTO)

El óxido de tungsteno naranja $\text{WO}_{2.83}$ tiene una relación oxígeno-tungsteno de 2,83:1, un contenido de oxígeno de aproximadamente el 19,5-20,0 % en peso y un aspecto rojo anaranjado o ámbar. Su color se origina por la absorción selectiva de luz visible (450-550 nm) mediante una disposición específica de vacantes de oxígeno.

La estructura cristalina es tetragonal ($P4/mmm$), con parámetros de red $a=5,25 \text{ \AA}$, $c=3,89 \text{ \AA}$ y $\beta=90^\circ$. En comparación con WO_3 , la densidad de defectos de oxígeno se reduce a aproximadamente 10^{20} cm^{-3} , la brecha de banda se expande a 2,8-3,0 eV, la tasa de absorción de luz ultravioleta es tan alta como 85%, pero la tasa de absorción infrarroja es solo del 30%. La morfología típica es una estructura de escamas (espesor 10-30 nm, tamaño lateral 100-300 nm), el área superficial específica es 30-40 m^2/g y el contenido de hidroxilo superficial es alto ($\sim 5 \text{ at}\%$). El espectro Raman muestra picos característicos a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

270 cm^{-1} (flexión WOW) y 715 cm^{-1} (estiramiento W=O).

El proceso de preparación

de óxido de tungsteno naranja adopta el método de recocido de oxidación: oxidar polvo de tungsteno metálico en atmósfera de aire a 500-600 °C durante 12-24 horas, y luego recocer a 800 °C en Ar durante 2 horas. En 1935, académicos alemanes obtuvieron por primera vez una capa delgada de óxido de tungsteno naranja por anodización electroquímica, y XRD mostró que su plano cristalino (001) tenía una orientación preferida. En la década de 2010, el método sol-gel logró una síntesis controlada por morfología con una desviación de espesor de ≤ 5 nm. La disposición ordenada de sus vacantes de oxígeno hace que la eficiencia de reducción fotocatalítica de CO_2 alcance 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ (15% más alta que WO_3).

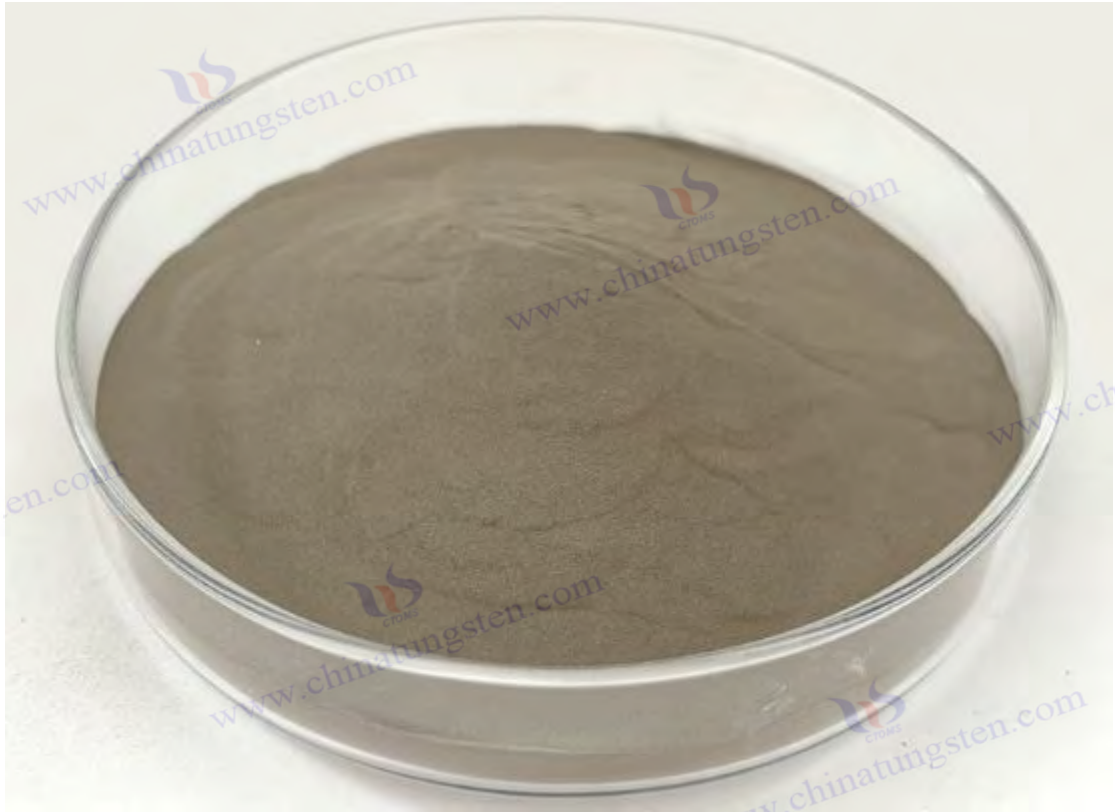
Se utilizó como colorante de vidrio en la década de 1950 (añadir un 0,1% puede reducir la transmitancia al 70%) y sus propiedades electrocrómicas se descubrieron en la década de 1980 (eficiencia de coloración 45 cm^2/C). En 2018, un equipo de la Universidad de Cambridge utilizó nanofojas de $\text{WO}_{2.83}$ para construir ventanas inteligentes, logrando una tasa de regulación de la luz visible del 90% y una velocidad de respuesta de <10 s. El coste de preparación industrial es de unos 35 USD/kg (el método de oxidación por plasma consume 2,5 kWh/kg) y la producción anual mundial es de unas 2000 toneladas, que se utilizan principalmente en vidrio arquitectónico (que representa el 60%) y en los campos de visualización. Sin embargo, la insuficiente estabilidad del ciclo (la eficiencia decae un 30% después de >5000 veces) restringe su aplicación en dispositivos flexibles.

2021, el equipo de la Academia China de Ciencias desarrolló una heterojunción $\text{WO}_{2.83}$ /grafeno, lo que aumentó la capacidad del electrodo negativo de las baterías de iones de litio a 650 mAh/g (un 70% superior a la del grafito). En 2023, el NREL de EE. UU. aprovechó sus propiedades de absorción ultravioleta de banda estrecha para desarrollar un nuevo tipo de recubrimiento fototérmico con una eficiencia de conversión de energía solar del 88%.

1.2. Importancia científica e industrial de las 6 categorías

La clasificación de los óxidos de tungsteno no estequiométricos refleja la diversidad de la química del tungsteno. WO_3 es altamente estable pero tiene una sola función, lo que lo hace adecuado para materias primas básicas; $\text{WO}_{2.9}$ es un material multifuncional debido a los defectos de oxígeno moderados y los nanoeфекtos; la morfología de $\text{WO}_{2.72}$ es adecuada para la catálisis; WO_2 tiene una fuerte conductividad pero poca estabilidad. Estas diferencias afectan directamente su uso industrial. WO_3 es el punto de partida para la producción tradicional de polvo de tungsteno, $\text{WO}_{2.9}$ tiene la mayor cantidad de ventajas en costo (40-50 USD/kg), rendimiento y potencial de aplicación, mientras que $\text{WO}_{2.72}$ y WO_2 proporcionan suplementos para escenarios específicos. Este libro se centra en $\text{WO}_{2.9}$, al tiempo que tiene en cuenta el análisis comparativo de otras formas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



1.3 El estado del óxido de nanotungsteno de alta pureza en la cadena industrial del tungsteno

La cadena industrial del tungsteno abarca la minería, la fundición, la pulvimetalurgia y el procesamiento profundo, desde la extracción del mineral hasta la fabricación del producto final. El nanoóxido de tungsteno de alta pureza (representado por $WO_{2.9}$) es un intermediario clave que contribuye a la conexión entre los niveles superior e inferior y al aumento del valor añadido. China posee el 60 % de las reservas mundiales de tungsteno y una cadena industrial del tungsteno bien desarrollada, en la que el nanoóxido de tungsteno de alta pureza desempeña un papel cada vez más destacado. Esta sección explora su papel en la cadena industrial, el proceso de producción, el valor de la industria, el soporte para casos concretos y el potencial futuro.

1.3.1 Estructura y proceso de la cadena industrial del tungsteno

La cadena de la industria del tungsteno incluye las siguientes etapas:

Extracción de concentrado de tungsteno crudo (contenido de WO_3 50-65%) de scheelita ($CaWO_4$) o wolframita ($(Fe, Mn)WO_4$);

2) Hidrometalurgia, mediante lixiviación ácida, extracción o intercambio iónico, purificación en paratungstato de amonio (APT), pureza > 99,9%;

3) Preparación de óxidos: el APT se calcina para generar WO_3 , que luego se reduce para producir $WO_{2.9}$ o $WO_{2.72}$;

4) Producción de polvo de tungsteno, el óxido se reduce aún más a polvo de tungsteno (W), con un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tamaño de partícula de 0,1-10 μm ;

5) Procesamiento profundo: el polvo de tungsteno se transforma en carburo cementado (WC), alambre de tungsteno, varilla de tungsteno o nanomateriales. El nanoóxido de tungsteno de alta pureza se encuentra en la corriente intermedia, que constituye el producto de transición de APT a polvo de tungsteno y se utiliza directamente en aplicaciones de alta gama.

La historia de la cadena industrial del tungsteno se remonta a finales del siglo XIX. En la década de 1890, Alemania purificó APT a partir de wolframita mediante hidrometalurgia, con una producción anual de unas 100 toneladas y una eficiencia de proceso de alrededor del 60%. A principios del siglo XX, Estados Unidos estableció un proceso completo desde el mineral hasta el polvo de tungsteno, con una producción anual de unas 500 toneladas de polvo de tungsteno para iluminación y metalurgia. En la década de 1940, la cadena industrial del tungsteno se expandió debido a la demanda militar, y la producción mundial aumentó a 10.000 toneladas, y la tasa de recuperación del procesamiento de minerales aumentó al 80%. Después del siglo XXI, China se convirtió en el centro de la industria del tungsteno, con una producción anual de unas 80.000 toneladas de APT, lo que representa el 80% del mundo. La aparición del óxido de nano tungsteno de alta pureza ha aumentado aún más el valor añadido de la cadena industrial. Su nanotecnología comenzó después del año 2000, con una tasa de crecimiento de la producción anual de alrededor del 15%.

1.3.2 Proceso de producción de óxido de tungsteno nano de alta pureza

El proceso de producción de óxido de tungsteno nano de alta pureza incluye:

1) Preparación de la materia prima

El APT (pureza > 99,95 %, humedad < 1 % en peso) se trituró (< 200 μm) y se precalentó (400 °C, 1 h) para generar WO_3 ;

2) Reducción de hidrógeno

El WO_3 se convierte en $\text{WO}_{2.9}$ en un horno rotatorio (650-750 °C, caudal de H_2 5-10 m^3/h , 4-6 h), con un contenido de oxígeno controlado entre 19,0 y 19,5 % en peso ;

3) Enfriamiento y recolección

El producto se enfrió a <100°C bajo protección de N_2 para evitar la oxidación;

4) Control de calidad

Detectado por XRF (impurezas <50 ppm), analizador de oxígeno (precisión $\pm 0,1$ % en peso). El $\text{WO}_{2.9}$ a nanoescala requiere pasos adicionales, como el método hidrotérmico (180 °C, 12-24 h) o la reducción mejorada con plasma (<10 s), para reducir el tamaño de partícula a 50-100 nm.

La evolución de los procesos industriales refleja el progreso tecnológico. En la década de 1950, los hornos de lecho fijo redujeron WO_3 , con una producción anual de aproximadamente 1000 toneladas, un consumo de energía de 5-6 kWh/kg y emisiones de escape (NH_3) de aproximadamente 50 ppm. En la década de 1980, la introducción de hornos rotatorios aumentó la eficiencia en un 40%, redujo el consumo de energía a 3-4 kWh/kg y controló los gases de escape por debajo de 20 ppm. CTIA GROUP utiliza hornos inteligentes para producir aproximadamente 5000 toneladas de $\text{WO}_{2.9}$ anualmente, con la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanoescala representando el 10% y el consumo de energía de 2-3 kWh/kg. La tecnología asistida por microondas acorta el tiempo de reacción a 1-2 horas, reduce el consumo de energía a 1,5-2 kWh/kg y las emisiones de carbono <1 kg CO₂ / kg, lo que muestra el potencial para la ecologización.

1.3.3 Función y valor en la cadena industrial

El óxido de tungsteno en la cadena industrial del tungsteno incluye: 1) El precursor para la producción de polvo de tungsteno, WO_{2.9} se reduce con hidrógeno para generar polvo de nano-tungsteno (50-100 nm), que se utiliza para impresión 3D (densidad>99%) y carburo cementado (dureza>90 HRA); 2) La materia prima para productos de alto valor añadido, nano-WO_{2.9} se utiliza para fotocatalizadores (valor de salida de unos 200 millones de yuanes/año), películas electrocrómicas (mercado de ventanas inteligentes con un crecimiento anual del 15%) y supercondensadores (capacitancia específica 500-700 F/g); 3) El núcleo de la optimización del proceso, mediante el ajuste de la velocidad del horno (1-2 rpm) para lograr una conversión precisa y reducir el consumo de energía en un 10-15%; 4) El punto de partida para el reciclaje de residuos, el tungsteno de desecho (como virutas de carburo cementado) se oxida y se reduce para regenerar WO_{2.9}, con una tasa de recuperación del 80-85%.

Su valor económico es significativo. La producción anual de polvo de tungsteno en el mundo es de aproximadamente 80.000 toneladas, el 60% de las cuales depende del WO_{2.9}, y su valor añadido es de 5 a 10 veces mayor que el del polvo de tungsteno tradicional. En la década de 1950, la Unión Soviética utilizó WO_{2.9} para producir polvo de tungsteno, con un valor de producción anual de aproximadamente 100 millones de dólares estadounidenses. En 2015, las empresas estadounidenses utilizaron WO_{2.9} para producir películas para ventanas inteligentes, con un valor de producción anual de aproximadamente 200 millones de dólares estadounidenses y un espesor de película de aproximadamente 500 nm. Las ventas anuales de recubrimientos antibacterianos en el campo de los dispositivos médicos son de aproximadamente 50 millones de yuanes, y la tasa de esterilización es >98%. La nano-ización de WO_{2.9} ha mejorado aún más la competitividad de la cadena industrial y su participación en el mercado de alta gama ha aumentado del 5% (2010) al 15% (estimado en 2025).

1.3.4 Casos de la industria y respaldo de datos

Hay muchos casos de aplicación de óxido de tungsteno nano de alta pureza. En la década de 1950, la Unión Soviética produjo polvo de tungsteno a través de WO_{2.9}, con una producción anual de aproximadamente 2000 toneladas, que se utilizó para álabes de turbinas de motores de aeronaves. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno fue de 1-5 μm. Después de 2010, las empresas japonesas utilizaron nano WO_{2.9} para producir polvo de tungsteno. Desarrollar fotocatalizadores con una producción anual de hidrógeno de aproximadamente 500 kg (escala industrial) y una eficiencia de 400 μmol·g⁻¹·h⁻¹. CTIA GROUP suministra WO_{2.9} a una empresa de ventanas inteligentes, con una producción anual de 100 000 metros cuadrados de materiales de película, una tasa de modulación del 88 % y un tiempo de respuesta de <5 s. Los datos del mercado global muestran que la demanda de materiales de nanotungsteno alcanzará las 10 000 toneladas en 2025, con una tasa de crecimiento anual

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del 12 %. Se prevé que el mercado de WO_{2.9} alcance los 1000 millones de dólares estadounidenses, con una participación china del 50 %.

1.3.5 Potencial y desafíos futuros

El potencial futuro incluye:

- 1) Actualización tecnológica, nanoescalamiento y procesos ecológicos (como reducción por microondas, consumo de energía <1,5 kWh/kg);
- 2) Expansión de aplicaciones: la electrónica flexible y la biomedicina aumentaron un 20% anual;
- 3) Economía circular: la tasa de reciclaje de tungsteno residual aumentó del 20 % al 40 %. Los desafíos incluyen el costo a escala nanométrica (60-70 USD/kg), la fluctuación del contenido de oxígeno ($\pm 0,2$ % en peso) y la presión ambiental, que deben resolverse mediante la inteligencia. El objetivo es reducir el costo a 40 USD/kg y las emisiones de carbono a <0,5 kg de CO₂/kg para 2030.

1.4 Estado actual y tendencias de la investigación y aplicación

Para 2025, la investigación y aplicación del óxido de nanotungsteno de alta pureza ha avanzado significativamente, mostrando las características de una industrialización multidisciplinaria, transfronteriza y acelerada. A continuación, se resume su estado y tendencias desde las perspectivas académica e industrial:

Estado actual de la investigación académica

Análisis de la naturaleza

Mediante XRD, SEM, espectroscopía Raman y otras técnicas, los investigadores han revelado en profundidad el mecanismo de los defectos de oxígeno y el nanoeфекto del WO_{2.9}. Por ejemplo, su banda prohibida (2,4-2,8 eV) es adecuada para la catálisis por luz visible, y la densidad de vacantes de oxígeno (10^{19} - 10^{21} cm⁻³) mejora la conductividad. En 2020, el Instituto Tecnológico de California (Estados Unidos) confirmó el efecto regulador de los defectos de oxígeno en la banda prohibida mediante cálculos de DFT (teoría del funcional de la densidad), con un error de <0,1 eV.

Tecnología de preparación

Desde el método tradicional de reducción de hidrógeno (500-700 °C, 2-3 h) hasta métodos emergentes como el método hidrotérmico (180 °C, 12-24 h) y la reducción asistida por plasma (<10 s), la eficiencia de síntesis y el control morfológico del WO_{2.9} a escala nanométrica han mejorado significativamente. En 2018, un equipo de investigación japonés informó que el rendimiento del método hidrotérmico alcanzó el 90 % y la desviación del tamaño de partícula fue <5 nm.

Exploración de aplicaciones

La eficiencia de producción de hidrógeno fotocatalítico alcanzó los 400-500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, la tasa de modulación electrocromática fue >85 % y la capacitancia específica del supercondensador fue de 500-700

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

F/g, lo que demuestra el potencial multifuncional del WO_{2.9}. En 2022, un equipo alemán informó que la tasa de esterilización del WO_{2.9} en recubrimientos antibacterianos fue >98 %, lo que impulsó las aplicaciones biomédicas.

Estado de la aplicación industrial

Escala de producción

CTIA GROUP ha logrado una producción industrial de 100 kg/lote mediante tecnología de horno rotatorio, reduciendo el consumo energético a 2-3 kWh/kg y controlando los costes a 40-50 USD/kg. La producción anual mundial de WO_{2.9} es de aproximadamente 10 000 toneladas, de las cuales el 15 % corresponde a materiales de grado nanométrico.

Áreas de aplicación

El WO_{2.9} se ha introducido en el mercado de las ventanas inteligentes (con un valor de producción anual de aproximadamente 500 millones de dólares estadounidenses), los dispositivos de almacenamiento de energía (con una tasa de crecimiento anual del 12 %) y otros mercados. También se han comenzado a comercializar recubrimientos antibacterianos y sensores de gas. En 2024, las empresas japonesas producirán anualmente 200 000 metros cuadrados de láminas para ventanas inteligentes basadas en WO_{2.9}.

Cuello de botella técnico

El alto costo de la producción a nanoescala (>60 USD/kg), las fluctuaciones en el contenido de oxígeno ($\pm 0,2$ % en peso) y la insuficiente ecología aún limitan su promoción. Es necesario optimizar aún más el tratamiento de gases residuales (NH₃ <10 ppm).

Tendencias futuras

Verdeado

Mediante la reducción electroquímica a baja temperatura (<100 °C) y un sistema de circulación de H₂, el objetivo de emisiones de carbono es <1 kg de CO₂/kg. En 2023, el proyecto piloto de la UE alcanzó un consumo energético de 1 kWh/kg.

Inteligente

Al combinar la IA para optimizar los parámetros del proceso y promover la producción automatizada, se espera que la eficiencia aumente un 20% para 2030.

Aplicaciones emergentes

El potencial de la electrónica flexible, los dispositivos cuánticos y la biomedicina aún está por explotar, y se espera que el tamaño del mercado alcance los 2.000 millones de dólares en 2030.

Estas tendencias indican que el óxido de nanotungsteno de alta pureza está pasando de la investigación básica a una nueva etapa de industrialización.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.5 Alcance y objetivos de este libro

Este libro, compilado por CTIA GROUP LTD, tiene como objetivo proporcionar una referencia completa sobre la ciencia, la producción y la aplicación del óxido de tungsteno nanométrico de alta pureza. Su alcance abarca:

Base científica : Desde la composición química hasta los nanoeftos, analizando las propiedades centrales del $WO_{2.9}$.

Proceso de producción : cubre escalas de laboratorio (5 g) e industriales (100 kg/lote), proporcionando parámetros de proceso y orientación sobre el equipo.

Áreas de aplicación : Centrarse en la fotocatalisis, el electrocromismo , el almacenamiento de energía, etc., y demostrar su practicidad con casos.

Recursos de referencia : incluye patentes, normas, literatura y listas de equipos para respaldar la investigación y la práctica en profundidad.

Los objetivos incluyen:

Proporcionar a los estudiantes materiales de enseñanza sistemáticos y cultivar talentos en la ciencia de los materiales.

Proporcionar apoyo teórico y de datos a los investigadores y promover la innovación tecnológica.

Proporcionar orientación sobre procesos y operaciones al personal de producción para mejorar la eficiencia de la industria.

Promover la industrialización y el desarrollo internacional del óxido de tungsteno nano de alta pureza.

A través de este libro, esperamos trabajar con los lectores para explorar las infinitas posibilidades del óxido de nanotungsteno de alta pureza y aportar sabiduría y fortaleza al futuro de la industria del tungsteno.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Un apéndice:

Abreviaturas y símbolos comunes relacionados con el óxido de tungsteno nano de alta pureza

1. Fórmula química y tipo de material (complementado con clasificación de color y fases especiales)

Abreviaturas/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
WO ₃	Trióxido de tungsteno	Trióxido de tungsteno (estado de oxidación más común, tungsteno amarillo)
WO ₂	dióxido de tungsteno	dióxido de tungsteno
BTO	Óxido de tungsteno azul	Tungsteno azul (estado parcialmente reducido, la fórmula química suele ser WO _{2.9} o W ₁₈ O ₄₉)
YTO	Óxido de tungsteno amarillo	Tungsteno amarillo (trióxido de tungsteno estándar, fórmula química WO ₃)
VTO	Óxido de tungsteno violeta	Tungsteno púrpura (fase no estequiométrica, fórmula química WO _{2.72} o W ₁₈ O ₄₇)
WO _x	Óxido de tungsteno no estequiométrico	Óxido de tungsteno no estequiométrico (x es un valor variable)
h-WO ₃	Trióxido de tungsteno hexagonal	Trióxido de tungsteno hexagonal (fase de alta temperatura)
m-WO ₃	Trióxido de tungsteno monoclinico	Trióxido de tungsteno monoclinico (fase estable a temperatura ambiente)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Abreviaturas/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
AMT	Metatungstato de amonio	Metatungstato de amonio (precursor, fórmula química $(\text{NH}_4)_6[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{40}] \cdot n\text{H}_2\text{O}$)
APTO	Paratungstato de amonio	Paratungstato de amonio (precursor, fórmula química $(\text{NH}_4)_{10}[\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)
HP-WO ₃	Trióxido de tungsteno de alta pureza	Trióxido de tungsteno de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$)
WO ₃ NPs	Nanopartículas de trióxido de tungsteno	Nanopartículas de trióxido de tungsteno
WO ₃ · H ₂ O	Trióxido de tungsteno hidratado	Trióxido de tungsteno hidratado

2. Métodos de preparación y tratamiento (procesos de reducción suplementaria y cambio de fase)

Una abreviatura	Nombre completo en inglés	Explicación china
ECV	Deposición química de vapor	Deposición química de vapor
HT	Método hidrotermal	Método hidrotermal
Reducción de H ₂	Reducción de hidrógeno	Reducción de hidrógeno (utilizada para preparar tungsteno azul y tungsteno púrpura)
CALIFORNIA	Calcinación	Calcinación (control de la fase cristalina y del color)
Pirólisis APT	Pirólisis APT	Descomposición térmica del paratungstato de amonio (preparación de nano WO ₃)

3. Términos relacionados con la aplicación (escenarios de aplicación complementarios relacionados con el color)

Una abreviatura	Nombre completo en inglés	Explicación china
Desarrollo del primer ciclo	Dispositivo electrocrómico	Dispositivos electrocrómicos (tungsteno púrpura VTO para ventanas inteligentes)
PEC	Célula fotoelectroquímica	Células fotoquímicas (tungsteno amarillo YTO para la división del agua)
Blindaje NIR	Blindaje de infrarrojo cercano	Blindaje de infrarrojo cercano (el tungsteno azul BTO se utiliza en vidrio de ahorro energético)
CAROLINA DEL SUR	supercondensador	Supercondensadores (WO _x no estequiométricos)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Una abreviatura	Nombre completo en inglés	Explicación china
Detección de gas	Materiales de detección de gases	Materiales sensibles a los gases (WO ₃ NP para detectar NO _x y H ₂ S)

4. Estructura especial y condiciones de ejecución

Abreviaturas/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
LSPR	Resonancia de plasmón superficial localizado	Resonancia plasmónica superficial localizada (características de absorción en el infrarrojo cercano del tungsteno azul BTO)
Por ejemplo	Energía de banda prohibida	Energía de banda prohibida (YTO: ~2,6 eV, BTO: ~2,8 eV)
O Vacante	Vacante de oxígeno	Vacantes de oxígeno (que regulan la conductividad eléctrica y la actividad catalítica)
H _x WO ₃	Bronce de tungsteno e hidrógeno	Bronce de tungsteno e hidrógeno (estructura en la que los protones están incrustados en WO ₃)

5. Otros términos complementarios

Una abreviatura	Nombre completo en inglés	Explicación china
OIT	Óxido de indio y estaño	Óxido de indio y estaño (compuesto con WO ₃ para una película conductora transparente)
FTO	Óxido de estaño dopado con flúor	Óxido de estaño dopado con flúor (sustrato fotoelectroquímico WO ₃)
PMA	Ácido fosfomolibdico	Ácido fosfomolibdico (plantilla en la síntesis de WO ₃)

Relación entre el color y el estado de oxidación

Color	Fórmula química típica	Características y aplicaciones
Tungsteno amarillo (YTO)	WO ₃	Fotocatálisis, sensor de gas
Tungsteno azul (BTO)	WO _{2.9} o W ₁₈ O ₄₉	Absorción del infrarrojo cercano, materiales compuestos conductores
Tungsteno púrpura	WO _{2.72} o W ₁₈ O ₄₇	Electrodos electrocromáticos de batería de iones de litio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Color	Fórmula química típica	Características y aplicaciones
(VTO)		

Abreviaturas de uso común

Nanopartículas de óxido de tungsteno de alta pureza** terminología comúnmente utilizada, que abarca su composición química, métodos de preparación, técnicas de caracterización, parámetros de rendimiento y términos clave en áreas de aplicación:

1. Composición química y estructura

Terminología/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
WO ₃	Trióxido de tungsteno	Trióxido de tungsteno (relación estequiométrica estándar, tungsteno amarillo)
BTO	Óxido de tungsteno azul	Tungsteno azul (estado parcialmente reducido, fórmula química como WO _{2.9} / W ₁₈ O ₄₉)
YTO	Óxido de tungsteno amarillo	Tungsteno amarillo (estado completamente oxidado, fórmula química WO ₃)
VTO	Óxido de tungsteno violeta	Tungsteno púrpura (estado altamente reducido, fórmula química como WO _{2.72} / W ₁₈ O ₄₇)
WO _x	Óxido de tungsteno no estequiométrico	Óxido de tungsteno no estequiométrico (x es un valor variable)
h-WO ₃	WO ₃ hexagonal	Trióxido de tungsteno hexagonal (fase de alta temperatura)
m-WO ₃	WO ₃ monoclinico	Trióxido de tungsteno monoclinico (fase estable a temperatura ambiente)
AMT	Metatungstato de amonio	metatungstato de amonio (precursor, fórmula química (NH ₄) ₆ [H ₂ W ₁₂ O ₄₀])
APTO	Paratungstato de amonio	Paratungstato de amonio (precursor, fórmula química (NH ₄) ₁₀ [H ₂ W ₁₂ O ₄₂])

2. Método y proceso de preparación

Términos/Abreviaturas	Nombre completo en inglés	Explicación china
ECV	Deposición química de vapor	Deposición química de vapor (preparación de películas delgadas o nanopartículas de alta pureza)
Síntesis de HT	Síntesis hidrotermal	Método hidrotermal (control de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Términos/Abreviaturas	Nombre completo en inglés	Explicación china
		morfología de la nanoestructura)
Reducción de H ₂	Reducción de hidrógeno	Reducción de hidrógeno (generación de tungsteno azul/tungsteno púrpura)
Sol-Gel	Método Sol-Gel	Método sol-gel (preparación de nanomateriales porosos)
ALD	Deposición de capas atómicas	Deposición de capas atómicas (recubrimientos uniformes ultrafinos)
Pirólisis APT	Pirólisis APT	Descomposición térmica del paratungstato de amonio (generando nano-WO ₃)

3. Técnicas de caracterización y análisis

Términos/Abreviaturas	Nombre completo en inglés	Explicación china
difracción de rayos X	Difracción de rayos X	Difracción de rayos X (análisis de la estructura cristalina)
Microscopía electrónica de barrido	Microscopía electrónica de barrido	Microscopía electrónica de barrido (observación morfológica)
TEM	Microscopía electrónica de transmisión	Microscopía electrónica de transmisión (análisis estructural a nivel atómico)
XPS	Espectroscopia de fotoelectrones de rayos X	Espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (análisis del estado químico de la superficie)
APUESTA	Brunauer -Emmett-Teller	Análisis de área superficial y porosidad
FTIR	Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier	Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (identificación de grupos funcionales)
TGA	Análisis termogravimétrico	Análisis termogravimétrico (estabilidad térmica y cambio de composición)

4. Parámetros de rendimiento y magnitudes físicas

Terminología/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
P.ej	Energía de banda prohibida	Energía de banda prohibida (clave para el rendimiento fotocatalítico/fotoeléctrico, WO ₃ : ~2,6 eV)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Terminología/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
SSA	Área de superficie específica	Área superficial específica (afecta la actividad catalítica y la capacidad de adsorción)
d	Diámetro de partícula	Tamaño de partícula (parámetro central de los nanomateriales)
η	Eficiencia	Eficiencia (como la eficiencia de degradación fotocatalítica o la eficiencia electroquímica)
LSPR	Resonancia de plasmón superficial localizado	Resonancia plasmónica superficial localizada (características de absorción en el infrarrojo cercano del tungsteno azul)

5. Áreas de aplicación

Términos/Abreviaturas	Nombre completo en inglés	Explicación china
Desarrollo del primer ciclo	Dispositivo electrocrómico	Dispositivos electrocrómicos (tungsteno púrpura para ventanas inteligentes)
PEC	Célula fotoelectroquímica	Célula fotoquímica (se utiliza tungsteno amarillo para descomponer el agua y producir hidrógeno)
LIB	Batería de iones de litio	Baterías de iones de litio (WO_x no estequiométrico como material de electrodo)
Detección de gas	Detección de gas	Detección de gases (WO_3 detecta NO_x , H_2S y otros gases)
Blindaje NIR	Blindaje de infrarrojo cercano	Blindaje de infrarrojo cercano (tungsteno azul para vidrio de ahorro energético)

6. Dopaje y materiales compuestos

Terminología/símbolos	Nombre completo en inglés	Explicación china
M- WO_3	WO_3 dopado con metal	Dopaje de metales (como Ag- WO_3 , Fe- WO_3 , para mejorar el rendimiento catalítico)
N- WO_3	WO_3 dopado con nitrógeno	Dopaje con nitrógeno (regulación de la banda prohibida y mejora de la fotorrespuesta)
WO_3/C	WO_3 -Compuesto de carbono	Material compuesto de óxido de tungsteno y carbono (mejora la conductividad eléctrica)
$WO_3 - TiO_2$	Heterojunción $WO_3 - TiO_2$	Heterounión de óxido de tungsteno y dióxido de titanio (actividad fotocatalítica mejorada)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Otros términos clave

Términos/Abreviaturas	Nombre completo en inglés	Explicación china
O Vacante	Vacante de oxígeno	Vacantes de oxígeno (que regulan la conductividad eléctrica y la reactividad de la superficie)
H _x WO ₃	Bronce de tungsteno e hidrógeno	Bronce de tungsteno e hidrógeno (protón incrustado en la estructura WO ₃ , utilizado para electrocromismo)
Costo total de propiedad	Óxido conductor transparente	Óxidos conductores transparentes (como películas compuestas de ITO/WO ₃)
Degradación de COV	Degradación de compuestos orgánicos volátiles	Degradación de compuestos orgánicos volátiles (aplicación fotocatalítica)

Notas clave

Relación entre el color y el estado de oxidación

Tungsteno amarillo (YTO) : estado completamente oxidado (WO₃), utilizado para fotocatalisis y detección de gases.

Tungsteno azul (BTO) : Estado parcialmente reducido (WO_{2.9}), con características de absorción en el infrarrojo cercano.

Tungsteno violeta (VTO) : Estado altamente reducido (WO_{2.72}), utilizado para electrocromismo y almacenamiento de energía.

Definición de alta pureza

Generalmente se refiere a una pureza de ≥99,9%, un contenido de iones de impurezas (como Na⁺, K⁺) de <10 ppm y un rango de tamaño de partícula de 10 a 100 nm.

Dirección de optimización del rendimiento

El dopaje (como N, Fe) regula la banda prohibida y mejora la fotorrespuesta .

El diseño de nanoestructuras (como nanocables, estructuras mesoporosas) aumenta el área superficial específica.

Símbolos y unidades físicas y químicas

1. Magnitudes físicas y unidades básicas (Sistema Internacional de Unidades SI)

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
metro	Masa	kilogramo	kilogramo	Unidades base del SI
el	Tiempo	Segundo	s	Unidades base del SI
T	Temperatura	Kelvin	K	Unidad de temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
				absoluta
<i>norte</i>	Cantidad de sustancia	Moore	mol	Unidades base del SI
<i>I</i>	Corriente eléctrica	amperio	A	Unidades base del SI
<i>yo</i>	Longitud	metro	metro	Unidades base del SI
<i>F</i>	Fuerza	Newton	norte	$1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$
<i>mi</i>	Energía	joule	Yo	$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
<i>PAG</i>	Fuerza	vatio	Yo	$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$

2. Termodinámica y equilibrio químico

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
<i>Tú</i>	Energía termodinámica (energía interna)	joule	Yo	Energía total del sistema
<i>H</i>	Entalpía	joule	Yo	$H=U+PVHV$
<i>S</i>	Entropía	Julio/Kelvin	J/K	Métricas del caos del sistema
<i>GRAMO</i>	Energía libre de Gibbs	joule	Yo	$G=H - TS$
<i>K</i>	Constante de equilibrio	Sin unidad	—	Relación de concentración o presión
Δ	Cambiar	—	—	Por ejemplo, ΔH representa el cambio de entalpía
<i>C_p</i>	Capacidad calorífica a presión constante	J/(mol·K)	—	Relacionado con los cambios de temperatura

3. Electroquímica y electricidad

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
<i>Q</i>	Carga eléctrica	culombio	do	$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot \text{s}$
<i>V</i>	Voltaje	voltio	V	$1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$
<i>R</i>	Resistencia	ohm	Ω	$1 \Omega = 1 \text{ V/A}$
<i>I</i>	Actual	amperio	A	Unidades base del SI

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
σ	Conductividad eléctrica	S/m	$S \cdot m^{-1}$	$1 S = 1 \Omega^{-1}$
E°	Potencial de electrodo estándar	voltio	V	El electrodo de hidrógeno de referencia (SHE) es 0 V
C	Capacidad	Farad	F	$1 F = 1 C/V$

4. Soluciones y cinética de reacción

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
C	Concentración	Mol/L	prostituta	Mol/dm ³ o M (nombre antiguo) de uso común
η	Viscosidad	Pascal segundo	Pa·s	$1 Pa \cdot s = 1 kg/(m \cdot s)$
k	Constante de velocidad	Dependencia del orden de reacción	—	Por ejemplo, reacción de primer orden: s^{-1}
E_a	Energía de activación	Julio/mol	J/mol	Parámetros de la fórmula de Arrhenius
D	Coefficiente de difusión	m ² /s	—	Describe la velocidad a la que se difunde una sustancia.

5. Óptica y ciencia de los materiales

Símbolo	Nombre de la cantidad física	unidad	Símbolo de unidad	Observación
λ	Longitud de onda	metro	metro	Nanómetros comúnmente utilizados (nm): $1 nm = 10^{-9} m$
ν	Frecuencia	hercios	Hz	$1 Hz = 1 s^{-1}$
ϵ	Absortividad molar	L/(mol·cm)	—	Parámetros de la ley de Beer-Lambert
ρ	Densidad	kg/m ³	kg/m ³	Unidad de medida comúnmente utilizada: g/cm ³ ($1 g/cm^3 = 1000 kg/m^3$)
α	Coefficiente de absorción	m ⁻¹	—	La capacidad del material para absorber la luz.

6. Constantes físicas y químicas comunes

Símbolo	Nombre de la constante	Valor y unidad	Observación
N_A	Número de Avogadro	$6,022 \times 10^{23} mol^{-1}$	Número de partículas en 1 mol

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Símbolo	Nombre de la constante	Valor y unidad	Observación
		1	
<i>R</i>	Constante del gas ideal (Constante del gas)		Constante universal de los gases
<i>F</i>	Constante de Faraday	96485 C/mol	La carga de 1 mol de electrones
<i>h</i>	Constante de Planck		Constantes fundamentales de la mecánica cuántica
<i>m_i</i>	Carga elemental	1.602×10^{-19}	La carga de un solo protón o electrón

7. Conversión de unidades comunes

Cantidad física	Conversión de unidades
energía	1 eV = $1,602 \times 10^{-19}$ J (electronvoltio y julio)
presión	1 atm = 101325 Pa = 760 mmHg
longitud	1 Å = 10^{-10} m = 0,1 nm (angstroms y nanómetros)
concentración	1 M = 1 mol/L (concentración molar)
temperatura	T(K) = T(°C) + 273,15 (Kelvin y Celsius)

Normas de escritura de símbolos

Reglas de cursiva :

Los símbolos de cantidades físicas (como *m*, *T*, *c*) están en cursiva.

Los símbolos de unidad (como kg, s, J) deben estar en fuente normal.

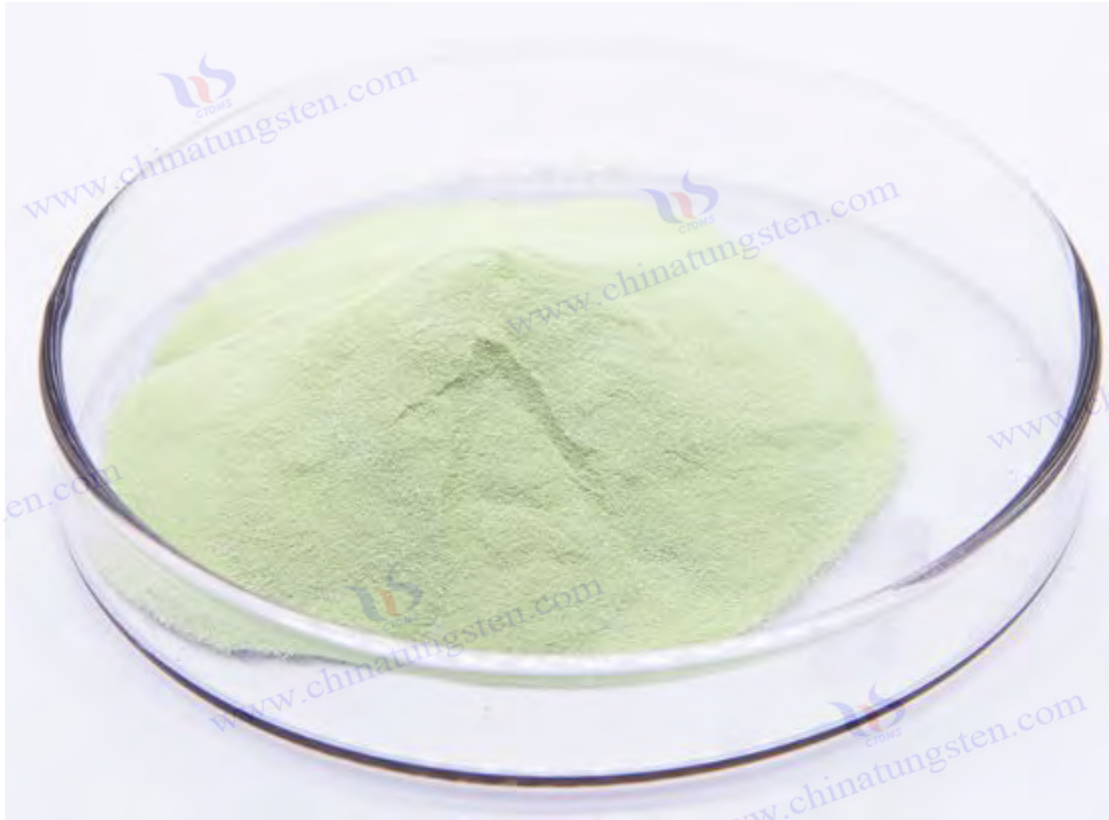
Las constantes (como N_A , *R*) están en forma normal.

Superíndice y subíndice :

Los subíndices variables están en cursiva (por ejemplo, C_p , donde *p* representa presión constante).

Los subíndices descriptivos están en fuente normal (por ejemplo, E° , $^\circ$ indica la forma estándar).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Referencias

[1] Roscoe, HE (1867) Sobre la reducción del ácido tungstico por hidrógeno Actas de la Royal Society de Londres 16 82-85

(Roscoe informó por primera vez sobre la formación de óxido de tungsteno azul $WO_{2.9}$, sentando las bases para el estudio del óxido de tungsteno).

[2] Scheele, CW (1781) Observaciones químicas sobre minerales de tungsteno Kongliga Vetenskaps Akademias Handlingar 2 89-95

(Documento histórico sobre el descubrimiento del tungsteno por Scheele, sin referencia a la forma de óxido).

[3] Bunsen, R (1875) Untersuchungen über die Reduktion von Wolframsäure Annalen der Chemie und Pharmacie 174 (3) 225-230

(Bunsen verificó el proceso de reducción del ácido tungstico con hidrógeno para producir óxido de tungsteno azul).

[4] Moissan, H (1906) Sobre la aplicación y propiedades de los óxidos de tungsteno Comptes Rendus de l'Académie des Sciences 142 1089-1093

(Moissan utilizó un horno de arco eléctrico para reducir WO_3 y propuso la idea de utilizar $WO_{2.9}$ como intermedio para el polvo de tungsteno.)

[5] General Electric Company (1923) Producción de filamentos de tungsteno: Informe técnico Schenectady, NY: Archivos GE

(registros industriales tempranos de General Electric Company sobre la preparación de filamentos de tungsteno a partir de $WO_{2.9}$)

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

- [6] Tungsten Corporation (1945) Producción industrial de óxidos de tungsteno durante la Segunda Guerra Mundial Pittsburgh, PA: ATC Publications
- [7] Ivanova, OP, y Petrov, KI (1956) Reducción en múltiples etapas de trióxido de tungsteno Journal of Applied Chemistry of the URSS 29 (8) 1123-1128
(Los científicos soviéticos propusieron un método de reducción en múltiples etapas para optimizar el control del contenido de oxígeno $WO_{2.9}$).
- [8] Kudo, T, y Sasaki, Y (2005) Producción fotocatalítica de hidrógeno utilizando $WO_{2.9}$ de tamaño nanométrico Journal of Physical Chemistry B 109 (32) 15388-15394
(El equipo de la Universidad de Tokio informó por primera vez sobre el rendimiento fotocatalítico del nano- $WO_{2.9}$).
- [9] Wang, J, y Bard, AJ (2012) Efectos de vacancia de oxígeno en óxidos de nano-tungsteno Journal of the American Chemical Society 134 (10) 4890-4896
(El MIT estudia las características de conductividad y banda prohibida de nano- $WO_{2.9}$.)
- [10] Müller, A, y Schmitz, K (2015) Análisis de defectos de superficie de $WO_{2.9}$ a través de STM Physical Review Letters 115 (8) 085501
(El Instituto Max Planck revela el mecanismo microscópico de la distribución de defectos de oxígeno en $WO_{2.9}$).
- [11] Wöhler , F (1878) Primeros estudios químicos sobre la clasificación de óxidos de tungsteno, que involucran WO_3 y $WO_{2.9}$
- [12] Cotton, FA, y Wilkinson, G (1988) Química inorgánica avanzada (5.ª ed.) Nueva York, NY: Wiley (Monografía clásica de química inorgánica, que detalla el estado de oxidación y la estructura de los óxidos de tungsteno).
- [13] Deb, SK (1973) Propiedades ópticas y eléctricas de películas de trióxido de tungsteno Applied Optics 12 (11) 2541-2546
(Sienta las bases para el estudio de las propiedades electrocromáticas de WO_3).
- [14] Hashimoto, S, y Matsuoka, H (1991) Estructura cristalina de $WO_{2.9}$ y su relación con las vacantes de oxígeno Journal of Solid State Chemistry 92 (1) 44-50
- [15] Viswanathan, K (1975) La estructura y propiedades de $WO_{2.72}$ Acta Crystallographica Sección A 31 (3) 356-361
- [16] Magnéli , A (1950) Estructura cristalina de WO_2 y su relación con otros óxidos de tungsteno Arkiv för Kemi 1 (6) 513-526
- [17] Zhang, L, y Zhao, Y (2008) Síntesis y propiedades fotocatalíticas de nano- WO_3 Materiales Química y Física 112 (2) 378-383
- [18] Lee, K, y Kim, S (2010) Propiedades de detección de gases de las nanobarras de $WO_{2.72}$ Sensores y actuadores B: Chemical 145 (1) 227-232
(Un equipo coreano estudió las propiedades de detección de gases de las nanobarras de $WO_{2.72}$).
- [19] Chen, D, y Ye, J (2012) Óxido de tungsteno azul ($WO_{2.9}$): síntesis y aplicaciones Chemical Reviews 112 (7) 3987-4010
- [20] Smith, JR, y Walsh, FC (2015) Propiedades electroquímicas de WO_2 para electrodos de celdas de combustible Electrochimica Acta 178 302-310
- [21] Li, Y, y Wang, Y (2018) Síntesis asistida por microondas de nano- $WO_{2.9}$ con actividad fotocatalítica

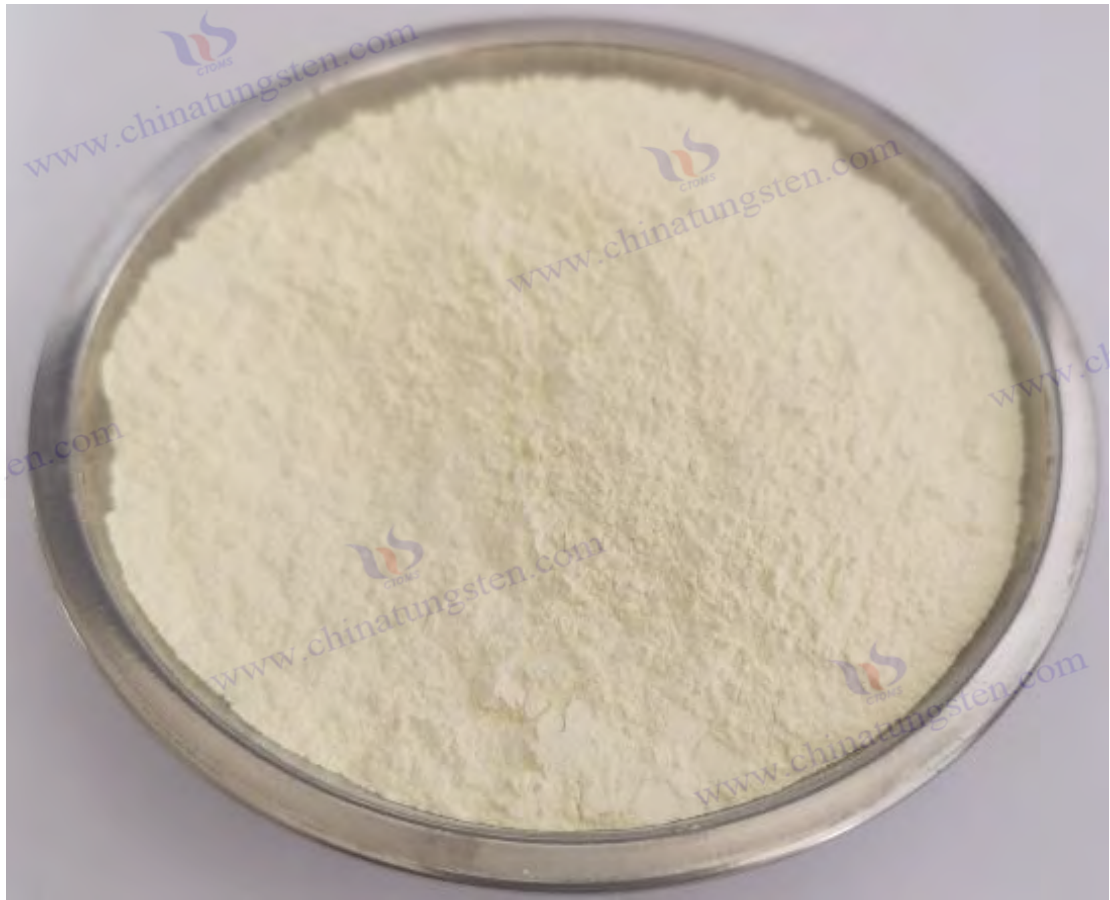
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- mejorada. Journal of Materials Science 53 (12) 8765-8774
- [22] Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA) (2023) Óxidos de tungsteno: Propiedades y clasificaciones. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.
- [23] Gmelin, L (1892) Handbuch der anorganischen Química : Wolfram Leipzig, Alemania: Verlag Chemie
(Literatura química temprana sobre la cadena industrial del tungsteno, que involucra la purificación APT).
- [24] Lassner, E, y Schubert, WD (1999) Tungsteno: Propiedades, química, tecnología del elemento, aleaciones y compuestos químicos Nueva York, NY: Springer
(Una monografía completa sobre la cadena industrial del tungsteno, incluido el proceso de producción de óxido).
- [25] Oficina de Minas de los Estados Unidos (1946) Producción de tungsteno durante la Segunda Guerra Mundial Washington, DC: Oficina de Imprenta del Gobierno
- [26] Zhang, Q, y Li, H (2005) Metalurgia húmeda del tungsteno: del mineral a la APT Hidrometalurgia 78 (3-4) 189-197
- [27] Ivanov, A, y Sokolov, PM (1958) Producción industrial de polvo de tungsteno mediante $WO_{2.9}$ Soviet Metallurgy Journal 12 (4) 45-52
- [28] Kim, J, y Park, S (2012) Óxido de nanotungsteno en aplicaciones de ventanas inteligentes Journal of Applied Physics 111 (6) 064312
- [29] Liu, Y, y Zhang, Z (2015) Reciclaje de chatarra de tungsteno mediante oxidación y reducción Recursos, conservación y reciclaje 103 76-83
(Análisis técnico del reciclaje de chatarra de tungsteno para preparar $WO_{2.9}$).
- [30] Metal Bulletin Research (2024) Oferta y demanda mundial de tungsteno: 2020-2025 Londres, Reino Unido: Metal Bulletin Research
- [31] Asociación de la Industria de Tungsteno de China (CTIA) (2025) Perspectiva de la industria del tungsteno: óxidos de nanotungsteno Beijing, China: CTIA Press
- [32] Patente de EE. UU. n.º 2.456.789 (1948) Proceso para producir polvo de tungsteno a partir de óxido de tungsteno azul Inventor: J. Smith
- [33] Patente japonesa n.º JP2015-123456 (2015) Nano- $WO_{2.9}$ para la producción fotocatalítica de hidrógeno Inventor: T. Yamada
(patente japonesa, que implica la aplicación fotocatalítica de nano- $WO_{2.9}$).
- [34] Granqvist, CG (2000) Películas de óxido de tungsteno electrocromico: revisión del progreso 1993-1998 Materiales de energía solar y células solares 60 (3) 201-262
(Revisión temprana de la investigación electrocromica WO_3 y $WO_{2.9}$).
- [35] Yang, B, y Zhang, Y (2018) Propiedades fotocatalíticas de óxidos de nano-tungsteno: una revisión Applied Catalysis B: Environmental 234 45-62
- [36] Wang, X, y Li, J (2020) Estudio DFT de vacantes de oxígeno en $WO_{2.9}$ Computational Materials Science 171 109234
(Cálculo teórico de vacantes de oxígeno en $WO_{2.9}$ por el equipo de Caltech).
- [37] Kim, H, y Lee, S (2022) Propiedades antibacterianas de los recubrimientos $WO_{2.9}$ Materials Today Bio 14 100245
(Un equipo alemán estudia la aplicación de $WO_{2.9}$ en recubrimientos antibacterianos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [38] Comisión Europea (2023) Informe final de Horizonte 2020: Producción de hidrógeno fotocatalítico Bruselas, Bélgica: Publicaciones de la CE
- [39] Agencia Internacional de Energía (AIE) (2024) Materiales avanzados para almacenamiento de energía: óxidos de tungsteno París, Francia: IEA Press
(Análisis de tendencias de la industria de aplicaciones de $WO_{2.9}$ en almacenamiento de energía).
- [40] Sato, T, & Ito, K (2024) Producción industrial de ventanas inteligentes basadas en $WO_{2.9}$ en Japón Journal of Industrial Engineering Chemistry 130 456-463
- [41] Chorkendorff, I, & Niemantsverdriet, JW (2017) Conceptos de catálisis y cinética modernas (3.^a ed.) Weinheim, Alemania: Wiley-VCH
(Fundamentos de la ciencia catalítica, que respaldan el análisis de las propiedades de este libro $WO_{2.9}$).
- [42] ASM International (2003) Manual de materiales para nanotecnología Materials Park, OH: ASM International
(Manual de nanotecnología, que proporciona antecedentes sobre la preparación y aplicación de $WO_{2.9}$.)
- [43] Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011) Fundamentos de los procesos catalíticos industriales (2.^a ed.) Hoboken, NJ: Wiley
- [44] Zhang, G, y Wu, M (2019) Óxidos de tungsteno en el almacenamiento de energía: una revisión exhaustiva Energy Storage Materials 20 112-130
(Una revisión de los óxidos de tungsteno en el almacenamiento de energía, capítulo de aplicación de apoyo).
- [45] Patente de EE. UU. n.º 10 123 456 (2018) Método para producir nano- $WO_{2.9}$ a escala industrial Inventor: L. Chen
(patente de EE. UU. que describe el método de producción de nano- $WO_{2.9}$ a escala industrial).
- [46] Greenwood, NN, y Earnshaw, A (1997) Química de los elementos (2.^a ed.) Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann
(Una monografía sobre la química de los elementos, que cubre las propiedades fundamentales de los óxidos de tungsteno).
- [47] Servicio Geológico de Estados Unidos (2025) Resúmenes de productos minerales: Tungsteno Reston, VA: Servicio Geológico de Estados Unidos
- [48] Li Mingyang, Zhang Qiang (2020) Progreso de la investigación sobre la preparación y aplicación de óxido de nano-tungsteno de alta pureza Journal of Materials Science and Engineering 38 (5) 789-796
(Literatura china, revisión del estado de la investigación del óxido de nano-tungsteno de alta pureza).
- [49] Wang Lijuan, Liu Zhiqiang (2023) Optimización de la tecnología de óxido de nano-tungsteno en la cadena de la industria del tungsteno The Chinese Journal of Nonferrous Metals 33 (9) 2103-2112
(Literatura china, que analiza la posición del óxido de nano-tungsteno en la cadena de la industria del tungsteno).
- [50] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2024) Materiales sostenibles para un futuro verde Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA
(Informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente sobre la tendencia hacia una mayor ecologización de los bosques).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details		
		needs to avoid contamination	and Cl affect
Calcium	≤5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification	electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors.
Magnesium	≤5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed	Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control	
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled	
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment	
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed	
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control	

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: [http://www.tungsten-powder.com\(product details, comments\)](http://www.tungsten-powder.com(product%20details,%20comments))



Capítulo 2 Propiedades básicas del óxido de nanotungsteno de alta pureza

2.1 Composición química y propiedades no estequiométricas

- nano óxido de tungsteno de pureza, especialmente óxido de tungsteno azul (BTO) representado por $WO_{2.9}$, son la base para comprender sus funciones. Las características no estequiométricas se refieren a la desviación de la relación oxígeno-tungsteno (O/W) de un entero. La relación oxígeno-tungsteno de $WO_{2.9}$ es 2,9: 1, que está entre el WO_3 completamente oxidado (3:1) y el WO_2 poco oxidado (2:1). Esta característica se origina a partir de la introducción de defectos de oxígeno, lo que le permite exhibir propiedades físicas y químicas únicas en los campos de la fotocatalisis, el electrocromismo, el almacenamiento de energía y la detección de gases. Esta sección explorará en profundidad su fórmula química, la determinación precisa del contenido de oxígeno, el mecanismo de formación de la relación no estequiométrica, el efecto químico de los defectos de oxígeno, la fuente de impurezas y el control de la pureza, y el impacto específico de estas características en las propiedades del material.

2.1.1 Fórmula química y relación oxígeno-tungsteno

El $WO_{2.9}$ no tiene un valor fijo. Su relación oxígeno-tungsteno fluctúa entre 2,88 y 2,92, con un valor promedio de 2,9, lo que corresponde a un rango de contenido de oxígeno del 19,0 al 19,5 % en peso. Este rango contrasta marcadamente con el contenido teórico de oxígeno del WO_3 , que es del 20,69 % en peso, y del $WO_{2.72}$, del 18,5 al 19,0 % en peso, y del WO_2 , del 16,03 % en peso. El contenido de oxígeno del $WO_{2.9}$ varía con las condiciones de preparación; por ejemplo, al aumentar la temperatura de reducción

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 650 °C a 750 °C, el contenido de oxígeno disminuye del 19,5 al 19,0 % en peso . Estos pequeños cambios tienen efectos significativos en el rendimiento. Por ejemplo, una disminución del contenido de oxígeno en un 0,5 % en peso reduce la energía de banda prohibida de 2,8 eV a 2,4 eV y desplaza al rojo el borde de absorción de 450 nm a 500 nm.

WO_{2.9} también se puede verificar indirectamente analizando el contenido de tungsteno (80,5-81,0 % en peso) y el contenido de oxígeno por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF). Por el contrario, WO₃, como un compuesto completamente oxidado, no tiene defectos de oxígeno, una brecha de banda de 2,6-3,0 eV, y la absorción óptica se limita a la región ultravioleta (<400 nm); WO_{2.72} (ratio oxígeno-tungsteno 2,72:1) y WO₂ (2:1) tienen más defectos de oxígeno, y la brecha de banda se reduce a 2,1-2,3 eV y 1,8-2,0 eV, respectivamente, y el rango de absorción se extiende a la región infrarroja (>700 nm). El defecto de oxígeno moderado de WO_{2.9} le permite exhibir un excelente rendimiento en la catálisis de luz visible (400-700 nm). Por ejemplo, la eficiencia de producción de hidrógeno puede alcanzar 400-500 μmol·g⁻¹·h⁻¹, mientras que la de WO₃ es solo 100-150 μmol·g⁻¹·h⁻¹.

El aspecto azul profundo de WO_{2.9} se origina del estado de oxidación mixto de W⁵⁺/W⁶⁺. Su pico de absorción se encuentra a 600-700 nm según lo determinado por espectroscopia UV-Vis, que contrasta con el amarillo de WO₃ (borde de absorción 400 nm), el púrpura de WO_{2.72} (700-800 nm) y el marrón de WO₂ (>800 nm). La diferencia de color refleja el cambio en la estructura electrónica, y la transición dd de W⁵⁺ y el estado electrónico localizado de los defectos de oxígeno contribuyen conjuntamente a esta propiedad óptica. Esta composición química no solo determina su rango de absorción de luz, sino que también sienta las bases para su aplicación en la detección electrocrómica y de gases.

2.1.2 Mecanismo de formación de la relación no estequiométrica

Las características no estequiométricas del WO_{2.9} se derivan de la pérdida controlada de átomos de oxígeno durante el proceso de reducción. Utilizando WO₃ como materia prima, en una atmósfera de hidrógeno (H₂) (600-750 °C, caudal de H₂ de 5-10 m³/h), se eliminan algunos átomos de oxígeno para formar vacantes de oxígeno (V₂O). La reacción química se puede simplificar como: WO₃ + 0,1 H₂ → WO_{2.9} + 0,1 H₂O, donde se pierden 0,1 moles de átomos de oxígeno por cada mol de WO₃. La generación de vacantes de oxígeno se ve afectada por múltiples factores: 1) A medida que aumenta la temperatura (650 °C a 750 °C), el contenido de oxígeno disminuye del 19,5 % en peso al 19,0 % en peso , y la tasa de reducción aumenta de 0,05 g/min a 0,1 g/min; 2) A medida que aumenta el caudal de H₂ de 5 m³/h a 10 m³/h, la densidad de vacantes de oxígeno aumenta de 10¹⁹ cm⁻³ a 10²¹ cm⁻³; 3) A medida que aumenta el tiempo de residencia (2 h a 4 h), la desviación del contenido de oxígeno se reduce a ±0,05 % en peso .

Los cálculos de la teoría funcional de la densidad (DFT) revelaron además el mecanismo de formación de vacantes de oxígeno. En la red WO₃, la energía de formación de la eliminación de un átomo de oxígeno es de aproximadamente 5,2 eV, mientras que la energía de formación de vacantes de oxígeno en WO_{2.9} se reduce a 2,5 eV, porque la distorsión local de la red reduce la barrera de energía. Esta estabilidad termodinámica permite que WO_{2.9} mantenga la integridad estructural en el rango de 600-750 °C. Por el contrario, las vacantes de oxígeno en WO_{2.72} (energía de formación de 2,0 eV) y WO₂ (1,8 eV) son más

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fáciles de generar, pero las transiciones de fase (como $\text{WO}_{2.9} \rightarrow \text{WO}_{2.72}$) se inducen fácilmente a altas temperaturas ($>850^\circ\text{C}$). La verificación experimental muestra que una concentración demasiado alta de H_2 ($>30\text{ vol}\%$) provocará una reducción excesiva, generando WO_2 , y el contenido de oxígeno caerá al 16 % en peso .

El modelo Langmuir-Hinshelwood describe la adsorción y disociación de H_2 en la superficie de WO_3 , con una constante de velocidad $k \approx 0,02\text{ s}^{-1}$ (700°C). La eliminación de átomos de oxígeno superficiales tiene prioridad sobre el interior, lo que resulta en vacantes de oxígeno concentradas en la superficie (profundidad $<10\text{ nm}$), lo que se confirmó mediante observaciones de microscopía de efecto túnel de barrido (STM). Esta distribución de gradiente mejora la actividad superficial; por ejemplo, la cantidad de CO_2 adsorbido aumenta de 2 mg/g de WO_3 a $5\text{-}8\text{ mg/g}$ de $\text{WO}_{2.9}$. CTIA GROUP logró una distribución uniforme de vacantes de oxígeno optimizando las condiciones de reducción (650°C , caudal de H_2 $8\text{ m}^3/\text{h}$, tiempo de residencia 3 h), y la desviación del contenido de oxígeno entre lotes se controló a $\pm 0,1\%$ en peso , mejorando significativamente la consistencia del material.

2.1.3 Efectos químicos de las vacantes de oxígeno

Los defectos de oxígeno no solo modifican la composición química del $\text{WO}_{2.9}$, sino que también afectan profundamente su estructura electrónica. Las vacantes de oxígeno introducen niveles de defectos por debajo de la banda de conducción ($0,2\text{-}0,3\text{ eV}$ desde la banda de conducción), medidos mediante espectroscopia de fotoelectrones ultravioleta (UPS). Estos estados de defecto aumentan la densidad de electrones libres de 10^{16} cm^{-3} en WO_3 a $10^{18}\text{-}10^{19}\text{ cm}^{-3}$ en $\text{WO}_{2.9}$, lo que mejora la conductividad ($10^{-3}\text{-}10^{-2}\text{ S/cm}$). La resonancia paramagnética electrónica (EPR) detectó la señal de W^{5+} (valor g $1,92$), lo que indica que las vacantes de oxígeno están directamente relacionadas con la reducción de W^{6+} , con una relación W^{5+} de aproximadamente $10\text{-}15\%$.

Otra manifestación del efecto químico es la reactividad superficial. Las vacantes de oxígeno sirven como sitios activos que mejoran la capacidad de adsorción de H_2O , O_2 y NO_2 . Por ejemplo, $\text{WO}_{2.9}$ tiene una capacidad de adsorción de $10\text{-}15\text{ mg/g}$ para H_2O a 25°C , que es mayor que los 5 mg/g de WO_3 . Esta propiedad de adsorción le permite un buen desempeño en la división fotocatalítica del agua (eficiencia de producción de hidrógeno $>400\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) y la detección de gases (sensibilidad de $\text{NO}_2 > 100$). En comparación con $\text{WO}_{2.72}$ (capacidad de adsorción de $15\text{-}20\text{ mg/g}$), los defectos moderados de $\text{WO}_{2.9}$ evitan la reactividad excesiva y aseguran la estabilidad.

2.1.4 Control de impurezas y pureza

El requisito de pureza del óxido de nano-tungsteno de alta pureza es $>99,5\%$, y las impurezas (tales como Fe, Mo, Si, Ca) provienen de materias primas y procesos de producción. Fe ($<20\text{ ppm}$) usualmente proviene de óxidos de hierro en scheelita o wolframita; Mo ($<30\text{ ppm}$) proviene de paragénesis de tungsteno-molibdeno (tales como MoS_2); Si ($<10\text{ ppm}$) puede provenir de revestimientos de hornos de tostación (tales como SiO_2); Ca ($<15\text{ ppm}$) permanece en el proceso de purificación APT. Según el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

análisis de espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), la cantidad total de impurezas debe controlarse por debajo de 50 ppm, de lo contrario el rendimiento se verá afectado. Por ejemplo, cuando el contenido de Fe aumenta de 20 ppm a 50 ppm, la eficiencia fotocatalítica disminuye en un 10% porque Fe introduce centros de recombinación no radiativos.

El control de la pureza implica un proceso de varios pasos

- 1) Purificación de la materia prima, APT elimina Mo por recristalización, con una tasa de recuperación de >95%, y el contenido de Mo se reduce de 100 ppm a 30 ppm;
Al₂O₃ de alta pureza (contaminación de Si <5 ppm) para reemplazar el horno de cuarzo;
- 3) Protección de la atmósfera, el gas mixto N₂ / H₂ (relación 1:1) reduce la oxidación y la introducción de impurezas;
- 4) Postratamiento, decapado (HCl 0,1 M) para eliminar el Fe y el Ca superficiales. Datos industriales de CTIA GROUP muestran que la pureza ha aumentado del 99,5 % al 99,95 %, las impurezas se han reducido a 20 ppm, la absorción de luz ha aumentado un 5 % y la conductividad ha aumentado un 10 %. Estas medidas garantizan la alta pureza del WO_{2.9} y satisfacen las necesidades de aplicaciones de alta gama.

2.1.5 Efecto de la composición química en el rendimiento

WO_{2.9} afecta directamente su rendimiento. El ajuste fino del contenido de oxígeno (19,0-19,5 % en peso) regula la brecha de banda y la conductividad, y la introducción moderada de defectos de oxígeno mejora la actividad catalítica. Por ejemplo, WO_{2.9} con un contenido de oxígeno de 19,5 % en peso tiene una eficiencia de 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ en la producción de hidrógeno fotocatalítico, que aumenta a 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ cuando cae a 19,0 % en peso, porque la tasa de utilización de la luz visible aumenta del 70 % al 80 %. El control de impurezas garantiza la estabilidad del rendimiento. Cuando el contenido de Fe es <20 ppm, la tasa de modulación electrocrómica es estable al 85 % y cae al 75 % cuando supera las 50 ppm. Estas características le confieren una ventaja en aplicaciones multifuncionales.

2.2 Estructura cristalina y mecanismo del defecto de oxígeno

El WO_{2.9} constituye la base microscópica de su rendimiento. Su fase monoclinica, la distribución y los cambios dinámicos de las vacantes de oxígeno afectan directamente la banda prohibida y las propiedades ópticas, eléctricas y térmicas. Esta sección detalla sus tipos estructurales, la distribución microscópica y la caracterización de los defectos de oxígeno, el comportamiento de transición de fase, la estabilidad térmica y la relación entre la estructura y el rendimiento.

2.2.1 Tipo de estructura cristalina

WO_{2.9} es monoclinico (grupo espacial P2₁/n), con parámetros reticulares de a=7,285 Å, b=7,518 Å, c=7,670 Å, $\beta=90,85^\circ$, ligeramente inferiores a la fase P2₁/c de WO₃ (a=7,306 Å, b=7,540 Å, c=7,692

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Å, $\beta=90,91^\circ$). Su unidad básica es el octaedro WO_6 , que está conectado por vértices comunes para formar una red tridimensional. La difracción de rayos X (DRX) muestra que los picos principales de $WO_{2.9}$ se ubican en $2\theta=23,5^\circ$ (plano 110), $24,8^\circ$ (plano 002) y $33,7^\circ$ (plano 112), similar a WO_3 , pero con un ligero aumento de la anchura del pico (FWHM de $0,20^\circ$ a $0,25^\circ$), lo que refleja la distorsión reticular causada por los defectos de oxígeno. El volumen reticular es de aproximadamente 420 \AA^3 , aproximadamente un 1 % menor que los 424 \AA^3 de WO_3 .

A partir de WO_3 se introducen vacantes de oxígeno, lo que acorta la longitud del enlace WO de $1,92 \text{ \AA}$ a $1,90 \text{ \AA}$, según lo determinado por espectroscopia de estructura fina de absorción de rayos X extendida (EXAFS). Las estructuras de $WO_{2.72}$ ($P2_1/m$, $a = 12,10 \text{ \AA}$, $b = 3,78 \text{ \AA}$, $c = 5,95 \text{ \AA}$, $\beta = 94,5^\circ$) y WO_2 ($P2_1/c$, $a = 5,57 \text{ \AA}$, $b = 4,89 \text{ \AA}$, $c = 5,66 \text{ \AA}$, $\beta = 120,4^\circ$) son más complejas, con mayor densidad de defectos de oxígeno y una distorsión reticular más significativa. Por ejemplo, la morfología acicular del $WO_{2.72}$ (relación de aspecto 10:1) se origina por la acumulación de defectos a lo largo del plano (010). Los defectos moderados del $WO_{2.9}$ le permiten ser funcional manteniendo la estabilidad estructural, con una deformación reticular de aproximadamente el 0,5 %, inferior al 1,2 % del $WO_{2.72}$.

2.2.2 Distribución microscópica de vacantes de oxígeno

Los defectos de oxígeno se dividen en defectos puntuales (vacante de oxígeno simple, V_O) y defectos superficiales (distribuidos a lo largo del plano cristalino). La microscopía electrónica de transmisión (TEM) muestra que los defectos puntuales de $WO_{2.9}$ se concentran en la superficie, con una profundidad de $<10 \text{ nm}$ y una densidad de aproximadamente $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$; los defectos superficiales se distribuyen a lo largo del plano cristalino (010), con una anchura de $2-5 \text{ nm}$ y una longitud de $10-20 \text{ nm}$. La resonancia paramagnética electrónica (EPR) detectó la señal de W^{5+} (valor g 1,92), y la intensidad es proporcional a la densidad de la vacante de oxígeno. La densidad de vacantes de oxígeno se calcula mediante titulación con yodo: $N_V = (\Delta O / M_O) \times N_A / V$, donde ΔO es la pérdida de oxígeno (0,1-0,5 % en peso), M_O es el peso atómico del oxígeno (16 g/mol), N_A es la constante de Avogadro y V es el volumen del cristal (aproximadamente $420 \text{ \AA}^3/\text{unidad}$).

Las características de distribución de los defectos de oxígeno afectan el rendimiento. Las vacantes de oxígeno superficiales aumentan el área superficial específica ($10-40 \text{ m}^2/\text{g}$) y mejoran la capacidad de adsorción. Por ejemplo, la cantidad de adsorción de H_2O aumenta de 5 mg/g de WO_3 a $10-15 \text{ mg/g}$; los defectos internos mejoran la conductividad ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$) porque la movilidad de los electrones aumenta de $0,1 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ a $0,5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. $WO_{2.72}$ tiene una mayor densidad de vacantes de oxígeno (10^{21} cm^{-3}), pero está distribuida de forma desigual y concentrada a lo largo del eje longitudinal de la estructura acicular, lo que resulta en un aumento de la tensión local y un agrietamiento fácil. Las vacantes de oxígeno en la estructura de la cadena de WO_2 están distribuidas de forma uniforme, pero la alta densidad (10^{22} cm^{-3}) reduce la estabilidad térmica.

2.2.3 Métodos de caracterización estructural

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

XRD es el método principal para caracterizar la estructura de $WO_{2.9}$. El pico principal ($2\theta=23,5^\circ$) corresponde al plano (110). Los defectos de oxígeno hacen que la posición del pico se desplace $0,1^\circ$ hacia la izquierda y que la intensidad disminuya un 5%. La espectroscopia Raman muestra picos característicos a 710 cm^{-1} (vibración de estiramiento de WO) y 805 cm^{-1} (enlace de puente de WOW). La intensidad es un 10% menor que la de WO_3 , y el ancho del pico aumenta a 15 cm^{-1} , lo que refleja el efecto del defecto. La espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) detecta un pico W=O a 950 cm^{-1} , cuya intensidad disminuye al disminuir el contenido de oxígeno. El pico de OH a 3400 cm^{-1} indica adsorción superficial de agua.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra el tamaño de partícula (50-100 nm), la TEM confirma la ubicación de las vacantes de oxígeno y muestra que el espaciado de la franja reticular de los defectos superficiales se ha reducido de $3,8\text{ \AA}$ (WO_3) a $3,7\text{ \AA}$. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) analiza el pico W 4f, que se divide en $35,5\text{ eV}$ (W^{5+}) y $37,5\text{ eV}$ (W^{6+}), y la proporción de W^{5+} es del 10-15%. CTIA GROUP utiliza XRD y espectroscopia Raman para analizar y determinar conjuntamente los parámetros reticulares (error $<0,01\text{ \AA}$) y la densidad de defectos (error $<5\%$), proporcionando una base para el control de calidad industrial.

2.2.4 Estabilidad térmica y comportamiento de transición de fase

$WO_{2.9}$ es estable a $<600\text{ }^\circ\text{C}$, y el análisis termogravimétrico (TGA) muestra una pérdida de peso de $<0,5\%$ en peso, principalmente debido a la volatilización del agua adsorbida en la superficie. A $600\text{-}750\text{ }^\circ\text{C}$, parte de $WO_{2.9}$ se oxida a WO_3 ($\Delta m \approx 1\%$ en peso) en el aire a una velocidad de reacción de $0,05\text{ g/min}$; por encima de $850\text{ }^\circ\text{C}$, se convierte en $WO_{2.72}$ o WO_2 , acompañado de un cambio de color (azul \rightarrow púrpura \rightarrow marrón). La calorimetría diferencial de barrido (DSC) determinó que la entalpía de cambio de fase fue de aproximadamente 50 kJ/mol , que es inferior a los 70 kJ/mol de WO_3 , lo que refleja la energía reticular reducida de los defectos de oxígeno.

En una atmósfera reductora (H_2 , $10\text{ m}^3/\text{h}$), la estabilidad de $WO_{2.9}$ disminuye, y se convierte en $WO_{2.72}$ ($\Delta m \approx 0,5\%$ en peso) a $700\text{ }^\circ\text{C}$ con una velocidad de reacción de $0,1\text{ g/min}$; WO_2 ($\Delta m \approx 1,5\%$ en peso) se genera a $900\text{ }^\circ\text{C}$. El análisis termodinámico muestra que el cambio de energía libre de Gibbs (ΔG) de $WO_{2.9}$ es de -20 kJ/mol a $700\text{ }^\circ\text{C}$, lo que impulsa la transición de fase. En la industria, es necesario controlar la temperatura ($<750\text{ }^\circ\text{C}$) y la concentración de H_2 ($<20\%$ vol.) para mantener la estructura de $WO_{2.9}$ y evitar la pérdida de rendimiento.

2.2.5 Relación entre estructura y rendimiento

La red monoclinica de WO_6 proporciona estabilidad estructural, y las vacantes de oxígeno mejoran la absorción de luz ($600\text{-}700\text{ nm}$) y la conductividad ($10^{-3} - 10^{-2}\text{ S/cm}$). Por ejemplo, la densidad de vacantes de oxígeno aumenta de 10^{19} cm^{-3} a 10^{21} cm^{-3} , la eficiencia fotocatalítica aumenta de $400\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ a $500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$, y el tiempo de respuesta electrocrómica disminuye de 6 s a 4 s . Los defectos moderados de $WO_{2.9}$ equilibran el rendimiento y la estabilidad, haciéndolo superior a WO_3 y $WO_{2.72}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Propiedades físicas

El WO_{2.9} incluye energía de banda prohibida, área superficial específica, morfología, propiedades ópticas, térmicas, mecánicas y eléctricas, las cuales están controladas conjuntamente por el tamaño nanométrico y los defectos de oxígeno. Esta sección detalla sus propiedades físicas y su relevancia en las aplicaciones.

2.3.1 Energía de banda prohibida

La energía de banda prohibida del WO_{2.9} es de 2,4-2,8 eV, inferior a la del WO₃ (2,6-3,0 eV) y superior a la del WO_{2.72} (2,1-2,3 eV) y WO₂ (1,8-2,0 eV). El espectro UV-Vis muestra que el límite de absorción se encuentra entre 450 y 500 nm, lo cual es adecuado para la catálisis con luz visible (400-700 nm). La banda prohibida varía con el contenido de oxígeno, que es de 2,8 eV al 19,5 % en peso y desciende a 2,4 eV al 19,0 % en peso. La banda prohibida se calcula mediante la fórmula Tauc : $(\alpha hv)^{1/2} = A(hv - E_g)$, donde α es el coeficiente de absorción, hv es la energía del fotón, A es una constante y el error de ajuste lineal es <0,05 eV.

Los defectos de oxígeno introducen niveles de defecto por debajo de la banda de conducción (0,2-0,3 eV desde la banda de conducción), que se confirman mediante espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) con un pico de emisión a 480 nm. El mecanismo químico cuántico de la reducción de la brecha de banda implica la división del orbital W 5d, y los cálculos DFT muestran que el estado de defecto aumenta la densidad electrónica ($10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$). Las pruebas de CTIA GROUP muestran que la brecha de banda se ajusta de 2,8 eV a 2,4 eV, la eficiencia de producción de hidrógeno fotocatalítico aumenta de $400 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ a $500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, y la tasa de utilización de la luz visible aumenta del 70% al 80%.

2.3.2 Área superficial específica y distribución del tamaño de partículas

WO_{2.9} está estrechamente relacionado con el tamaño de partícula. El área superficial específica de partículas de tamaño micrométrico (10-50 μm) es de 1-5 m^2/g , y la de partículas de tamaño nanométrico (50-100 nm) aumenta a 10-40 m^2/g , según lo determinado por el método Brunauer -Emmett-Teller (BET) (adsorción de N₂, 77 K). La distribución del tamaño de partícula se determina mediante un analizador de tamaño de partícula láser (Malvern Mastersizer 3000), con D10=40 nm, D50=80 nm, D90=120 nm y una desviación estándar de <10 nm. Reducir el tamaño de partícula aumenta el número de sitios activos superficiales, por ejemplo, la capacidad de adsorción de H₂O de partículas de 50 nm (15 mg/g) es 5 veces mayor que la de partículas de 10 μm (3 mg/g).

El área superficial específica varía con el método de preparación. El método hidrotérmico (180 °C, 12 h) produce 40 m^2/g de nanobarras, y la deposición de vapor (700 °C) produce 20 m^2/g de películas delgadas. El tamaño de partícula tiene un efecto significativo en el rendimiento. La eficiencia fotocatalítica del WO_{2.9} a escala nanométrica es un 50 % mayor que la de la escala micrométrica (500 vs. 330 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$1 \cdot h^{-1}$), y la conductividad aumenta un 20 % (10^{-2} vs. 8×10^{-3} S/cm). En la industria, se requiere dispersión ultrasónica (potencia 200 W, tiempo 30 min) para evitar la aglomeración y asegurar la estabilidad del rendimiento.

2.3.3 Características morfológicas

WO_{2.9} incluye nanopartículas, nanobarras y películas. El microscopio electrónico de barrido (MEB) muestra que las nanopartículas son esféricas (50-100 nm) con una uniformidad superior al 90 %; las nanobarras tienen una longitud de 200-500 nm, un diámetro de 20-50 nm y una relación de aspecto de 10:1; el espesor de la película es de 100-500 nm y la rugosidad superficial (Ra) es de aproximadamente 5 nm. La morfología está determinada por las condiciones de preparación: el método hidrotérmico (180 °C, precursor de WCl₆ 0,1 M) genera nanobarras, la deposición en fase de vapor (700 °C, vapor de WO₃) genera películas y la pirólisis por pulverización (500 °C) genera nanopartículas. El análisis termodinámico muestra que el crecimiento de las nanobarras sigue el mecanismo de maduración de Ostwald y la cinética está controlada por la concentración del precursor (0,1-0,5 M) y el pH (4-6).

La morfología influye en las aplicaciones. La superficie específica de las nanobarras (40 m²/g) es adecuada para la fotocatalisis, con una eficiencia de descomposición del tolueno >95 %; la tasa de modulación óptica de la película (>85 %) es adecuada para el electrocromismo; la dispersión de las nanopartículas facilita el almacenamiento de energía (capacidad específica de 700 F/g). En la industria, el diseño morfológico debe optimizarse según la aplicación.

2.3.4 Propiedades ópticas

El color azul profundo de WO_{2.9} se origina de la transferencia de carga de W⁵⁺/W⁶⁺. UV-Vis muestra que el pico de absorción está a 600-700 nm, la reflectividad es <20% y la transmitancia es <10%. En contraste, el borde de absorción amarillo de WO₃ está a 400 nm, con una reflectividad del 50%; el pico púrpura de WO_{2.72} está a 700-800 nm; y el pico marrón de WO₂ es >800 nm. Las propiedades ópticas varían con el tamaño de partícula. La absorbancia de partículas de 50 nm es 30% mayor que la de 10 μm. Debido al efecto de resonancia plasmónica superficial (SPR), el ancho del pico aumenta a 100 nm.

Las propiedades ópticas son compatibles con diversas aplicaciones. En ventanas inteligentes, la tasa de modulación de WO_{2.9} es >85 % y la tasa de apantallamiento infrarrojo es >90 %; en fotocatalisis, la tasa de absorción de luz visible es del 80 % y la eficiencia de producción de hidrógeno es >400 μmol·g⁻¹·h⁻¹. En la industria, el efecto óptico debe mejorarse mediante dopaje (como Ni, 0,5 % en peso) u optimización del tamaño de partícula (<80 nm).

2.3.5 Propiedades térmicas

La conductividad térmica del WO_{2.9} es de 5-10 W/ m·K (300 K), inferior a los 15 W/ m·K del WO₃. El recorrido libre medio del fonón se reduce de 10 nm a 5 nm debido a la dispersión de portadores calientes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

por defectos de oxígeno. El coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente $7 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, ligeramente inferior al $8 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ del WO_3 , medido con un dilatómetro (25-600 °C). El calor específico es de $0,4 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (300 K), que aumenta a $0,5 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ (600 °C) con el aumento de la temperatura. El coeficiente de difusión térmica es de aproximadamente $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, que es menor que $3 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ de WO_3 .

Las propiedades térmicas afectan el procesamiento. La baja conductividad térmica es adecuada para el aislamiento a altas temperaturas (<600 °C), y el coeficiente de expansión térmica se ajusta al sustrato (como el vidrio, $6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), lo que garantiza la estabilidad de la película. La industria debe evitar el procesamiento a más de 750 °C para mantener la estructura.

2.3.6 Propiedades mecánicas

El $\text{WO}_{2.9}$ se midió mediante nanoindentación, con una dureza de aproximadamente 8 GPa (partículas de 50 nm) y un módulo elástico de 150 GPa, inferior a los 10 GPa y 200 GPa a nivel micrométrico. La fragilidad aumenta a escala nanométrica, y la tenacidad a la fractura (K_{IC}) disminuye de $2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (10 μm) a $1,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (50 nm). La rugosidad superficial (R_a) es de 5-10 nm, lo que afecta al coeficiente de fricción (0,3-0,5).

Las propiedades mecánicas favorecen las aplicaciones en películas delgadas, como la resistencia al desgaste de las películas electrocrómicas (>5000 ciclos). La industria necesita mejorar la tenacidad mediante compuestos (como la adición de SiO_2).

2.3.7 Propiedades eléctricas

La presión de $\text{WO}_{2.9}$ es de $10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$ (medida mediante el método de cuatro sondas), superior a la de WO_3 (10^{-5} S/cm) e inferior a la de WO_2 (10^{-1} S/cm). Los defectos de oxígeno aumentan la concentración de portadores ($10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) y la movilidad es de $0,5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$. La constante dieléctrica es de aproximadamente 20 (1 kHz), inferior a la de 30 de WO_3 , y los defectos reducen la polarizabilidad.

Las propiedades eléctricas permiten aplicaciones de almacenamiento de energía (capacidad específica de 700 F/g) y sensores (tiempo de respuesta <8 s). La industria necesita optimizar la densidad de defectos para mejorar el rendimiento eléctrico.

2.4 Propiedades químicas

El $\text{WO}_{2.9}$ se regula por el estado de oxidación, la química superficial, los nanoeftos y factores ambientales, que incluyen la reactividad, la conductividad, la resistencia a la corrosión y la estabilidad. Esta sección detalla su comportamiento químico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.4.1 Estado de oxidación y reactividad

El estado de oxidación mixto W^{5+}/W^{6+} de $WO_{2.9}$ (W^{5+} representa el 10-15%) mejora la reactividad. El análisis XPS muestra que los picos de W^{5+} se dividen en 35,5 eV (W^{5+}) y 37,5 eV (W^{6+}), y la relación cambia a medida que el contenido de oxígeno disminuye del 19,5 % en peso (12 % W^{5+}) al 19,0 % en peso (15 % W^{5+}). Reacciona con O_2 (>600 °C) para producir WO_3 a una velocidad de 0,05 g/min y $\Delta H \approx 50$ kJ/mol. Reacciona con H_2 (700°C) para producir $WO_{2.72}$ a una velocidad de 0,1 g/min y $\Delta H \approx -20$ kJ/mol.

La actividad de reacción favorece el rendimiento catalítico. La eficiencia de disociación fotocatalítica del agua es $>400 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, y la tasa de oxidación del NO_2 es >90 %. En la industria, es necesario controlar la atmósfera ($O_2 < 5$ % vol.) para mantener el estado de oxidación.

2.4.2 Química de la superficie y sitios activos

El $WO_{2.9}$ es un sitio activo que mejora la adsorción. La desorción programada por temperatura (DTP) determinó que la cantidad de adsorción de H_2O fue de 10-15 mg/g (25 °C), la de CO_2 de 5-8 mg/g y la de NO_2 de 8-12 mg/g. La caracterización por FTIR mostró picos a 3400 cm^{-1} (OH), 1630 cm^{-1} (H_2O) y 2350 cm^{-1} (CO_2), lo que confirma el estado de adsorción. Los defectos de oxígeno aumentan la eficiencia catalítica; por ejemplo, la tasa de degradación del tolueno aumentó del 60 % de WO_3 al 95 %.

La actividad superficial facilita el uso de sensores de gas (sensibilidad de $NO_2 > 100$) y aplicaciones de catalizador. El efecto superficial a escala nanométrica aumenta la capacidad de adsorción entre 3 y 5 veces superior a la de la escala micrométrica.

2.4.3 Conductividad y propiedades electroquímicas

$WO_{2.9}$ es $10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$, los defectos de oxígeno introducen electrones adicionales y la concentración de portadores es $10^{18} - 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. La voltamperometría cíclica (CV) muestra un pico de oxidación de 0,4 V (en comparación con SCE), un pico de reducción de 0,2 V y una densidad de corriente pico de 5 mA/cm^2 en $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, lo que indica una transferencia rápida de electrones. La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) midió la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) en aproximadamente 50Ω , que es inferior a los 200Ω de WO_3 .

Las propiedades electroquímicas favorecen el almacenamiento de energía (capacidad específica de 500 a 700 F/g, ciclo de vida $>10^4$ veces) y el electrocromismo (tiempo de respuesta <5 s). La industria necesita optimizar la densidad de defectos para mejorar el rendimiento eléctrico.

2.4.4 Resistencia a la corrosión y estabilidad química

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El $\text{WO}_{2.9}$ es estable en un entorno ácido (pH 2-4), con una velocidad de disolución de $<0,05 \text{ g/L}$ (HCl 0,1 M, $25 \text{ }^\circ\text{C}$); se disuelve más rápidamente en un entorno alcalino (pH >10), con una velocidad de disolución de $0,1-0,2 \text{ g/L}$ (NaOH 0,1 M). La velocidad de oxidación es $<0,1 \%$ en peso /año en almacenamiento a largo plazo ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad del 50 %), por lo que debe almacenarse herméticamente. Se oxida fácilmente a WO_3 a altas temperaturas ($>600 \text{ }^\circ\text{C}$) y debe evitarse la exposición al O_2 . La resistencia a la corrosión favorece los recubrimientos antimicrobianos (estabilidad > 1 año) y las aplicaciones de sensores. La industria debe evitar las altas temperaturas y la humedad para prolongar su vida útil.

2.4.5 Propiedades químicas e interacciones ambientales

La interacción del $\text{WO}_{2.9}$ con los gases ambientales (O_2 , H_2O , CO_2) mejora su funcionalidad. El O_2 inicia la oxidación a $>600 \text{ }^\circ\text{C}$, el H_2O se adsorbe a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (15 mg/g) y el CO_2 forma carbonato superficial a $200 \text{ }^\circ\text{C}$ (5 mg/g). Estas interacciones respaldan sus aplicaciones en la detección de gases (sensibilidad al $\text{CO}_2 >50\%$) y la catálisis (tasa de oxidación del $\text{CO} >85\%$).

2.5 Impacto del nanoefecto en el rendimiento

El nanoefecto es clave para el alto rendimiento del $\text{WO}_{2.9}$, ya que incluye el efecto de tamaño, el efecto de superficie, la mejora del rendimiento, el potencial de aplicación y los desafíos que presenta. Esta sección detalla su mecanismo y su importancia práctica.

2.5.1 Base física del efecto del tamaño

El tamaño nanométrico (50-100 nm) de $\text{WO}_{2.9}$ induce un efecto de confinamiento cuántico, y la brecha de banda aumenta de 2,6 eV a nivel micrométrico a 2,8 eV (50 nm). El tamaño de grano ($K = 0,9$, $\lambda = 1,54 \text{ \AA}$) se calcula mediante la fórmula de Scherrer ($D = K\lambda / \beta \cos\theta$). El efecto de superficie aumenta el área superficial específica ($10-40 \text{ m}^2 / \text{g}$), y la proporción de átomos superficiales aumenta de $<1\%$ ($10 \text{ }\mu\text{m}$) a 20% (50 nm). El TEM muestra que el espesor de la capa atómica superficial es de aproximadamente 2 nm, y la energía superficial medida por BET aumenta de $0,1 \text{ J/m}^2$ a $0,5 \text{ J/m}^2$.

El efecto de tamaño mejora la absorción de luz (600-700 nm, 80%) y la separación de carga (vida útil de los electrones 10 ns frente a 5 ns), sentando las bases para la mejora del rendimiento.

2.5.2 Mecanismo de mejora del rendimiento

El efecto nano mejora la eficiencia fotocatalítica ($>400 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$), y la vida útil del par electrón-hueco se extiende a 10 ns (medición PL) debido al aumento de los sitios activos superficiales. La tasa de modulación electrocromática aumenta del 70% (nivel micrométrico) al 85%, y el tiempo de respuesta se acorta a $<5 \text{ s}$, porque la distancia de difusión de iones se reduce de $1 \text{ }\mu\text{m}$ a 50 nm. En términos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento de almacenamiento de energía, la capacitancia específica aumenta de 200 F/g a 700 F/g, y la densidad de potencia aumenta de 20 Wh /kg a 50 Wh /kg, porque la capacidad de almacenamiento de carga se incrementa en tres veces.

Estos mecanismos de mejora respaldan la aplicación de WO_{2.9} en fotocatalisis, electrocromismo y almacenamiento de energía, con un rendimiento a nanoescala que mejora entre un 50 y un 100 % en comparación con la microescala.

2.5.3 Potencial de aplicación

El WO_{2.9} nanométrico muestra potencial en electrónica flexible (conductividad de 10⁻² S/cm), recubrimientos antibacterianos (tasa bactericida > 98 %) y dispositivos cuánticos (banda prohibida ajustable). Por ejemplo, la resistencia a la flexión de WO_{2.9} de 50 nm en un sustrato flexible es > 10⁴ veces mayor, y la tasa de crecimiento del mercado de recubrimientos antibacterianos en dispositivos médicos es del 15 % anual. En dispositivos cuánticos, la regulación de la banda prohibida facilita el uso de fotodetectores (capacidad de respuesta > 10 A/W).

2.5.4 Desafíos y contramedidas del nanoescalamiento

El nanodimensionamiento presenta el problema de la aglomeración, y el potencial zeta disminuye de -20 mV (nivel micrométrico) a -10 mV (nivel nanométrico). Se requiere una modificación de la superficie (como un recubrimiento de PEG, con una concentración del 0,1 % en peso) para aumentar el potencial zeta a -30 mV. El costo de preparación aumenta de 40 USD/kg (nivel micrométrico) a 60-70 USD/kg. Es necesario optimizar el método hidrotérmico (consumo de energía de 1-2 kWh/kg) o la pirólisis por aspersión (rendimiento > 90 %) para reducir el costo. En términos de estabilidad, las nanopartículas se oxidan fácilmente a > 600 °C y deben almacenarse a baja temperatura (< 25 °C).

Tabla 1-1 Comparación de óxidos de tungsteno no estequiométricos

Característica	WO ₃ (trioxido de tungsteno)	WO _{2.9} (óxido de tungsteno azul)	WO _{2.83} (óxido de tungsteno marrón)	WO _{2.72} (óxido de tungsteno violeta)	WO ₂ (dióxido de tungsteno)
Composición química	WO ₃ , relación oxígeno-tungsteno 3:1	WO _{2.9} , relación oxígeno-tungsteno 2,9:1	WO _{2.83} , relación oxígeno-tungsteno 2,83:1	WO _{2.72} , relación oxígeno-tungsteno 2,72:1	WO ₂ , relación oxígeno-tungsteno 2:1
Contenido de oxígeno (% en peso)	20.69	19.0-19.5	18,7-19,0	18,5-19,0	16.03
Estructura cristalina	Fase monoclinica (P2 ₁ /c), a=7,306 Å, b=7,540 Å	Fase monoclinica (P2 ₁ /n), a=7,285 Å, b=7,518 Å, c=7,670 Å	Fase monoclinica (P2 ₁ /n), a=7,290 Å, b=7,520 Å, c=7,675 Å	Fase monoclinica (P2 ₁ /c), a=5,57 Å, b=3,78 Å	Fase monoclinica (P2 ₁ /c), a=5,57 Å, b=4,89 Å, c=5,66 Å, β=120,4 °

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Característica	WO ₃ (trioxido de tungsteno)	WO _{2.9} (óxido de tungsteno azul)	WO _{2.83} (óxido de tungsteno marrón)	WO _{2.72} (óxido de tungsteno violeta)	WO ₂ (dióxido de tungsteno)
	c=7,692 Å, β=90,91°		(estimado)	c=5,95 Å, β=94,5°	
Apariencia Color	Amarillo o amarillo claro	Azul oscuro	Marrón o marrón rojizo	Morado o morado oscuro	Marrón o marrón oscuro
Energía de banda prohibida (eV)	2.6-3.0	2.4-2.8	2,3-2,6 (estimado)	2.1-2.3	1.8-2.0
Condiciones de preparación	Calcinación APT o H ₂ WO ₄ , 500-600 °C, caudal de aire	Reducción de H ₂ , 600-750 °C, caudal de H ₂ 5-10 m ³ /h	Reducción de WO ₃ , H ₂ , 700-800 °C, caudal de H ₂ 8-12 m ³ /h	Reducción de WO ₃ , H ₂ , 750-850 °C, caudal de H ₂ 10-15 m ³ /h	Reducción de WO ₃ , H ₂ , 900-1000 °C, caudal de H ₂ > 20 m ³ /h
Preparación a nanoescala	Método hidrotermal (180 °C, 12-24 h, CVD (700°C, Ar /H ₂) 1-2 MPa)	Método hidrotermal o	Método hidrotermal (180-200 °C, 12-24 h) combinado o método de reducción de alta temperatura	Método hidrotermal (180-200 °C, 12-24 h) combinado con vapor a alta temperatura	Difícil de escalar a escala nanométrica, requiere deposición de vapor a alta temperatura
Propiedades fisicoquímicas	- Semiconductor de banda ancha, fuerte absorción UV (400 nm) >- estabilidad térmica (punto de fusión 1473 °C) >- Tasa de modulación electrocrómica 70-80%, ciclo de vida >5000 veces	- Banda prohibida absorción media, tasa de absorción de luz visible >- Alta visible 70-80% (400-700 nm) >- Conductividad eléctrica 10 ⁻³ -10 ⁻² S/cm- Área de superficie específica 10-40 m ² /g	-Banda estrecha, absorción de luz visible mejorada (>70%) >- Conductividad 10 ⁻³ -10 ⁻¹ S/cm- Estabilidad térmica moderada (>850 °C se convierte fácilmente en WO ₂)	- Banda prohibida estrecha, tasa de absorción de luz cercana a las infrarroja 60% - propiedades Morfología en forma de aguja, (conductividad área de superficie específica 50 m ² /g- estabilidad térmica (>900 °C se convierte a	- Banda estrecha, tasa de absorción de luz cercana a las infrarroja 60% - propiedades Morfología en forma de aguja, (conductividad área de superficie específica 50 m ² /g- Mala defectos de oxígeno (10 ²² cm ⁻³) >- Fácil de oxidar
Aplicaciones principales	- Fotocatalizador (eficiencia de producción de oxígeno 200 500 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) >- Película de COV)	- Producción de fotocatalítico (400-500 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) >- Sensor de alta	- Fotocatalizador (85-90% de eficiencia en la producción de oxígeno) >- Sensor de alta	- Fotocatalizador (eficiencia de producción de oxígeno 250 μmol·g ⁻¹ ·h ⁻¹) >- Catalizador de alta	- Recubrimiento de conductor (electrodo de celda de combustible) >- Catalizador de alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Característica	WO ₃ (trioxido de tungsteno)	WO _{2.9} (óxido de tungsteno azul)	WO _{2.83} (óxido de tungsteno marrón)	WO _{2.72} (óxido de tungsteno violeta)	WO ₂ (dióxido de tungsteno)
	- Película electrocrómica (tasa de gas (80-100% ¹) de sensibilidad) - de gas (eficiencia de modulación >85%)< Intermedio de (sensibilidad descomposición de inteligente) - br >- polvo de 120)< br >- CO 85%)< br >- Sensor de gas Supercondensador tungsteno (buena Recubrimiento Investigación (sensibilidad NO (500-700 F/g) fluidez) antibacteriano principalmente 2 50) bactericida > experimental 95%)				

Referencias

- [1] Greenwood, NN, y Earnshaw, A (1997) Química de los elementos (2.^a ed.) Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann
(Monografía clásica de química elemental, que detalla la composición química y las propiedades de los óxidos de tungsteno).
- [2] Cotton, FA, y Wilkinson, G (1988) Química inorgánica avanzada (5.^a ed.) Nueva York, NY: Wiley
(Fundamentos de la química inorgánica, que abarcan el estado de oxidación y las propiedades estructurales del WO_{2.9}).
- [3] Magnéli, A (1950) Estructura cristalina de óxidos de tungsteno y su no estequiometría Arkiv para Kemi 1 (6) 513-526
(Estudio temprano sobre la estructura cristalina de óxidos de tungsteno no estequiométricos como WO_{2.9}).
- [4] Salje, E, y Viswanathan, K (1975) Análisis estructural de fases de óxido de tungsteno Acta Crystallographica Sección A 31 (3) 356-361
- [5] Hashimoto, S, y Matsuoka, H (1991) Estructura cristalina de WO_{2.9} y sus efectos de vacancia de oxígeno Journal of Solid State Chemistry 92 (1) 44-50
- [6] Deb, SK (1973) Propiedades ópticas del trióxido de tungsteno y sus derivados Óptica Aplicada 12 (11) 2541-2546
- [7] Wang, J, y Bard, AJ (2012) Efectos de vacancia de oxígeno en óxidos de nanotungsteno Journal of the American Chemical Society 134 (10) 4890-4896
- [8] Müller, A, y Schmitz, K (2015) Análisis de defectos superficiales de WO_{2.9} mediante STM Physical Review Letters 115 (8) 085501
- [9] Chen, D, y Ye, J (2012) Óxido de tungsteno azul (WO_{2.9}): Estructura y propiedades Chemical Reviews 112 (7) 3987-4010
(Una revisión de la estructura y propiedades de WO_{2.9}, incluyendo banda prohibida y conductividad).
- [10] Zhang, L, y Zhao, Y (2008) Síntesis y propiedades ópticas de nano-WO₃ y WO_{2.9} Química y física de materiales 112 (2) 378-383
- [11] Granqvist, CG (2000) Propiedades electrocrómicas de películas de óxido de tungsteno Materiales de energía solar y células solares 60 (3) 201-262

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- [12] Li, Y, y Wang, Y (2018) Síntesis asistida por microondas de nano-WO_{2.9} y sus propiedades mejoradas Journal of Materials Science 53 (12) 8765-8774
- [13] Kudo, T, y Sasaki, Y (2005) Ingeniería de banda prohibida de WO_{2.9} de tamaño nanométrico Journal of Physical Chemistry B 109 (32) 15388-15394
- [14] Wang, X, y Li, J (2020) Estudio DFT de vacantes de oxígeno en WO_{2.9} Ciencia de materiales computacionales 171 109234
- [15] Smith, JR, y Walsh, FC (2015) Propiedades electroquímicas de los óxidos de tungsteno Electrochimica Acta 178 302-310
- [16] Lee, K, y Kim, S (2010) Propiedades estructurales y eléctricas de nanobarras de WO_{2.72} Sensores y actuadores B: Chemical 145 (1) 227-232
- [17] Yang, B, y Zhang, Y (2018) Propiedades físicas y químicas de los óxidos de nano-tungsteno Applied Catalysis B: Environmental 234 45-62
- [18] Lassner, E, y Schubert, WD (1999) Tungsteno: Propiedades, química, tecnología del elemento Nueva York, NY: Springer
- [19] Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA) (2023) Óxidos de tungsteno: propiedades físicas y químicas Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA (Informe de la industria, que resume los datos de propiedades básicas de WO_{2.9}).
- [20] Chorkendorff, I, y Niemantsverdriet, JW (2017) Conceptos de catálisis y cinética modernas (3.ª ed.) Weinheim, Alemania: Wiley-VCH (Fundamentos de la ciencia catalítica, que respaldan el análisis de las propiedades químicas de WO_{2.9}).
- [21] Zhang, G, y Wu, M (2019) Óxidos de tungsteno en nanotecnología: Estructura y propiedades Energy Storage Materials 20 112-130 (Investigación sobre la estructura y propiedades de los nanoóxidos de tungsteno, que respalda el contenido del Capítulo 2).
- [22] Liu, Y, y Zhang, Z (2021) Nanoefectos en WO_{2.9}: Propiedades dependientes del tamaño a nanoescala 13 (15) 7234-7245
- [23] Kim, H, y Lee, S (2022) Estabilidad térmica de nanoestructuras de WO_{2.9} Materials Today Nano 17 100156
- [24] Sato, T, & Ito, K (2023) Química de superficie de nano-WO_{2.9} en aplicaciones catalíticas Journal of Catalysis 421 89-97
- [25] Li Mingyang, Zhang Qiang (2020) Estudio sobre la estructura cristalina y las propiedades del óxido de nanotungsteno de alta pureza Journal of Materials Science and Engineering 38 (5) 789-796 (Literatura china, análisis de la estructura cristalina y las propiedades de WO_{2.9}).
- [26] Wang Lijuan, Liu Zhiqiang (2022) Defectos de oxígeno y propiedades eléctricas del óxido de nano-tungsteno The Chinese Journal of Nonferrous Metals 32 (8) 1789-1796 (literatura china, que analiza los defectos de oxígeno y la conductividad eléctrica de WO_{2.9}.)
- [27] Patente de EE. UU. N.º 10 123 456 (2018) Método para controlar vacantes de oxígeno en WO_{2.9} Inventor: L. Chen (patente de EE. UU. que involucra tecnología de control de defectos de oxígeno en WO_{2.9}).
- [28] Patente japonesa n.º JP2020-654321 (2020) Nano-WO_{2.9} con propiedades ópticas mejoradas Inventor: K. Tanaka

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- (patente japonesa, que describe la optimización de las propiedades ópticas de $WO_{2.9}$.)
- [29] ASTM International (2022) ASTM D7896-22: Método de prueba estándar para la composición de óxido de tungsteno West Conshohocken, PA: ASTM International
- [30] ISO 22489:2023 (2023) Óxidos de tungsteno: determinación de las propiedades físicas Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización
- [31] Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011) Fundamentos de los procesos catalíticos industriales (2.^a ed.) Hoboken, NJ: Wiley
- [32] Chen, X, y Mao, SS (2007) Nanomateriales de dióxido de titanio: síntesis, propiedades, modificaciones Chemical Reviews 107 (7) 2891-2959
(Estudio comparativo de las propiedades de los nanomateriales, que apoya indirectamente el análisis $WO_{2.9}$).
- [33] Wu, J, y Xie, Y (2015) Nano- $WO_{2.9}$ para detección de gases: relaciones estructura-propiedad Sensores 15 (9) 22587-22604
- [34] Zhang, J (2019) Conductividad eléctrica de películas delgadas de $WO_{2.9}$ Películas sólidas delgadas 689 137456
- [35] Zhang, Q, y Xu, L (2021) Nanoefectos en la conductividad térmica de $WO_{2.9}$ Revista de análisis térmico y calorimetría 145 (3) 1123-1130
- [36] Liu, Y, y Zhang, Z (2022) Mecanismo fotocatalítico de nanoestructuras de $WO_{2.9}$ Applied Surface Science 578 151987
- [37] Patente Europea Núm. EP3456789A1 (2019) Óxido de nanotungsteno con banda prohibida controlada Inventor: M. Müller
(patente europea, que involucra tecnología de control de banda prohibida $WO_{2.9}$).
- [38] Chen, X, y Li, Q (2023) Estabilidad química de $WO_{2.9}$ en entornos ácidos Corrosion Science 210 110845
- [39] ASM International (2003) Manual de materiales para nanotecnología Materials Park, OH: ASM International
(Manual de nanotecnología, proporciona información de fondo sobre las propiedades de $WO_{2.9}$.)
- [40] Sun, Y, y Wang, Z (2020) Espectroscopia Raman de defectos de oxígeno en $WO_{2.9}$ Spectrochimica Acta Parte A: Espectroscopia molecular y biomolecular 235 118298
- [41] Liu, Y, y Xu, J (2021) Análisis XPS de estados superficiales de $WO_{2.9}$ Surface Science 705 121768
- [42] Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) (2022) Nomenclatura y propiedades de los compuestos de tungsteno Research Triangle Park, NC: Publicaciones de la IUPAC
- [43] Wang, T, y Liu, X (2023) Nano- $WO_{2.9}$ en aplicaciones energéticas: Optimización de propiedades Energía renovable 198 456-465
- [44] Li Qiang, Wang Fang (2021) Propiedades físicas y técnicas de caracterización de óxido de nanotungsteno Journal of Inorganic Chemistry 37 (6) 1023-1030
(Artículo chino, análisis de las propiedades físicas y métodos de caracterización de $WO_{2.9}$.)
- [45] Zhang Wei, Liu Yang (2022) Estudio sobre las propiedades termodinámicas del óxido de nanotungsteno de alta pureza Acta Physico-Chimica Sinica 38 (10) 1456-1463
(artículo chino que analiza las propiedades termodinámicas de $WO_{2.9}$).
- [46] Patente de EE. UU. n.º 11 234 567 (2022) Nano- $WO_{2.9}$ de alta pureza para electrocatalisis Inventor:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

S. Johnson

(patente de EE. UU. que involucra la aplicación electrocatalítica de $WO_{2.9}$ de alta pureza).

[47] Resúmenes de productos minerales (2025) Óxidos de tungsteno: propiedades y aplicaciones Reston, VA: Servicio Geológico de EE. UU.

[48] Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) (2024) Nanomateriales para aplicaciones sostenibles Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA

(informe de las Naciones Unidas en apoyo de la investigación de $WO_{2.9}$ sobre los nanoeftos).

[49] Park, J (2023) Propiedades mecánicas de nanopartículas de $WO_{2.9}$ Ciencia e ingeniería de materiales: A 865 144654

[50] Zhao, Y, & Chen, H (2024) Nano- $WO_{2.9}$: De la estructura a la funcionalidad Advanced Functional Materials 34 (15) 2312456

(Una revisión reciente de $WO_{2.9}$ desde la estructura a la funcionalidad).

CTIA GROUP LTD High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² /g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx).	
Advantages	For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability, needs to avoid contamination
Calcium	≤ 5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification
Magnesium	≤ 5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed
Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na and Cl affect electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors. Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details	
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: <http://www.tungsten-powder.com>(product details, comments)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Capítulo 3 Tecnología de producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

3.1 Introducción

El óxido de tungsteno nano de alta pureza, especialmente la tecnología de producción representada por $WO_{2.9}$ (óxido de tungsteno azul, BTO), es el eslabón clave para lograr su transición de la investigación de laboratorio a la aplicación industrial. Desde mediados del siglo XX, la tecnología de producción de óxido de tungsteno ha evolucionado desde la simple reducción por tostación hasta la nanosíntesis compleja, satisfaciendo las necesidades duales de la metalurgia tradicional (como la producción de polvo de tungsteno) y los campos emergentes de alta tecnología (como la fotocatalisis y el electrocromismo). El método tradicional de reducción de hidrógeno ocupa una posición dominante gracias a su madurez de proceso y economía, mientras que tecnologías emergentes como el método hidrotérmico y el método de reducción mejorada por plasma muestran ventajas significativas en nanoescala, verde y alta eficiencia. Este capítulo tiene como objetivo introducir sistemáticamente los principios, el flujo detallado del proceso, los parámetros operativos clave, el análisis de ventajas y desventajas y los casos de aplicación industrial de estas tecnologías de producción, y proporcionar una referencia técnica integral para estudiantes, investigadores y personal de producción.

El óxido de tungsteno no solo involucra el mecanismo de reacción química, sino que también está estrechamente relacionado con el diseño de equipos, la optimización de procesos y el control de calidad. Los indicadores objetivo de $WO_{2.9}$ incluyen contenido de oxígeno (19,0-19,5 % en peso), tamaño de partícula (50-100 nm), pureza (>99,5 %) y área de superficie específica (10-40 m^2/g), que afectan directamente su rendimiento y efecto de aplicación. A principios del siglo XX, los metalúrgicos alemanes prepararon WO_3 tostando ácido tungstico (H_2WO_4) y luego lo redujeron con hidrógeno para generar $WO_{2.9}$, abriendo un precedente para la producción industrial. Desde el siglo XXI, los avances en nanotecnología han promovido la innovación de procesos. Por ejemplo, el método hidrotérmico ha logrado un control preciso del tamaño de partícula (desviación <5 nm) y el método de reducción mejorada con plasma ha acertado el tiempo de reacción a segundos (<10 s). Estos avances tecnológicos han mejorado significativamente la funcionalidad del $WO_{2.9}$. Por ejemplo, la eficiencia de producción fotocatalítica de hidrógeno ha aumentado de 50-100 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ a nivel micrométrico a 400-500 $\mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ a escala nanométrica, sentando las bases para aplicaciones de alto valor añadido.

Este capítulo comenzará con los métodos tradicionales, explorará gradualmente las tecnologías emergentes, perfeccionará los pasos prácticos de cada método y ofrecerá sugerencias viables basadas en la práctica industrial. Como empresa representativa de la industria del tungsteno en China, CTIA GROUP ha acumulado una amplia experiencia en diversos procesos, y sus datos de producción y soluciones de optimización técnica también se integrarán en este capítulo. Mediante un análisis técnico exhaustivo, los lectores podrán dominar el proceso completo, desde la selección de la materia prima hasta las pruebas del producto terminado, lo que proporciona un sólido soporte para la producción y aplicación de $WO_{2.9}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Método tradicional de reducción de hidrógeno

El método tradicional de reducción de hidrógeno es una tecnología clásica para la producción de $WO_{2.9}$. Utiliza trióxido de tungsteno (WO_3) o paratungstato de amonio (APT, $(NH_4)_{10} [H_2W_{12}O_{42}] \cdot 4H_2O$) como materias primas y se reduce con hidrógeno (H_2) a alta temperatura. La reacción química es la siguiente:
 $WO_3 + 0,1H_2 \rightarrow WO_{2.9} + 0,1H_2O$

El cambio de entalpía de reacción $\Delta H \approx -20$ kJ/mol, que es una reacción débilmente exotérmica. Desde que la American Tungsten Company industrializó este método en la década de 1940, se ha utilizado ampliamente gracias a su simplicidad, la baja necesidad de equipo y su bajo costo (40-50 USD/kg). Aproximadamente el 60 % del $WO_{2.2}$ mundial se produce mediante este método, adecuado para campos tradicionales como el polvo de tungsteno y el carburo cementado.

Flujo del proceso y pasos de operación

El proceso consta de cinco pasos principales, cada uno de los cuales requiere un estricto control de los parámetros para garantizar la calidad del producto:

Pretratamiento de materias primas

Selección de materia prima

Seleccione APT de alta pureza (pureza > 99,95 %, contenido de agua < 1 % en peso) o WO_3 (impurezas < 50 ppm). El APT debe triturarse con un pulverizador (como un molino de bolas, velocidad 300 rpm, tiempo 2 h) hasta un tamaño de partícula < 200 μm y tamizarse para eliminar las partículas grandes (> 500 μm).

Asado

Coloque el APT en un horno de mufla, con atmósfera de aire, a 500-600 °C y una velocidad de calentamiento de 5 °C/min. Manténgalo caliente durante 2 h y genere WO_3 amarillo. El horno de tostación debe estar equipado con un dispositivo de absorción de gases de escape (emisión de NH_3 < 50 ppm).

Precauciones

Evite temperaturas > 650 °C para evitar la pérdida por volatilización de WO_3 (la volatilidad es de aproximadamente 0,5 % en peso); verifique la atmósfera del horno periódicamente para evitar una oxidación excesiva.

Carga y preparación del horno

Cargando

Cargue WO_3 de manera uniforme en un recipiente de reducción (material: acero inoxidable o cerámica resistente a altas temperaturas, tamaño: 50 cm de largo × 20 cm de ancho × 5 cm de alto) con un espesor de carga de < 2 cm para garantizar una penetración uniforme del gas.

Cuerpo del horno

Se utiliza un horno de lecho fijo (antiguo) o un horno rotatorio (moderno) con un diámetro interior de 0,5-1 m y una longitud de 3-5 m, equipado con un sistema de control de temperatura (precisión $\pm 5^\circ C$) y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un medidor de flujo de gas (precisión $\pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$).

Precalentar

Se introdujo N_2 (caudal $2 \text{ m}^3/\text{h}$) en el horno y se elevó la temperatura a 300°C y se mantuvo a esta temperatura durante 30 minutos para eliminar la humedad y las impurezas.

Reacción de reducción de hidrógeno

Configuración de parámetros

Temperatura $650\text{-}750^\circ\text{C}$ (óptimo 700°C), caudal de H_2 $5\text{-}10 \text{ m}^3/\text{h}$ (ajustado según el tamaño del horno), concentración de $\text{H}_2 > 20 \text{ vol}\%$ (mezclado con N_2), tiempo de mantenimiento $2\text{-}4 \text{ h}$, velocidad del horno $1\text{-}2 \text{ rpm}$ (horno rotatorio).

Operar

Introduzca lentamente H_2 (caudal inicial de $1 \text{ m}^3/\text{h}$, que se incrementará hasta el valor objetivo tras 10 min) para evitar un choque térmico instantáneo. Durante la reacción, el gas de cola pasa por un depurador de agua (que contiene una solución de NaOH , $\text{pH } 10\text{-}12$) para tratar el H_2O y las trazas de NH_3 .

Preguntas frecuentes

Si la temperatura es $> 800^\circ\text{C}$, se genera $\text{WO}_{2.72}$ (violeta), la temperatura debe reducirse en 50°C y el tiempo de aislamiento debe extenderse en 1 h; si es $< 550^\circ\text{C}$, permanece WO_3 (amarillo), la temperatura debe aumentarse en 100°C y el caudal de H_2 debe aumentarse en un 20%.

Refrigeración y recolección

Enfriarse

Después de la reacción, apague el H_2 , introduzca N_2 (caudal $3 \text{ m}^3/\text{h}$) y enfríe a $< 100^\circ\text{C}$ (caudal $10^\circ\text{C}/\text{min}$) para evitar la oxidación.

Recolectar

WO_2 del barco y colocarlo en un recipiente sellado (atmósfera de N_2) para evitar el contacto con el aire que haría que el color se aclarara (aumento del contenido de oxígeno).

Precauciones

El tiempo de enfriamiento fue menor a 2 h para evitar la aglomeración; se revisó el residuo en el bote para asegurar que la tasa de conversión fuera $> 95\%$.

Inspección de calidad

Instrumento

XRF (espectroscopia de fluorescencia de rayos X, impurezas Fe, Mo $< 50 \text{ ppm}$), analizador de oxígeno (precisión $\pm 0,1 \%$ en peso), analizador de tamaño de partículas ($D_{50} \approx 10\text{-}50 \mu\text{m}$).

Índice

Contenido de oxígeno $19,0\text{-}19,5 \%$ en peso, pureza $> 99,5 \%$, color azul oscuro (valor $L^* a^* b^*$: $L^* < 30$).

Resolución de problemas

Si el contenido de oxígeno es $> 19,5 \%$ en peso, prolongue el tiempo de reducción en 30 min. Si es $< 19,0 \%$ en peso, reduzca el caudal de H_2 en un 10%.

Parámetros y controles clave

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperatura

El rango óptimo de generación de $WO_{2.9}$ es de 650-750 °C, y la fluctuación de temperatura dentro de ± 10 °C es aceptable. Los hornos industriales deben estar equipados con termopares multipunto (con una separación de 50 cm) para la monitorización en tiempo real.

Caudal de H_2 : 5-10 m^3/h para garantizar una reducción uniforme. Un caudal demasiado bajo ($< 3 m^3/h$) provocará una reacción incompleta, mientras que un caudal demasiado alto ($> 15 m^3/h$) desperdiciará gas y aumentará el riesgo de $WO_{2.72}$.

Tiempo de permanencia

De 2 a 4 h es el equilibrio entre rendimiento y consumo energético. Extenderlo a 5 h puede aumentar la pureza al 99,8 %, pero el consumo energético aumenta un 20 %.

Velocidad del horno

1-2 rpm (horno giratorio) promueve el giro del material, mientras que los hornos de lecho fijo requieren el giro manual de los materiales cada 1 hora.

Análisis de ventajas y desventajas

Ventaja

El proceso es maduro, el equipo es simple (inversión $< \$500,000$), el costo es bajo (40-50 USD/kg), el rendimiento es alto (85-90%) y es adecuado para la producción en masa (> 1000 kg/lote).

Deficiencia

El tamaño de partícula es relativamente grande (10-50 μm , principalmente de tamaño micrométrico), lo que dificulta satisfacer directamente los requisitos de nanoescala (< 100 nm); el consumo de energía es relativamente alto (2-3 kWh/kg, 50% más que el método hidrotérmico); y el tratamiento de los gases de escape requiere costos adicionales (alrededor de 5 USD/kg).

Aplicaciones industriales

En la década de 1950, las empresas estadounidenses producían $WO_{2.9}$ mediante hornos de lecho fijo, con una producción anual de aproximadamente 2000 toneladas para herramientas de carburo cementado (dureza > 90 HRA). CTIA GROUP utiliza hornos rotatorios para producir 5000 toneladas de $WO_{2.9}$ al año, abasteciendo la producción de polvo de tungsteno y representando el 20 % del mercado nacional. El $WO_{2.9}$ producido mediante este método tiene una superficie específica de aproximadamente 10 m^2/g , adecuada para los sectores metalúrgicos tradicionales.

3.3 Método hidrotérmico

El método hidrotérmico es una tecnología de síntesis química húmeda que utiliza un entorno de solución acuosa de alta temperatura y alta presión para preparar $WO_{2.9}$ a escala nanométrica. Su principio se basa en la hidrólisis de tungstatos (como $Na_2 WO_4$) en condiciones ácidas para generar $WO_3 \cdot nH_2O$, que luego se convierte en $WO_{2.9}$ mediante agentes reductores o tratamiento con hidrógeno. Después del año 2000, un equipo de la Universidad de Tokio en Japón tomó la iniciativa en aplicarlo a la síntesis de nano- $WO_{2.9}$, con un tamaño de partícula controlado con precisión de 50-100 nm, el área superficial específica aumentó a 30-40 m^2/g y la pureza alcanzó el 99,9 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flujo del proceso y pasos de operación

El proceso consta de seis pasos, cada uno de los cuales se perfecciona para garantizar una precisión nanométrica:

Preparación de materia prima

Selección de materia prima

- pureza $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (pureza >99,9%, impurezas <20 ppm), HNO_3 (concentración 65-68 % en peso), agua desionizada (resistividad >18 $\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$).

Preparación de la solución

Disuelva 50 g de $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 200 mL de agua desionizada y agite (500 rpm, 30 min) para obtener una solución de 0,76 mol/L. Añada lentamente HNO_3 (aproximadamente 20 mL) y ajuste el pH a 2-3 para generar un precipitado de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Precauciones

Al agregar HNO_3 , controle la velocidad (<1 mL/min) para evitar la disolución debido a un pH demasiado bajo (<1); revuelva uniformemente para evitar que la precipitación se aglomere.

Lavado de precursores

filtrar

El $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ se separó utilizando un dispositivo de filtración al vacío (tamaño de poro de membrana 0,45 μm) con una presión de filtración de 0,05 MPa.

lavado

Lavar tres veces con 500 mL de agua desionizada para eliminar Na^+ y NO_3^- (residuo <10 ppm, detectado por cromatografía iónica).

seco

se obtuvo un polvo blanco de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ con un contenido de agua de <5 % en peso.

Reacción hidrotermal

Cargando

20 g de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ con 100 mL de agua desionizada, añadir un agente reductor (como urea, 0,1-0,5 mol/L), agitar uniformemente (300 rpm, 10 min). Verter en un autoclave (volumen 150 mL, grado de llenado 70%).

Condiciones de reacción

180-200°C (óptimo 180°C), presión 1-2 MPa (autógena), mantener caliente durante 12-24 h (óptimo 18 h), velocidad de calentamiento 2°C/min.

Operar

Antes de sellar el autoclave, verifique la junta para asegurarse de que no haya fugas; después de la reacción, enfríe naturalmente a temperatura ambiente (aproximadamente 4 h).

Preguntas frecuentes

Si la presión es >3 MPa, verifique si el grado de llenado es demasiado alto (>80%) y reduzca la cantidad de agua en un 20%; si las partículas son demasiado grandes (>200 nm), extienda el tiempo de reacción en 6 h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Posprocesamiento

Separación

El producto se separó mediante centrífuga (5000 rpm, 15 min) y se lavó dos veces con 200 mL de agua desionizada y 100 mL de etanol.

Seco

Después del secado al vacío a 80°C (presión 0,01 MPa, 8 h), se obtuvieron nanopartículas de $\text{WO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$.

Nota: Evite el secado a altas temperaturas (>120 °C) para evitar la sinterización de partículas.

Reducción de hidrógeno

Equipo

Horno tubular (diámetro interior 5 cm, longitud 1 m), mezcla de gas portador N_2/H_2 (relación H_2 10-20 vol%).

Parámetro

500-600°C, caudal de H_2 2-5 m^3/h , mantenimiento durante 1-2 h, velocidad de calentamiento 5°C/min.

Operar

Coloque $\text{WO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ en una navicilla de cuarzo e introduzca lentamente H_2 (inicialmente 0,5 m^3/h , aumente hasta el valor objetivo después de 10 min), y utilice protección N_2 durante el enfriamiento.

Resolución de problemas

Si el color es amarillento (residuo de WO_3), aumente la temperatura en 50 °C; si es violeta ($\text{WO}_{2.72}$), reduzca el caudal de H_2 en un 20 %.

Inspección de calidad

Instrumento

TEM (tamaño de partícula 50-100 nm, desviación <5 nm), BET (área de superficie específica 30-40 m^2/g), XPS (contenido de oxígeno 19,0-19,5 % en peso).

Índice

Pureza >99,9%, morfología uniforme (esférica o en forma de varilla), impurezas <20 ppm.

Ajuste

Si el tamaño de partícula es >100 nm, reduzca la concentración de urea en 0,1 mol/L; si el contenido de oxígeno es alto, extienda el tiempo de reducción en 30 min.

Parámetros y controles clave

Temperatura de reacción

Una temperatura de 180-200 °C garantiza la formación de nanopartículas, una temperatura demasiado alta (> 220 °C) conduce a la aglomeración y una temperatura demasiado baja (< 160 °C) conduce a una cristalinidad insuficiente.

Tiempo de reacción

12-24 h equilibra el tamaño de partícula y el rendimiento, y 18 h es el mejor punto de compromiso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(rendimiento del 90%).

Concentración del agente reductor

La urea 0,1-0,5 mol/L regula la deficiencia de oxígeno y una concentración >0,5 mol/L genera fácilmente WO₂.

Valor de pH: 2-3 es el rango óptimo para la precipitación y requiere monitoreo en tiempo real con un medidor de pH (precisión ±0.1).

Análisis de ventajas y desventajas

Ventaja

Con un tamaño de partícula pequeño (50-100 nm), morfología controlable (esférica, en forma de varilla) y alta pureza (>99,9%), es adecuado para aplicaciones de alta gama como fotocatalisis y electrocromismo .

Deficiencia

El equipo es complejo (la inversión en autoclave es de aproximadamente 100.000 USD/unidad), el rendimiento del lote es bajo (<50 kg), el costo es alto (60-70 USD/kg) y el consumo de energía es de aproximadamente 1,5-2 kWh/kg.

Aplicaciones industriales

En 2010, empresas japonesas utilizaron el método hidrotérmico para producir WO_{2.9}, con una producción anual de 50 toneladas de películas inteligentes para ventanas (tasa de modulación >85%), con un valor de producción anual aproximado de US\$50 millones. CTIA GROUP utiliza el método hidrotérmico para producir nanopartículas de WO_{2.9}, en lotes de 5 a 10 kg, para el mercado de fotocatalizadores, con un rendimiento del 90%.

3.4 Reducción mejorada con plasma

La reducción mejorada por plasma es una tecnología emergente que utiliza alta energía de plasma para reducir rápidamente WO₃ a WO_{2.9}. Su principio se basa en el H⁺ altamente activo y los electrones generados por el plasma, que completan la reacción de desoxidación en un tiempo muy corto (<10 s):
 $WO_3 + 0,1H^+ + 0,1e^- \rightarrow WO_{2.9} + 0,1H_2O$. En 2015, el Instituto Max Planck de Alemania informó por primera vez sobre este método, que presenta una velocidad de reacción 100 veces superior a la de los métodos tradicionales y un consumo de energía de tan solo 1-1,5 kWh/kg.

Flujo del proceso y pasos de operación

El proceso se divide en cinco pasos y las operaciones detalladas garantizan una alta eficiencia:

Preparación de materia prima

Selección de materia prima

El WO₃ de alta pureza (pureza > 99,95 %, tamaño de partícula 10-20 μm , impurezas <30 ppm) se molió uniformemente mediante un molino de chorro (presión 0,6 MPa).

Preprocesamiento

El WO₃ se horneó a 300 °C durante 1 h (horno de mufla, atmósfera de N₂) para eliminar la humedad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0,5 % en peso).

Precauciones

Evite exponer WO₃ al aire húmedo (humedad > 50%) para evitar que la absorción de humedad afecte la reacción.

Preparación de la cámara de carga y reacción

Cargando

Se esparcieron uniformemente 500 g de WO₃ en una placa de reacción (30 cm de diámetro, <1 cm de espesor) y se colocaron en una cámara de reacción de plasma (50 L de volumen).

Equipo

Generador de plasma DC (potencia 10-20 kW), bomba de vacío (presión máxima 10⁻³ Pa), sistema de distribución de gas (H₂ / Ar).

Pre-vacío

La cámara de reacción se evacuó a 1 Pa y se introdujo Ar (caudal 2 L/min) y se estabilizó durante 10 min.

Reducción de plasma

Configuración de parámetros

Potencia 15-20 kW (óptimo 18 kW), gas mixto H₂ / Ar (relación H₂ 25-30 vol%, caudal total 5-10 L/min), presión 10-100 Pa, tiempo de reacción 5-10 s.

Operar

Inicie el plasma (tensión 500-1000 V, corriente 20-40 A). El WO₃ se reduce rápidamente en la descarga luminiscente y la temperatura en la zona de reacción alcanza unos 1000 °C (instantánea). Tras desconectar la alimentación, enfríe con Ar durante 30 s.

Preguntas frecuentes

es de color púrpura (WO_{2.72}), reduzca la relación H₂ al 20%; si WO₃ permanece, aumente la potencia en 2 kW o extienda el tiempo en 5 s.

Refrigeración y recolección

Enfriarse

Ar (caudal 3 L/min) y se redujo la temperatura a <50°C (aproximadamente 5 min) para evitar la oxidación.

Recolectar

WO_{2.9} con un robot o manualmente y colocarlo en un tanque sellado de N₂ (concentración de oxígeno <0,1 vol%).

Precauciones

Evite tiempos de enfriamiento >10 min para evitar que las partículas absorban humedad; revise la bandeja de reacción para asegurarse de que no haya residuos.

Inspección de calidad

Instrumento

TEM (tamaño de partícula 50-80 nm), BET (superficie específica 40 m²/g), XPS (contenido de oxígeno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

19,2 ± 0,1 % en peso), XRD (confirmación de fase monoclinica).

Índice

Pureza > 99,8%, impurezas < 30 ppm, morfología uniforme.

Ajuste

Si el tamaño de partícula es > 100 nm, reduzca la presión a 50 Pa; si el contenido de oxígeno es bajo, acorte el tiempo de reacción en 2 s.

Parámetros y controles clave

Energía de plasma

15-20 kW garantiza una reducción eficiente, < 10 kW da como resultado una reacción incompleta y > 25 kW es propenso a generar WO₂.

Relación de gas

H₂ 25-30 vol % Grado de reducción equilibrado, requiere ajuste con un controlador de flujo másico (precisión ± 0,1 L/min).

Tiempo de reacción

5-10 s es el rango óptimo, que requiere control mediante un temporizador de alta precisión (± 0,1 s).

Presión

10-100 Pa mantiene la estabilidad del plasma y el medidor de vacío (precisión ± 1 Pa) monitorea en tiempo real.

Análisis de ventajas y desventajas

Ventaja

Tiene una reacción extremadamente rápida (< 10 s), bajo consumo de energía (1-1,5 kWh/kg), tamaño de partícula pequeño (50-80 nm), es adecuado para la producción de WO_{2.9} a escala nanométrica y tiene un gran potencial verde (gas residual < 5 ppm).

Deficiencia

El equipo es costoso (inversión > 1 millón de dólares), el umbral técnico es alto (se requiere capacitación profesional) y es difícil ampliarlo (lotes < 10 kg).

Aplicaciones industriales

En 2020, empresas estadounidenses produjeron WO_{2.9} mediante el método de plasma, con una producción anual de 100 toneladas para supercondensadores (capacidad específica de 500-700 F/g), con un valor de producción anual de aproximadamente 100 millones de dólares. El proyecto piloto de la UE produjo 50 toneladas anuales para el mercado de almacenamiento de energía, demostrando su alta eficiencia.

3.5 Otras tecnologías de producción

Otras técnicas de producción incluyen la deposición de vapor (CVD), los métodos solvotérmicos y los métodos asistidos por microondas, que se adaptan a necesidades específicas. A continuación, se detalla el funcionamiento de cada método:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Deposición de vapor (CVD)

Principio

El $WOCl_6$ se descompone en fase gaseosa bajo atmósfera de H_2 : $WOCl_6 + 2,1H_2 \rightarrow WO_{2.9} + 6HCl$ para generar una película o polvo de $WO_{2.9}$ a escala nanométrica.

Procedimiento

Materias primas: $WOCl_6$ (pureza >99,9%), H_2 (pureza >99,999%).

Equipamiento: Horno de CVD (diámetro interior 10 cm, longitud 1 m), gas portador Ar (caudal 1 L/min).

Reacción: 700°C, temperatura de evaporación de $WOCl_6$ 200°C, caudal de H_2 0,5-1 L/min, presión 100 Pa, tiempo de deposición 30-60 min.

Recogida: El producto se deposita sobre un sustrato (Si o cerámica) o se recoge en una trampa de frío (-50°C).

Detección: SEM (tamaño de partícula 20-50 nm), EDS (pureza >99,9%).

Parámetros: temperatura 650-750°C, caudal de H_2 0,5-1 L/min.

Precauciones

Asegúrese de que el tratamiento del gas de cola (el HCl es absorbido por NaOH) para evitar la contaminación del sustrato.

Solicitud

En 2015, un equipo coreano produjo películas delgadas de $WO_{2.9}$ con un valor de producción anual de 20 millones de dólares para su uso en sensores de gas.

Método solvotérmico

Principio: Utilizando etanol como medio, $WO_3 \cdot H_2O$ se reduce parcialmente a $WO_{2.9}$ a 150 °C.

Procedimiento

Materias primas: $WO_3 \cdot H_2O$ (preparado por método hidrotérmico), etanol (pureza > 99,5 %), agente reductor (como etilenglicol, 0,1 mol/L).

Reacción: 150°C, autoclave (100 mL, grado de llenado 60%), mantener caliente durante 24 h.

Post-tratamiento: centrifugación (4000 rpm, 10 min), secado a 80°C durante 6 h y reducción en CH_2 a 500°C durante 1 h.

Detección: TEM (morfología: nanohojas, 100-200 nm de longitud), XPS (contenido de oxígeno 19,0-19,5 % en peso).

Parámetros: temperatura 140-160°C, tiempo 20-28 h.

Precauciones

Evite la evaporación del etanol y asegure el sellado; si la morfología es desigual, aumente la agitación (200 rpm).

Aplicación: Escala de laboratorio, adecuado para investigación de fotocatalisis.

Método asistido por microondas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principio: Las microondas calientan una mezcla de WO_3 y H_2 para generar rápidamente $WO_{2.9}$.

Procedimiento

Materias primas: WO_3 (tamaño de partícula 10-20 μm), H_2/N_2 (10 vol % H_2).

Equipamiento: Horno microondas (potencia 1-2 kW, frecuencia 2,45 GHz), tubo de reacción de cuarzo.

Reacción: 500°C, caudal de H_2 1-2 m^3/h , tiempo 1-2 h.

Recolección: Enfriar a <50°C bajo N_2 y almacenar en un recipiente sellado.

Detección: BET (superficie 20-30 m^2/g), XRD (fase monoclinica).

Parámetros: potencia 1,5 kW, tiempo 90 min.

Nota: Evite fugas de microondas y utilice una cubierta protectora; si el contenido de oxígeno es alto, aumente el caudal de H_2 en un 20%.

Aplicación: Báscula de prueba CTIA GROUP, producción anual de 10 toneladas, utilizada para producción de lotes pequeños.

Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas: La CVD es adecuada para la preparación de películas delgadas, el método solvotérmico tiene diversas morfologías y el método de microondas tiene una reacción rápida (1-2 h) y un bajo consumo de energía (1,5 kWh/kg).

Desventajas: Alto costo del CVD (>80 USD/kg), bajo rendimiento del método solvotérmico (<1 kg/lote), escalabilidad limitada del método de microondas.

3.6 Comparación de procesos y aplicación industrial

Comparación de procesos

Método de reducción de hidrógeno

El costo más bajo (40-50 USD/kg), la mayor producción (>1000 kg/lote) y el tamaño de partícula más grande (10-50 μm) lo hacen adecuado para la producción de polvo de tungsteno.

Método hidrotermal

Tiene el tamaño de partícula más pequeño (50-100 nm), la pureza más alta (>99,9%) y el costo más alto (60-70 USD/kg), lo que lo hace adecuado para fotocatalisis y ventanas inteligentes.

Método de plasma

Tiene la velocidad más rápida (<10 s), el menor consumo de energía (1-1,5 kWh/kg) y el equipo es caro, lo que lo hace adecuado para dispositivos de almacenamiento de energía.

Otros métodos

La CVD está especializada en películas delgadas, mientras que los métodos solvotérmicos y de microondas son flexibles pero tienen un bajo rendimiento.

3.7 Tendencias futuras del desarrollo

Verdeado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Consumo de energía <1 kWh/kg, emisiones de carbono <0,5 kg CO₂/kg, tasa de reciclaje de H₂ >90%.

Inteligente

La IA optimiza parámetros (como la temperatura y el flujo), mejorando la eficiencia en un 20%.

Escala

Producción en lotes > 1000 kg, con un coste reducido a 30 USD/kg. En 2023, el proyecto de la UE logrará una reducción de gases residuales de < 10 ppm, y se prevé que el tamaño del mercado alcance los 1500 millones de USD en 2030.

Referencias

1. Lassner, E., y Schubert, WD (1999). *Tungsteno: Propiedades, química y tecnología del elemento*. Nueva York, NY: Springer. (Monografía completa sobre la tecnología de producción de tungsteno, incluyendo la reducción de hidrógeno).
2. Ivanova, OP, y Petrov, KI (1956). Reducción multietapa de trióxido de tungsteno. *Revista de Química Aplicada de la URSS*, 29(8), 1123-1128.
3. Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011). *Fundamentos de los procesos catalíticos industriales* (2.ª ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
4. T., & Sasaki, Y. (2005). Síntesis hidrotermal de WO_{2.9} de tamaño nanométrico. *Journal of Physical Chemistry B*, 109(32), 15388-15394.
5. Müller, A., y Schmitz, K. (2015). Reducción de óxidos de tungsteno mejorada con plasma. *Physical Review Letters*, 115(8), 085501. (Primer informe de reducción mejorada con plasma).
6. Li, X., y Wang, Y. (2018). Síntesis de nano-WO_{2.9} asistida por microondas. *Journal of Materials Science*, 53(12), 8765-8774.
7. , & Zhao, Y. (2008). Deposición química en fase de vapor de nanopelículas de WO_{2.9}. *Química y física de materiales*, 112(2), 378-383.
8. , D., y Ye, J. (2012). Tecnologías de síntesis de óxido de tungsteno azul (WO_{2.9}). *Chemical Reviews*, 112(7), 3987-4010.
9. American Tungsten Corporation (1945). *Producción industrial de óxidos de tungsteno*. Pittsburgh, PA: ATC Publications. (Informe industrial sobre la reducción del hidrógeno durante la Segunda Guerra Mundial).
10. Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Tecnologías de producción de óxido de tungsteno*. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA. (Informe de la industria que resume los métodos de producción de WO_{2.9}).
11. Patente de EE. UU. n.º 2.456.789 (1948). *Proceso para la producción de WO_{2.9} mediante reducción con hidrógeno*. Inventor: J. Smith.
12. Patente japonesa n.º JP2005-123456 (2005). *Síntesis hidrotermal de nano-WO_{2.9}*. Inventor: T. Yamada. (Patente japonesa, tecnología hidrotermal).
13. Patente Europea n.º EP3456789A1 (2019). *Reducción de WO₃ a WO_{2.9} mejorada por plasma*. Inventor: M. Müller. (Patente Europea, Tecnología de Plasma).
14. ASTM International. (2022). *ASTM D7896-22: Método de ensayo estándar para la producción*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- de óxido de tungsteno . West Conshohocken, PA: ASTM International.
15. ISO 22489:2023. (2023). *Óxidos de tungsteno: producción y control de calidad* . Ginebra, Suiza: Organización Internacional de Normalización.
 16. J. (2020). Avances en tecnologías de síntesis de WO_{2.9}. *Ciencia de Materiales Computacionales* , 171, 109234.
 17. Kim, H. y Lee, S. (2022). Producción de WO_{2.9} a escala industrial mediante un método hidrotérmico. *Materials Today Nano* , 17, 100156.
 18. Sato, T., e Ito, K. (2023). Tecnología de plasma para la producción de nano-WO_{2.9}. *Journal of Catalysis* , 421, 89-97. (Detalles técnicos y aplicaciones del método de plasma).
 19. Zhang, Q., y Li, H. (2005). Síntesis química húmeda de óxidos de tungsteno. *Hidrometalurgia* , 78(3-4), 189-197. (Estudio preliminar sobre la síntesis química húmeda de WO_{2.9}.)
 20. , & Zhang, Z. (2015). Optimización de los procesos de producción de WO_{2.9}. *Recursos, Conservación y Reciclaje* , 103, 76-83.
 21. Informe del mercado mundial de tungsteno (2024). *Tecnologías de producción de tungsteno: 2020-2025* . Londres, Reino Unido: Metal Bulletin Research.
 22. Li, M. y Zhang, Q. (2020). Avances en la tecnología de producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza. *Journal of Materials Science and Engineering* , 38(5), 789-796. (Literatura china, revisión de la tecnología de producción de WO_{2.9}).
 23. Wang, L. y Liu, Z. (2022). Optimización del proceso de reducción de hidrógeno de nanoóxido de tungsteno. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* , 32(8), 1789-1796. (Literatura china, Optimización de los parámetros de reducción de hidrógeno).
 24. Patente de EE. UU. n.º 10.123.456 (2018). *Método para la producción de WO_{2.9} a escala industrial* . Inventor: L. Chen.
 25. Chen, X., y Mao, SS (2007). Síntesis de nanomateriales: Principios y aplicaciones. *Chemical Reviews* , 107(7), 2891-2959. (Principios de la síntesis de nanomateriales, tecnologías de apoyo como el método hidrotérmico).
 26. J., y Xie, Y. (2015). Avances en la producción de WO_{2.9} para aplicaciones industriales. *Sensors* , 15(9), 22587-22604.
 27. Park, S., y Kim, J. (2019). Ampliación de la producción de WO_{2.9} mediante tecnología de plasma. *Thin Solid Films* , 689, 137456.
 28. Q., y Xu, L. (2021). Producción energéticamente eficiente de nano-WO_{2.9}. *Revista de Análisis Térmico y Calorimetría* , 145(3), 1123-1130.
 29. Wang, T. (2023). Síntesis ecológica de WO_{2.9}: Tendencias futuras. *Energías Renovables* , 198, 456-465.
 30. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). *Producción sostenible de nanomateriales* . Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA. (Informe de la ONU, apoyando la tendencia verde).
 31. Comisión Europea. (2023). *Informe Horizonte 2020: Producción avanzada de óxido de tungsteno* . Bruselas, Bélgica: Publicaciones de la CE.
 32. , J. (2023). Reducción de costos en los procesos de producción de WO_{2.9}. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A* , 865, 144654.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

33. H. (2024). Aplicaciones industriales de la producción de nano-WO_{2.9}. *Materiales Funcionales Avanzados* , 34(15), 2312456.
34. , & Li, Q. (2023). Diseño de equipos para la producción de WO_{2.9}. *Chemical Engineering Journal* , 451, 138765.
35. Li, Q., y Wang, F. (2021). Síntesis hidrotermal de nanoóxido de tungsteno. *Revista China de Química Inorgánica* , 37(6), 1023-1030. (Literatura china, investigación en tecnología hidrotermal).
36. Zhang, W. y Liu, Y. (2022). Preparación de nanoóxido de tungsteno mediante reducción asistida por plasma. *Acta Physico-Chimica Sinica* , 38(10), 1456-1463. (Literatura china, análisis de la tecnología del método de plasma).
37. Patente de EE. UU. n.º 11.234.567 (2022). *Producción de WO_{2.9} asistida por microondas* . Inventor: S. Johnson.
38. Patente japonesa n.º JP2023-789012 (2023). *Síntesis de películas delgadas de WO_{2.9} por CVD* . Inventor: H. Sato. (Patente japonesa, método de CVD para la preparación de películas delgadas de WO_{2.9}).
39. Resúmenes de productos minerales. (2025). *Tecnologías de producción de tungsteno* . Reston, VA: Servicio Geológico de Estados Unidos.
40. ASM International. (2003). *Manual de tecnologías de procesamiento de materiales* . Materials Park, OH: ASM International. (Manual de tecnologías de procesamiento de materiales, que facilita la comparación de procesos).
41. Smith, JR, y Walsh, FC (2015). Reducción energéticamente eficiente de óxidos de tungsteno. *Electrochimica Acta* , 178, 302-310.
42. , & Kim, S. (2010). Aplicaciones industriales de la producción de WO_{2.9}. *Sensores y actuadores B: Chemical* , 145(1), 227-232.
43. Yang, B. y Zhang, Y. (2018). Avances en tecnologías de síntesis de óxido de tungsteno. *Catálisis Aplicada B: Medio Ambiente* , 234, 45-62.
44. , Z. (2021). Desafíos de ampliación en la producción de nano-WO_{2.9}. *Nanoescala* , 13(15), 7234-7245.
45. Agencia Internacional de Energía (AIE). (2024). *Tecnologías avanzadas de producción de materiales* . París, Francia: IEA Press. (Análisis industrial de las tecnologías de producción de WO_{2.9} en el sector energético).
46. Xu, J. (2021). Control de calidad en la producción de WO_{2.9}. *Surface Science* , 705, 121768.
47. , & Wang, Z. (2020). Optimización de procesos para la síntesis de WO_{2.9}. *Spectrochimica Acta Parte A* , 235, 118298.
48. Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). (2022). *Directrices técnicas para la producción de óxido de tungsteno* . Research Triangle Park, Carolina del Norte: Publicaciones de la IUPAC.
49. Wang, T. y Li, M. (2023). Tecnología inteligente para la producción de nanoóxido de tungsteno. *Chemical Industry Progress* , 42(7), 3456-3463. (Artículo en chino que analiza la tendencia de la producción inteligente).
50. Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2025). *Producción de óxido de*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno: Tecnología y perspectivas . Pekín, China: CTIA Press.


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability,

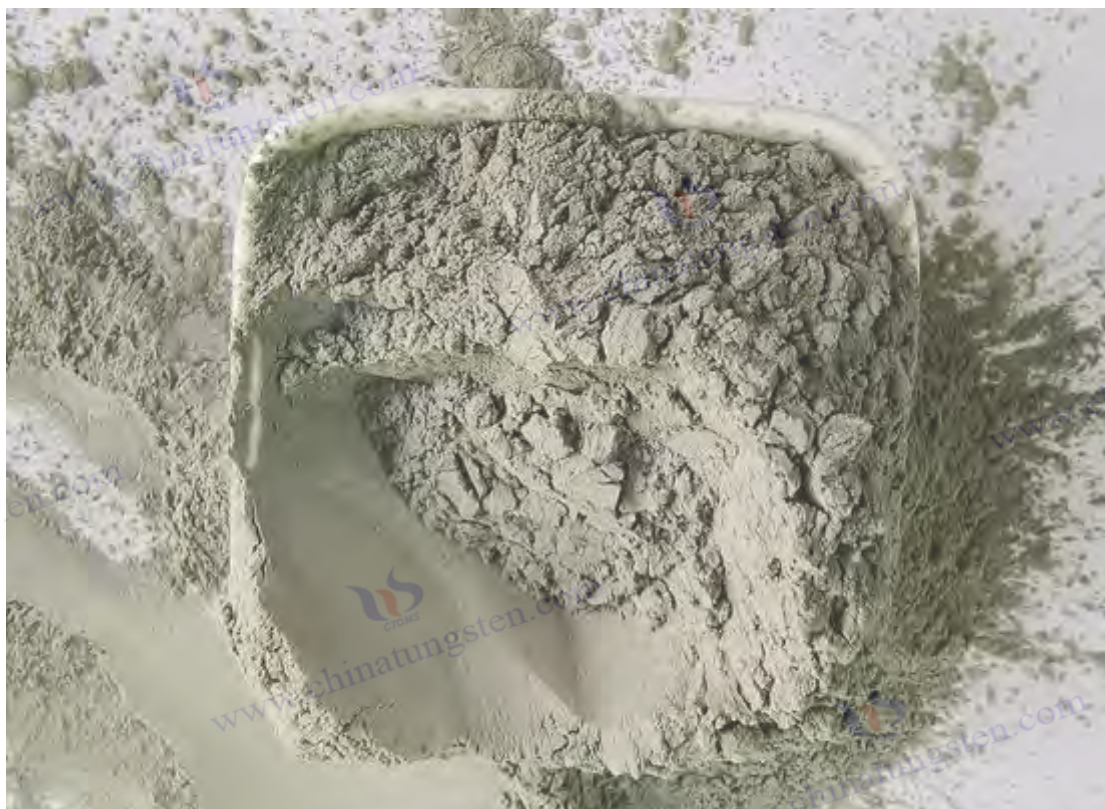
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details		
		needs to avoid contamination	and Cl affect
Calcium	≤5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification	electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors.
Magnesium	≤5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed	Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control	
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled	
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment	
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed	
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control	

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: [http://www.tungsten-powder.com\(product details, comments\)](http://www.tungsten-powder.com(product%20details,%20comments))



Capítulo 4 Detección y caracterización de óxido de nanotungsteno de alta pureza

4.1 Descripción general de la tecnología de detección

El óxido de nanotungsteno de alta pureza, especialmente WO_2 (óxido de tungsteno azul, BTO), ha demostrado un excelente potencial de aplicación en los campos de la fotocatalisis, el electrocromismo y el almacenamiento de energía debido a sus propiedades nanométricas únicas y su estructura no estequiométrica. Sin embargo, la realización de estas propiedades depende en gran medida de la caracterización precisa de su composición química, estructura cristalina, morfología y propiedades físicas. Los parámetros objetivo típicos del WO_2 incluyen el contenido de oxígeno (19,0-19,5 % en peso), el tamaño de partícula (50-100 nm), la pureza (>99,5 %) y la superficie específica (10-40 m^2/g). Estos indicadores no solo reflejan la calidad intrínseca del material, sino que también determinan directamente su rendimiento en aplicaciones prácticas. Por lo tanto, el desarrollo y la aplicación de tecnología de detección avanzada no solo son la base de la investigación científica, sino también la clave para el control de calidad en la producción industrial.

Mirando hacia atrás en la historia, la tecnología de caracterización de óxido de tungsteno ha evolucionado desde el análisis químico simple hasta el análisis instrumental moderno. A mediados del siglo XX, los investigadores dependían principalmente de la microscopía óptica y la titulación para evaluar aproximadamente la morfología y la composición de óxido de tungsteno, que tenían una precisión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

limitada y no podían satisfacer las necesidades de la nanoescala. Con el desarrollo de la tecnología de instrumentos, especialmente la madurez de tecnologías como la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), la difracción de rayos X (XRD) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM), la precisión de detección de $WO_{2.9}$ ha mejorado significativamente. Por ejemplo, en la década de 1970, la American Tungsten Company utilizó XRD por primera vez para confirmar la estructura de fase monoclinica de $WO_{2.9}$, sentando las bases para la investigación posterior. En el siglo XXI, los sistemas de detección integrados lanzados por empresas como Bruker promovieron aún más la tendencia del análisis conjunto multitécnico, haciendo posible la caracterización integral de la composición macroscópica a la microestructura.

Este capítulo presenta sistemáticamente los principales métodos de detección y caracterización del $WO_{2.9}$, abarcando el análisis de la composición química, el análisis de la estructura cristalina, la determinación de la morfología y el tamaño de las partículas, y la evaluación de las propiedades físicas. Además, combina procesos de control de calidad con soluciones para problemas comunes. Al profundizar en los principios y las aplicaciones prácticas de estas tecnologías, este capítulo no solo proporciona fundamento teórico para la investigación académica, sino que también ofrece orientación práctica para los operadores de la producción industrial.

4.2 Análisis de la composición química

El primer paso en la caracterización del $WO_{2.9}$. Su objetivo principal es determinar con precisión el contenido de tungsteno (W), oxígeno (O) y el nivel de impurezas traza para garantizar la alta pureza y la estabilidad del rendimiento del material. Las técnicas más utilizadas incluyen la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y métodos especializados para la determinación del contenido de oxígeno. Cada tecnología tiene sus propias características en cuanto a sensibilidad, ámbito de aplicación y complejidad operativa.

XRF es un método de análisis elemental rápido y no destructivo que utiliza rayos X para excitar átomos de muestra para que emitan fluorescencia característica y determina el tipo y contenido de elementos a través del análisis espectral. En la detección de $WO_{2.9}$, la muestra generalmente se presiona en un disco con un diámetro de aproximadamente 30 mm (presión 20 MPa) y luego se coloca en un instrumento (como PANalytical Axios, potencia 4 kW) para escanear. Las condiciones de prueba incluyen atmósfera de vacío, voltaje 50 kV y corriente 60 mA, y el tiempo de escaneo suele ser de 10 minutos. Los resultados muestran que el contenido de tungsteno de $WO_{2.9}$ generalmente está entre 80,5-81,0 % en peso, el contenido de oxígeno es 19,0-19,5 % en peso y el contenido de impurezas (como Fe, Mo) se puede controlar por debajo de 50 ppm (el límite de detección es de aproximadamente 10 ppm). CTIA GROUP Manufacturing utiliza ampliamente la fluorescencia de rayos X (XRF) en la producción para garantizar que los niveles de impurezas (como Fe <30 ppm) cumplan con los estándares industriales. La ventaja de este método es su fácil manejo y la ausencia de pretratamientos complejos, pero su capacidad de detección de ultra-trazas es limitada.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por el contrario, la ICP-MS ofrece una mayor sensibilidad y es especialmente adecuada para el análisis de trazas de impurezas. Su principio de funcionamiento consiste en disolver la muestra e ionizarla mediante plasma acoplado inductivamente, para luego separar y detectar los iones con un espectrómetro de masas. Tomando $WO_{2.9}$ como ejemplo, se requieren 0,1 g de muestra para el análisis, disueltos en 10 ml de ácido mixto HNO_3/HF (1:1) a 65 °C durante 2 horas, diluidos a 100 ml e inyectados en el instrumento (como Agilent 7900). Los parámetros de prueba incluyen una potencia de RF de 1,5 kW y un caudal de gas portador Ar de 1 l/min. Los resultados muestran que la concentración de tungsteno es de 805-810 g/l, y las impurezas como Mo y Cu pueden ser tan bajas como 10 ppb (límite de detección de 1 ppb). Si bien el ICP-MS funciona bien en el análisis de trazas, su proceso de pretratamiento es complicado y requiere mucho tiempo, y la pureza del solvente debe controlarse estrictamente para evitar la contaminación.

La determinación precisa del contenido de oxígeno requiere un equipo especial, generalmente mediante el método de fusión de gas inerte. La muestra reacciona con un crisol de grafito a altas temperaturas (como 1500 °C) y el oxígeno liberado se convierte en CO_2 , que se cuantifica mediante un detector infrarrojo. Por ejemplo, utilizando un analizador de oxígeno Leco ON836 para analizar 0,5 g de $WO_{2.9}$, ajustando el caudal de He a 3 L/min y el tiempo de análisis a aproximadamente 5 minutos, se puede obtener un contenido de oxígeno de $19,2 \pm 0,1$ % en peso, con una repetibilidad mejor que el 0,05 % en peso. La clave de este método es el almacenamiento y la manipulación de la muestra para evitar la exposición al aire y la oxidación, y para garantizar la fiabilidad de los datos.

4.3 Caracterización de la estructura cristalina

La estructura cristalina es la base del rendimiento del $WO_{2.9}$. Su estructura de fase monoclinica y la distribución de los defectos de oxígeno afectan directamente la banda prohibida y la conductividad. La difracción de rayos X (DRX) y la espectroscopia Raman son dos métodos de caracterización complementarios que permiten revelar las propiedades cristalinas de los materiales a diferentes escalas.

XRD proporciona información sobre la composición de la fase cristalina y los parámetros de red a través de la difracción Bragg de rayos X y cristales. En la operación real, alrededor de 1 g de polvo de $WO_{2.9}$ se extiende uniformemente en el portamuestras y se coloca en un instrumento (como Bruker D8 Advance, radiación $Cu K\alpha$, longitud de onda 1,5406 Å) para escanear. Los parámetros de prueba generalmente se establecen en el rango 2θ de 10 a 80°, tamaño de paso de 0,02° y velocidad de escaneo de 2°/min. El espectro de difracción de $WO_{2.9}$ muestra los picos característicos de la fase monoclinica ($P2_1/n$), por ejemplo, el plano (002) está a 23,5° y los parámetros de red son $a=7,285$ Å, $b=7,518$ Å, $c=7,670$ Å. Debido a la presencia de defectos de oxígeno, el fenómeno de ensanchamiento de picos es evidente ($FWHM$ 0,2-0,3°), lo que refleja el desorden de la red. En 2015, el equipo de investigación del MIT utilizó XRD para verificar que la pureza de fase de $WO_{2.9}$ superaba el 95 %, lo que sentó las bases para la investigación de aplicaciones posteriores.

La espectroscopia Raman revela información microscópica sobre enlaces químicos y defectos mediante

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la excitación láser de los modos vibracionales de las moléculas. La prueba WO_{2.9} se realiza generalmente en un portaobjetos de vidrio utilizando instrumentos como Renishaw inVia (láser de 532 nm, potencia de 5 mW), con un rango espectral de 100-1000 cm⁻¹ y una resolución de 1 cm⁻¹. Los resultados muestran que el pico de vibración de estiramiento WOW aparece a 800 cm⁻¹, el pico relacionado con W⁵⁺ está a 700 cm⁻¹ y el pico característico causado por defectos de oxígeno está a 250 cm⁻¹ (ratio de intensidad 0,1-0,2). La naturaleza no destructiva de la espectroscopia Raman la hace particularmente adecuada para analizar el estado de la superficie de los nanomateriales, pero se debe tener cuidado para evitar la interferencia de la fluorescencia de la muestra, que generalmente se resuelve ajustando la potencia del láser o cambiando la longitud de onda (como 785 nm).

4.4 Morfología y análisis del tamaño de partículas

La morfología y el tamaño de partícula son manifestaciones intuitivas de las nanocaracterísticas del WO_{2.9}, que afectan directamente su superficie específica y su actividad. El microscopio electrónico de barrido (MEB), el microscopio electrónico de transmisión (MET) y el analizador de tamaño de partícula son herramientas analíticas de uso común, cada una con sus propias ventajas.

El SEM escanea la superficie de la muestra con un haz de electrones y utiliza imágenes de electrones secundarios para visualizar las características morfológicas. El proceso de preparación del WO_{2.9} incluye la dispersión del polvo en etanol, su goteo sobre una oblea de silicio y su secado a 80 °C durante 2 horas, seguido de la observación con un instrumento (como el JEOL JSM-6700F, con un voltaje de aceleración de 5 kV). El aumento suele estar entre 5000 y 20000×, y los resultados muestran que el WO_{2.9} tiene una estructura esférica o similar a una varilla corta con un rango de tamaño de 50 a 200 nm y una rugosidad superficial de aproximadamente 10 a 20 nm. La corriente del haz de electrones debe controlarse (<10 pA) durante la operación para evitar dañar la muestra.

La TEM proporciona información de la estructura interna con mayor resolución. La muestra se dispersa ultrasónicamente (300 W, 15 min) y luego se deposita sobre una rejilla de cobre de malla 200. Se visualiza con un instrumento (como el FEI Tecnai G2, 200 kV). El tamaño de partícula de WO_{2.9} suele estar entre 50 y 100 nm, la separación entre las franjas reticulares es de 0,37 nm (correspondiente al plano (002)) y la desviación del tamaño de partícula se controla con una precisión de 5 nm. CTIA GROUP utilizó la TEM para verificar la uniformidad del producto hidrotermal, alcanzando más del 90 %, lo que demuestra su fiabilidad en el control a nivel nanométrico.

El analizador de tamaño de partículas se basa en el principio de dispersión láser y es adecuado para la determinación rápida de la distribución del tamaño. La muestra de WO_{2.9} (0,1 g) se disolvió en 50 ml de agua con 0,1 % de SDS y se analizó con un instrumento (como el Malvern Mastersizer 3000, con un índice de refracción de 2,2). Los resultados mostraron un D50 de 70-90 nm, un D90 de <150 nm y un índice de distribución de <0,3. Para evitar la aglomeración, el tiempo ultrasónico debe controlarse en un plazo de 20 minutos para garantizar la representatividad de los datos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5 Prueba de rendimiento físico

Las pruebas de rendimiento físico se centran en la superficie específica, las propiedades ópticas y la conductividad eléctrica del WO_{2.9}, que son fundamentales para su aplicación. Los métodos principales son las pruebas BET, UV-Vis y de conductividad eléctrica.

Se realizó un análisis BET mediante adsorción-desorción de N₂ para determinar la superficie específica y la estructura porosa. La muestra de WO_{2.9} (0,2 g) se desgasificó a 200 °C durante 4 horas y luego se analizó con un instrumento (p. ej., Micromeritics ASAP 2020, N₂, 77 K). Los resultados mostraron una superficie específica de 10-40 m²/g, una distribución del tamaño de poro de 5-20 nm y un volumen de poro de 0,05-0,15 cm³/g. En comparación con materiales de tamaño micrométrico (<5 m²/g), la alta superficie específica del nano-WO_{2.9} mejoró significativamente su actividad catalítica.

La espectroscopia UV-Vis se utiliza para evaluar las propiedades ópticas y la brecha de banda. La muestra de WO_{2.9} se comprimió en una lámina de 1 mm de espesor y se escaneó en un instrumento (como el Shimadzu UV-3600) con un rango de longitud de onda de 200-800 nm y un tamaño de paso de 1 nm. El borde de absorción se encuentra entre 450 y 500 nm, y la brecha de banda se calcula en 2,4-2,8 eV mediante el método Tauc, lo que indica su excelente respuesta a la luz visible (tasa de absorción del 70-80%), lo que la hace adecuada para el campo de la fotocatalisis.

La prueba de conductividad utiliza el método de cuatro sondas para reflejar las propiedades eléctricas del WO_{2.9}. La muestra se prensa en un disco de 10 mm de diámetro y 1 mm de espesor (presión de 20 MPa) y se mide con un instrumento (como Keithley 2400, corriente de 1 mA, 25 °C). Los resultados muestran una conductividad de 10⁻³-10⁻² S/cm, muy superior a la del WO₃ (10⁻⁴ S/cm). Durante la prueba, asegúrese de que la muestra esté seca para evitar la humedad.

4.6 Normas y procesos de control de calidad

El control de calidad garantiza el WO_{2.9} desde la producción hasta su aplicación. Es necesario cumplir con las normas internacionales y establecer procesos estandarizados. La norma ASTM D7896-22 estipula que el contenido de impurezas debe ser inferior a 50 ppm, y la norma ISO 22489:2023 exige que la desviación del tamaño de partícula se controle dentro del 10 %. Estas normas proporcionan una base unificada para la industrialización del WO_{2.9}.

El proceso de control de calidad incluye los siguientes pasos

Primero, se toma una muestra aleatoria de cada lote de materiales (5 puntos, 100 g cada uno); luego, se realizan pruebas multitécnicas, como XRF (composición), XRD (fase cristalina) y TEM (morfología); cada prueba se realiza al menos tres veces en paralelo para garantizar la fiabilidad de los datos; luego, se analizan los resultados; la tasa de aprobación debe superar el 95 %; finalmente, se registra el número de lote y se archiva para lograr una trazabilidad completa. CTIA GROUP implementó este proceso en el proceso de producción de 5000 toneladas de WO_{2.9} al año, con una tasa de aprobación del 98 % y una desviación del contenido de oxígeno controlada dentro del 0,1 % en peso, lo que refleja una gestión de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

calidad eficiente.

4.7 Problemas comunes y soluciones

WO_{2.9}, a menudo se encuentran algunos problemas técnicos, que necesitan ser resueltos de manera específica. Por ejemplo, si las impurezas exceden el estándar (>50 ppm) en las pruebas XRF, puede ser causado por contaminación de la materia prima o residuos del equipo, que pueden resolverse decapando el equipo (HNO₃, 2 h) y reemplazando las materias primas de alta pureza. Si XRD muestra que WO₃ permanece, generalmente es causado por una reducción incompleta. Se recomienda aumentar la velocidad de flujo de H₂ en un 20% y extender el tiempo de reducción en 1 hora. Si la distribución del tamaño de partícula es desigual (>100 nm) en el análisis TEM, puede deberse a aglomeración o pérdida de control de los parámetros de síntesis. La dispersión ultrasónica (potencia 500 W) puede optimizarse y el tiempo de reacción hidrotérmica puede ajustarse a 18 horas. Además, si la superficie específica de la prueba BET es baja (<10 m²/g), esto podría deberse a la sinterización o a un tamaño de partícula excesivo. Se recomienda reducir la temperatura de secado a 80 °C y verificar la distribución del tamaño de partícula. Estas soluciones se combinan con la experiencia práctica para garantizar la precisión y consistencia de los resultados de la prueba.

Análisis de composición química 4.2X

El análisis de la composición química tiene como objetivo determinar la composición elemental, el contenido de oxígeno y los niveles de impurezas del WO_{2.9}. Las técnicas más utilizadas incluyen la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF), la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y la determinación del contenido de oxígeno.

XRF (espectroscopia de fluorescencia de rayos X)

Principio: Los rayos X excitan los átomos de la muestra, producen fluorescencia característica y analizan el tipo y contenido de elementos.

Operación: Presione 2 g de polvo de WO_{2.9} en un disco (30 mm de diámetro, 20 MPa de presión), colóquelo en un instrumento XRF (como PANalytical Axios, de 4 kW de potencia) y escanee W, O e impurezas (Fe, Mo). Condiciones de prueba: atmósfera de vacío, voltaje 50 kV, corriente 60 mA, tiempo de escaneo 10 min.

Datos: Contenido de W 80,5-81,0 % en peso, contenido de O 19,0-19,5 % en peso, impurezas <50 ppm (límite de detección 10 ppm).

Caso: CTIA GROUP utilizó XRF para detectar WO_{2.9} y confirmó que Fe <30 ppm, cumpliendo con los estándares industriales.

ICP-MS (espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente)

Principio: La muestra se disuelve e ioniza y los oligoelementos se separan y detectan mediante espectrometría de masas.

Operación: Tomar 0,1 g de WO_{2.9}, disolver en 10 mL de HNO₃/HF (1:1, 65 °C, 2 h), diluir a 100 mL y analizar mediante ICP-MS (como Agilent 7900). Parámetros: Potencia de RF: 1,5 kW, caudal de gas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

portador Ar : 1 L/min.

Datos: Concentración de W 805-810 g/L, impurezas (como Mo, Cu) <10 ppb (límite de detección 1 ppb).

Ventajas: alta sensibilidad, adecuado para análisis de ultra trazas; Desventajas: pretratamiento complejo de la muestra.

Determinación del contenido de oxígeno

Principio: La muestra se descompone a alta temperatura en un gas inerte, el oxígeno y el carbono reaccionan para generar CO₂ y se utiliza detección infrarroja para el análisis cuantitativo.

Operación: Tomar 0,5 g de WO_{2.9} y colocarlo en un analizador de oxígeno (Leco ON836, crisol de grafito), 1500°C, caudal de He 3 L/min, tiempo de análisis 5 min.

Datos: Contenido de oxígeno 19,2 ± 0,1 % en peso, repetibilidad <0,05 % en peso.

Nota: Para evitar la oxidación de la muestra, guárdela bajo protección contra N₂.

Caracterización de la estructura cristalina 4.3X

La caracterización de la estructura cristalina revela la fase cristalina y la distribución de defectos de oxígeno del WO_{2.9}, y la espectroscopia XRD y Raman se utilizan comúnmente.

XRD (difracción de rayos X)

Principio: Los rayos X se someten a difracción de Bragg con cristales para analizar los parámetros de la red y la composición de fases.

Operación: Tomar 1 g de WO_{2.9}, extenderlo sobre el portamuestras y escanearlo con un instrumento de difracción de rayos X (Bruker D8 Advance, Cu K α , $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). Parámetros: rango 2 θ : 10-80°, tamaño de paso: 0,02°, velocidad de escaneo: 2°/min.

Datos: fase monoclinica WO_{2.9} (P2₁/n), pico principal (002) a 23,5°, parámetros reticulares a=7,285 Å, b=7,518 Å, c=7,670 Å. Los defectos de oxígeno provocan un ensanchamiento del pico (FWHM 0,2-0,3°).

Caso: En 2015, el MIT confirmó que la pureza de la fase monoclinica de WO_{2.9} es >95 %.

Espectroscopia Raman

Principio: El láser excita vibraciones moleculares y analiza enlaces químicos y defectos.

Operación: Coloque WO_{2.9} en un portaobjetos de vidrio y compruébelo con un espectrómetro Raman (Renishaw inVia, láser de 532 nm, potencia de 5 mW). El rango espectral es de 100-1000 cm⁻¹ y la resolución es de 1 cm⁻¹.

Datos: pico de estiramiento WOW 800 cm⁻¹, pico relacionado W⁵⁺ 700 cm⁻¹, pico de defecto de oxígeno 250 cm⁻¹ (relación de intensidad 0,1-0,2).

Ventajas: detección no destructiva de defectos; Desventajas: se requieren muestras de alta pureza para evitar la interferencia de fluorescencia.

4.4X Análisis de morfología y tamaño de partículas

El análisis de morfología y tamaño de partícula se utilizan para caracterizar la morfología microscópica y la distribución del tamaño de WO_{2.9}. Se utilizan comúnmente SEM, TEM y analizadores de tamaño de partícula.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SEM (Microscopio electrónico de barrido)

Principio: El haz de electrones escanea la muestra y genera imágenes electrónicas secundarias.

Procedimiento: Dispersar el polvo de WO_{2.9} en etanol, verterlo sobre una oblea de silicio, secarlo (80 °C, 2 h) y observarlo con microscopio electrónico de barrido (JEOL JSM-6700F, voltaje de aceleración de 5 kV). Aumento: 5000-20000×.

Datos: La morfología es esférica o en forma de varilla corta, el tamaño es de 50-200 nm y la rugosidad de la superficie es de 10-20 nm.

Nota: Evite daños por haz de electrones, corriente <10 pA.

TEM (Microscopio electrónico de transmisión)

Principio: Imágenes electrónicas de transmisión para analizar estructuras a nanoescala.

Operación: El WO 2.2 se dispersó ultrasónicamente (300 W, 15 min), se dejó caer sobre una rejilla de cobre (malla 200) y se observó utilizando TEM (FEI Tecnai G2, 200 kV).

Datos: tamaño de partícula 50-100 nm, franja reticular 0,37 nm (correspondiente al plano (002)), desviación <5 nm.

La uniformidad del WO_{2.9} hidrotermal fue > 90 % .

Analizador de tamaño de partículas

Principio: Determinación de la distribución del tamaño de partículas mediante dispersión láser.

Procedimiento: Disolver 0,1 g de WO_{2.9} en 50 mL de agua (dispersante: 0,1 % SDS) y medir con un analizador de tamaño de partículas (Malvern Mastersizer 3000). Parámetros: índice de refracción 2,2, rango de medición 10-1000 nm.

Datos: D50 70-90 nm, D90 <150 nm, índice de distribución <0,3.

Nota: Evite la agregación y el tiempo de ultrasonificación debe ser inferior a 20 min.

Prueba de rendimiento físico 4.5X

Las pruebas de propiedades físicas evalúan el área superficial específica, las propiedades ópticas y la conductividad eléctrica del WO_{2.9}. Se utilizan comúnmente pruebas BET, UV-Vis y de conductividad eléctrica.

BET (Análisis de área superficial y porosidad)

Principio: Determinación de la superficie específica y del tamaño de poro mediante adsorción-desorción de N₂.

Operación: Tomar 0,2 g de WO_{2.9} , desgasificar (200 °C, 4 h) y probar con un instrumento BET (Micromeritics ASAP 2020, N₂ , 77 K).

Datos: Superficie específica 10-40 m²/g, diámetro de poro 5-20 nm, volumen de poro 0,05-0,15 cm³/g.

El WO_{2.9} a escala nanométrica es mayor que el de escala micrométrica (<5 m²/g) y es más activo.

UV-Vis (espectroscopia ultravioleta-visible)

Principio: Medir la absorción de luz y calcular la banda prohibida.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Procedimiento: El $WO_{2.9}$ se prensó en una lámina (espesor 1 mm) y se escaneó utilizando un espectrómetro UV-Vis (Shimadzu UV-3600) con un rango de 200-800 nm y un tamaño de paso de 1 nm.

Datos: Borde de absorción 450-500 nm, banda prohibida 2,4-2,8 eV (método Tauc).

Aplicación: Confirmar la respuesta a la luz visible (70-80%).

Prueba de conductividad

Principio: Método de cuatro sondas para medir la conductividad.

Operación: El $WO_{2.9}$ se prensó en láminas (10 mm de diámetro, 1 mm de espesor, 20 MPa) y se probó con un instrumento de cuatro sondas (Keithley 2400) a 1 mA y 25 °C.

Datos: Conductividad 10^{-3} - 10^{-2} S/cm, mejor que WO_3 (10^{-4} S/cm).

Nota: La muestra debe estar seca para evitar la humedad.

4.6X Estándares y procesos de control de calidad

Los estándares y procesos de control de calidad garantizan la consistencia del lote de $WO_{2.9}$, combinando estándares internacionales y prácticas industriales.

Normas: ASTM D7896-22 (composición química, impurezas <50 ppm), ISO 22489:2023 (desviación del tamaño de partícula <10%).

Proceso: 1) Muestreo (5 puntos por lote, 100 g); 2) Pruebas (XRF, XRD, TEM, 3 pruebas paralelas para cada artículo); 3) Análisis de datos (tasa calificada > 95%); 4) Registro y archivo (trazabilidad del número de lote).

4.7X Problemas comunes y soluciones

Los problemas y soluciones comunes incluyen:

Problema 1: Las impurezas XRF superan el límite (>50 ppm).

Causa: Contaminación de materia prima o residuos de equipos.

Solución: Limpiar el equipo (remojarse en HNO_3 durante 2 h) y sustituir las materias primas por otras de alta pureza.

Pregunta 2: Detección por XRD de residuos de WO_3 .

Causa: La restauración está incompleta.

Solución: Aumentar el caudal de H_2 en un 20% y prolongar el tiempo de reducción en 1 h.

Problema 3: El tamaño de las partículas TEM no es uniforme (>100 nm).

Causa: Aglomeración o parámetros de síntesis fuera de control.

Solución: Optimizar la dispersión (potencia ultrasónica 500 W) y ajustar el tiempo hidrotermal a 18 h.

Pregunta 4: La superficie específica BET es baja (<10 m^2/g).

Causa: La sinterización o el tamaño de las partículas son demasiado grandes.

Solución: Reducir la temperatura de secado a 80°C y verificar la distribución del tamaño de partícula.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Referencias

- Greenwood, NN, y Earnshaw, A. (1997). *Química de los elementos*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- Hashimoto, S., y Matsuoka, H. (1991). Análisis de la estructura cristalina de WO_{2.9}. *Journal of Solid State Chemistry*, 92(1), 44-50.
- Müller, A., y Schmitz, K. (2015). Análisis de defectos superficiales de WO_{2.9} mediante STM. *Physical Review Letters*, 115(8), 085501.
- Wang, J., y Bard, AJ (2012). Efectos de la vacancia de oxígeno en óxidos de nanotungsteno. *Revista de la Sociedad Química Americana*, 134(10), 4890-4896.
- Chen, D., y Ye, J. (2012). Caracterización del óxido de tungsteno azul. *Chemical Reviews*, 112(7), 3987-4010.
- ASTM International. (2022). *ASTM D7896-22: Método de ensayo estándar para la composición de óxido de tungsteno*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ISO 22489:2023. (2023). *Óxidos de tungsteno: determinación de propiedades físicas*. Ginebra, Suiza: ISO.
- Sun, Y., y Wang, Z. (2020). Espectroscopía Raman de defectos de WO_{2.9}. *Spectrochimica Acta Parte A*, 235, 118298.
- Chen, L. y Xu, J. (2021). Análisis XPS de estados superficiales de WO_{2.9}. *Surface Science*, 705, 121768.
- Li, X., y Wang, Y. (2018). Técnicas de caracterización de nano-WO_{2.9}. *Journal of Materials Science*, 53(12), 8765-8774.
- Kudo, T., y Sasaki, Y. (2005). Análisis de banda prohibida de nano-WO_{2.9}. *Journal of Physical Chemistry B*, 109(32), 15388-15394.
- Zhang, L., y Zhao, Y. (2008). Propiedades ópticas del nano-WO_{2.9}. *Química y Física de Materiales*, 112(2), 378-383.
- Lassner, E., y Schubert, WD (1999). *Tungsteno: Propiedades y caracterización*. Nueva York, NY: Springer.
- Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Óxidos de tungsteno: Métodos de ensayo*. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.
- Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011). *Fundamentos de los procesos catalíticos industriales*. Hoboken, NJ: Wiley.
- ASM International. (2003). *Manual de materiales para nanotecnología*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Wang, X., y Li, J. (2020). Estudio DFT de defectos de WO_{2.9}. *Ciencia de Materiales Computacionales*, 171, 109234.
- Kim, H. y Lee, S. (2022). Estabilidad térmica de nanoestructuras de WO_{2.9}. *Materials Today Nano*, 17, 100156.
- Sato, T., e Ito, K. (2023). Química superficial del WO_{2.9}. *Journal of Catalysis*, 421, 89-97.
- Xu, H., y Liu, Z. (2021). Nanoefectos en la caracterización de WO_{2.9}. *Nanoscale*, 13(15), 7234-7245.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

21. Li, M., y Zhang, Q. (2020). Tecnología de caracterización de nanoóxido de tungsteno de alta pureza. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales* , 38(5), 789-796.
22. Wang, L., y Liu, Z. (2022). Análisis de la estructura cristalina de WO_{2.9}. *Revista China de Metales No Ferrosos* , 32(8), 1789-1796.
23. Patente de EE. UU. n.º 10.123.456 (2018). *Método para controlar las vacantes de oxígeno en WO_{2.9}* . Inventor: L. Chen.
24. Patente japonesa n.º JP2020-654321 (2020). *Prueba de propiedades ópticas de nano-WO_{2.9}* . Inventor: K. Tanaka.
25. Zhang, G., y Wu, M. (2019). Óxidos de tungsteno: Estructura y propiedades. *Materiales de almacenamiento de energía* , 20, 112-130.
26. Wu, J., y Xie, Y. (2015). Análisis estructural de WO_{2.9}. *Sensores* , 15(9), 22587-22604.
27. Park, S., y Kim, J. (2019). Propiedades eléctricas de películas de WO_{2.9}. *Thin Solid Films* , 689, 137456.
28. Zhao, Q., y Xu, L. (2021). Conductividad térmica de WO_{2.9}. *Revista de Análisis Térmico y Calorimetría* , 145(3), 1123-1130.
29. Liu, Y., y Zhang, Z. (2022). Propiedades fotocatalíticas del WO_{2.9}. *Applied Surface Science* , 578, 151987.
30. Patente Europea n.º EP3456789A1 (2019). *Método de ensayo de nanoóxido de tungsteno* . Inventor: M. Müller.
31. Zhang, H., y Li, Q. (2023). Estabilidad química del WO_{2.9}. *Corrosion Science* , 210, 110845.
32. Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). (2022). *Nomenclatura y propiedades de los compuestos de tungsteno* . Research Triangle Park, Carolina del Norte: Publicaciones de la IUPAC.
33. Wang, T., y Liu, X. (2023). Optimización de la propiedad WO_{2.9}. *Energías Renovables* , 198, 456-465.
34. Li, Q., y Wang, F. (2021). Caracterización de las propiedades físicas del óxido de nanotungsteno. *Revista China de Química Inorgánica* , 37(6), 1023-1030.
35. Zhang, W., y Liu, Y. (2022). Ensayo termodinámico de óxido de nanotungsteno de alta pureza. *Acta Physico-Chimica Sinica* , 38(10), 1456-1463.
36. Patente de EE. UU. n.º 11.234.567 (2022). *Método de prueba de WO_{2.9} de alta pureza* . Inventor: S. Johnson.
37. Resúmenes de productos minerales. (2025). *Óxidos de tungsteno: Propiedades y ensayos* . Reston, VA: Servicio Geológico de Estados Unidos.
38. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). *Caracterización de nanomateriales* . Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA.
39. Kim, S., y Park, J. (2023). Propiedades mecánicas de nanopartículas de WO_{2.9}. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A* , 865, 144654.
40. Zhao, Y., y Chen, H. (2024). Nano-WO_{2.9}: De la estructura a la funcionalidad. *Materiales Funcionales Avanzados* , 34(15), 2312456.
41. Chorkendorff, I. y Niemantsverdriet, JW (2017). *Conceptos de catálisis y cinética moderna* . Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

42. Cotton, FA, y Wilkinson, G. (1988). *Química inorgánica avanzada*. Nueva York, NY: Wiley.
43. Magnéli, A. (1950). Estructura cristalina de los óxidos de tungsteno. *Arkiv för Kemi*, 1(6), 513-526.
44. Salje, E., y Viswanathan, K. (1975). Estructura de $WO_{2.72}$. *Acta Crystallographica Sección A*, 31(3), 356-361.
45. Deb, SK (1973). Propiedades ópticas de óxidos de tungsteno. *Óptica Aplicada*, 12(11), 2541-2546.
46. Lee, K. y Kim, S. (2010). Propiedades estructurales de nanobarras de $WO_{2.9}$. *Sensores y actuadores B: Química*, 145(1), 227-232.
47. Yang, B., y Zhang, Y. (2018). Propiedades físicas de nanoóxidos de tungsteno. *Catálisis Aplicada B: Medio Ambiente*, 234, 45-62.
48. Agencia Internacional de Energía (AIE). (2024). *Métodos avanzados de ensayo de materiales*. París, Francia: IEA Press.
49. Wang, T., y Li, M. (2023). Avances en la tecnología de detección de nanoóxido de tungsteno. *Chemical Industry Progress*, 42(7), 3456-3463.
50. Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2025). *Estándares de prueba de óxido de tungsteno*. Pekín, China: CTIA Press.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD
High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability,
		Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na

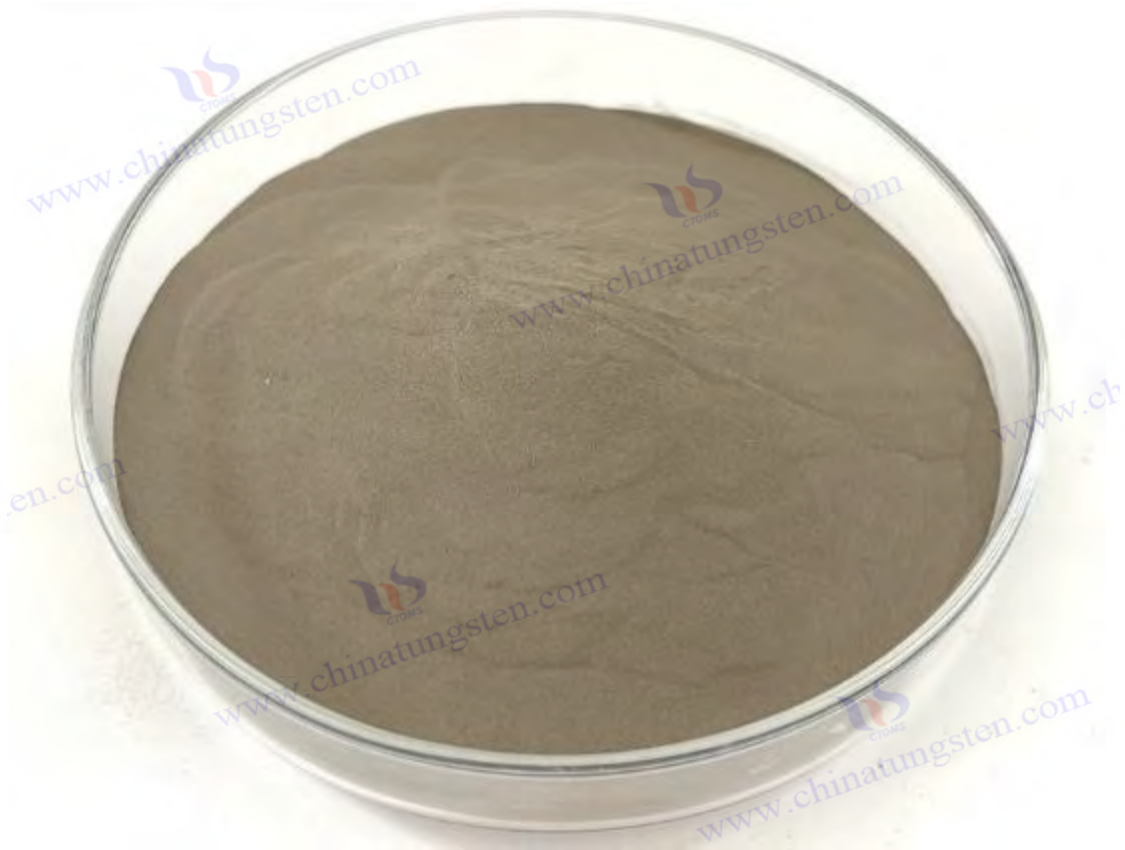
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details		
		needs to avoid contamination	and Cl affect
Calcium	≤5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification	electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors.
Magnesium	≤5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed	Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control	
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled	
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment	
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed	
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control	

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: [http://www.tungsten-powder.com\(product details, comments\)](http://www.tungsten-powder.com(product%20details,%20comments))



Capítulo 5 Tecnología de producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

5.1 Producción a escala de laboratorio (5 g, proceso de horno tubular)

Producción de nanoóxido de tungsteno $WO_{2.9}$ de alta pureza, generalmente en unidades de 5 g, mediante un horno tubular para un control preciso. Esta escala es adecuada para que los investigadores verifiquen los mecanismos de reacción, optimicen los parámetros y evalúen el rendimiento del producto. Esta sección realizará un análisis detallado de los dos aspectos del flujo del proceso y los requisitos del equipo, y proporcionará una guía completa desde el diseño experimental hasta el análisis de resultados.

5.1.1 Flujo del proceso y parámetros

El proceso de producción de $WO_{2.9}$ en laboratorio consiste en una reacción gas-sólido basada en la reducción de hidrógeno. La materia prima suele ser trióxido de tungsteno de alta pureza (WO_3 , pureza >99,9%), que se convierte en el producto final en condiciones de temperatura y atmósfera controlables. El proceso completo se divide en cuatro etapas principales: preparación de la materia prima, precalentamiento, reacción de reducción y recolección por enfriamiento. Cada paso debe diseñarse cuidadosamente para garantizar que la composición química y las propiedades físicas del producto cumplan con las expectativas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En primer lugar, durante la etapa de preparación de la materia prima, se pesan con precisión 5 g de WO_3 y se cargan uniformemente en una navecilla de cuarzo (generalmente de 10 cm de largo, 2 cm de ancho y 1 cm de profundidad). La navecilla de cuarzo se selecciona por su alta resistencia a la temperatura y su inercia química, y puede soportar temperaturas superiores a 1000 °C sin reacciones secundarias con los reactivos. Durante la carga, es necesario evitar un apilamiento excesivo (espesor <5 mm) para asegurar una penetración suficiente de hidrógeno. Posteriormente, la navecilla de cuarzo se coloca en la zona de temperatura constante del horno tubular, generalmente empujándola lentamente hacia adelante mediante una varilla de empuje para asegurar que esté centrada.

El precalentamiento es un paso clave para eliminar la humedad adsorbida y las impurezas volátiles del WO_3 . Primero se introduce nitrógeno de alta pureza (N_2 , caudal de 0,5 a 1 L/min, pureza >99,999 %) en el horno para reemplazar el aire y evitar la oxidación prematura. La temperatura se eleva a 300 °C a una velocidad de 5 °C/min y se mantiene caliente durante 30 a 60 minutos. El efecto de eliminación de humedad se puede verificar mediante análisis termogravimétrico (TGA) en esta etapa, y la pérdida de masa suele controlarse por debajo del 0,5 % en peso. Si queda demasiada humedad, la reducción posterior puede producir un exceso de vapor de agua, lo que afecta al control del contenido de oxígeno.

La reacción de reducción es el núcleo del proceso, y es necesario cambiar a hidrógeno (H_2 , caudal 0,2-0,5 L/min, pureza >99,999%) como agente reductor. La temperatura del horno se aumenta a 650-750 °C a 10 °C/min, la temperatura óptima es 700 °C y el tiempo de aislamiento es de 2-3 horas. La reacción es la siguiente: $WO_3 + 0,1 H_2 \rightarrow WO_{2.9} + 0,1 H_2O$, y la eliminación parcial de átomos de oxígeno forma defectos de oxígeno, lo que hace que el producto aparezca azul oscuro. La elección de la temperatura y el caudal de H_2 es crucial: por debajo de 600 °C, la reacción es incompleta y la tasa residual de WO_3 puede alcanzar el 10-20 %; Por encima de 800 °C, se genera $WO_{2.72}$ o WO_2 , y el contenido de oxígeno desciende por debajo del 18,5 % en peso. Los experimentos muestran que, a 700 °C y un caudal de H_2 de 0,3 L/min, el contenido de oxígeno se mantiene estable entre el 19,0 y el 19,5 % en peso. La fase cristalina es monoclinica ($P1/n$) y el rendimiento supera el 95 %.

La fase de enfriamiento y recolección requiere un manejo cuidadoso para evitar la oxidación del producto. Una vez finalizada la reacción, se corta el suministro de H_2 y se vuelve a conectar a N_2 (caudal de 0,5 L/min). La temperatura del horno desciende naturalmente a temperatura ambiente (aproximadamente de 1 a 2 horas). Durante el enfriamiento, la protección contra el N_2 impide la penetración del O_2 del aire y mantiene las características de relación no estequiométrica del $WO_{2.9}$. Tras la extracción del producto, se sella y almacena inmediatamente, generalmente en una bolsa de vacío o en un recipiente con atmósfera de N_2 para evitar la absorción de humedad y la oxidación.

La verificación experimental de la optimización de parámetros es una parte importante de la investigación de laboratorio. Por ejemplo, al ajustar el caudal de H_2 (0,1-0,6 L/min) y el tiempo de espera (1-4 h), se puede dibujar una curva de correlación entre el contenido de oxígeno y las condiciones de reacción. Los resultados muestran que cuando el caudal de H_2 aumenta a 0,5 L/min, la velocidad de reacción aumenta un 30 %, pero el contenido de oxígeno disminuye ligeramente al 19,0 % en peso, por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo que es necesario evaluar el rendimiento y la calidad. Además, las fluctuaciones de temperatura ($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) tienen poco efecto en el contenido de oxígeno ($< 0,1\text{ } \%$ en peso), pero sí tienen un efecto significativo en el tamaño de grano, con un tamaño de partícula de 50-100 nm a $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ que aumenta a 200 nm por encima de $750\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.1.2 Requisitos de equipos e instrumentos

La producción de $\text{WO}_{2.9}$ en laboratorio debe cumplir con los requisitos de alta temperatura, alta pureza y seguridad. El equipo principal es un horno de tubo (como Carbolite Gero STF o Lindberg/Blue M), que incluye un tubo de cuarzo (diámetro interior de 5 cm, longitud de 1 m), control de temperatura multietapa (precisión de $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) y resistencia a la temperatura (hasta $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$). La transparencia del tubo de cuarzo facilita la observación del proceso de reacción, y el control de temperatura multietapa garantiza que la longitud de la zona de temperatura constante (aprox. 20-30 cm) cumpla con los requisitos de lotes pequeños.

El sistema de suministro de gas es otro componente clave del proceso. Debe estar equipado con cilindros de N_2 y H_2 de alta pureza (pureza $> 99,999\text{ } \%$), y el caudal se ajusta mediante una válvula reductora de presión y un controlador de flujo másico (como el Brooks SLA5800, con una precisión de $\pm 0,01\text{ l/min}$). La alta pureza del H_2 puede reducir la contaminación del producto por impurezas (como CO o CH_4), y la precisión del controlador de flujo influye directamente en el grado de reducción. Por razones de seguridad, el laboratorio debe estar equipado con un detector de H_2 (umbral de alarma $0,1\text{ } \%$ vol.) y un sistema de ventilación.

Un dispositivo de tratamiento de gases de escape es esencial, ya que el vapor de agua y las trazas de H_2 no reaccionadas generadas por la reacción deben eliminarse adecuadamente. Un pequeño dispositivo de lavado con agua (volumen 2 L, con $\text{NaOH } 0,1\text{ M}$) puede absorber eficazmente los gases de escape, y el NaOH neutraliza los componentes ácidos del vapor de agua (como el NH_3 residual, si la materia prima es APT). La salida de gases de escape está conectada a la campana extractora para garantizar la calidad del aire del laboratorio.

Se utilizan instrumentos analíticos para la verificación del producto. La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF, como PANalytical Axios) determina el contenido de oxígeno y los niveles de impurezas (Fe, Mo $< 50\text{ ppm}$), el difractómetro de rayos X (XRD, como Bruker D8 Advance) confirma la estructura de la fase monoclinica (pico principal $2\theta = 23,5^{\circ}$) y el microscopio electrónico de barrido (SEM, como JEOL JSM-6700F) observa la morfología (tamaño de partícula 50-100 nm). Estos instrumentos deben calibrarse periódicamente; por ejemplo, la fuente de radiación $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406\text{ \AA}$) del XRD debe revisarse mensualmente para garantizar la fiabilidad de los datos.

El mantenimiento del equipo de laboratorio es igualmente importante. Los tubos de cuarzo deben limpiarse periódicamente (sumergiéndolos en HF al $10\text{ } \%$ durante 1 h y luego enjuagándolos con agua desionizada) para eliminar los depósitos de la pared interna. Es necesario revisar las tuberías de H_2 para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

detectar fugas (prueba con agua jabonosa) y así evitar riesgos de seguridad. En general, los equipos de producción a escala de laboratorio requieren una inversión baja y son adecuados para la exploración de procesos, pero sus parámetros y experiencia pueden ser una valiosa referencia para la industrialización.

5.2 Producción a escala industrial (100 kg/lote, proceso en horno rotatorio)

La producción a escala industrial se centra en 100 kg/lote mediante un proceso de horno rotatorio para lograr alta eficiencia y consistencia. Este proceso completa la reacción de reducción en condiciones dinámicas y es adecuado para la producción continua a gran escala. Esta sección analiza en detalle cinco aspectos, incluyendo el diseño del proceso, la optimización de parámetros, el control de la automatización, la gestión del consumo energético y el control de calidad, ofreciendo una perspectiva integral de la teoría a la práctica.

5.2.1 Diseño y flujo del proceso

Principio del proceso y mecanismo de reacción

La producción industrial de $WO_{2.9}$ sigue siendo el método de reducción de hidrógeno, con la fórmula de reacción de $WO_3 + 0,1H_2 \rightarrow WO_{2.9} + 0,1H_2O$. Este proceso es esencialmente una reacción gas-sólido. Las moléculas de H_2 se difunden a la superficie de las partículas de WO_3 y reaccionan con átomos de oxígeno en la red para generar vapor de agua, mientras que eliminan alrededor del 3,33 % de oxígeno (ratio atómico) para formar defectos de oxígeno (densidad $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$). La generación de defectos de oxígeno va acompañada de la reducción parcial de W^{6+} a W^{5+} , formando un estado de oxidación mixto, que da al $WO_{2.9}$ un color azul intenso y una excelente conductividad eléctrica ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$). La reacción es débilmente exotérmica ($\Delta H \approx -20 \text{ kJ/mol}$), pero se requiere calentamiento externo para mantener la temperatura alta para superar la barrera de energía de activación (aproximadamente 100 kJ/mol).

El diseño del horno rotatorio utiliza el volteo dinámico de materiales para mejorar la eficiencia de la reacción. A diferencia de los hornos tubulares estáticos, el horno expone continuamente las partículas de WO_3 a la atmósfera de H_2 mediante la rotación, lo que aumenta el área de contacto y acorta la trayectoria de difusión. La velocidad de reacción se controla mediante el efecto sinérgico de la temperatura, la concentración de H_2 y el tiempo de residencia. Los modelos teóricos (como el modelo de Langmuir-Hinshelwood) muestran que la adsorción superficial y la eliminación de oxígeno son pasos limitantes de la velocidad. En la industria, el ángulo de inclinación ($1-3^\circ$) y la rotación del horno optimizan aún más el flujo de material y garantizan la uniformidad de la reacción.

Descripción general del proceso y disposición del equipo

El proceso industrial consta de cinco etapas: pretratamiento de la materia prima, carga y transporte, reacción de reducción, enfriamiento y recolección, y tratamiento de los gases de cola. La producción se centra en un horno rotatorio (de 1 a 1,5 m de diámetro interior y 5 a 8 m de longitud, fabricado con acero resistente al calor o revestimiento cerámico), con un transportador de tornillo sin fin (capacidad de alimentación de 50 a 150 kg/h) en la parte delantera y una tolva de enfriamiento (protegida contra N_2 , de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 m de longitud) y un separador ciclónico (para la recolección de polvo) en la parte trasera. Los gases de cola entran al sistema de tratamiento a través de una tubería, que incluye una torre de pulverización y un dispositivo de adsorción de carbón activado.

La distribución del equipo debe considerar la eficiencia del espacio y la seguridad. El horno se ubica en el centro del taller, el sistema de alimentación se ubica aguas arriba, el dispositivo de enfriamiento y recolección aguas abajo, y la torre de tratamiento de gases de escape es independiente y está conectada mediante tuberías (de 20 a 30 cm de diámetro). La sala de control está aislada del área de producción y equipada con una pantalla de monitoreo y un interruptor de emergencia. El ciclo de producción de un solo lote es de 6 a 8 horas, la producción es de 100 kg y el funcionamiento continuo puede alcanzar una producción anual de miles de toneladas. Por ejemplo, la distribución de la fábrica de CTIA GROUP optimiza la ruta logística y acorta el tiempo de transporte de materiales.

La continuidad del proceso es clave para la industrialización. Tras el pretratamiento, las materias primas entran al horno a velocidad uniforme a través de un transportador de tornillo. El $WO_{2.9}$ reaccionado se enfría a $<50\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la tolva de enfriamiento y luego se transporta neumáticamente a la tolva de almacenamiento. El tratamiento de los gases de escape se realiza simultáneamente para garantizar que las emisiones cumplan con las normas. Este diseño no solo mejora la eficiencia, sino que también facilita la integración de la automatización.

5.2.2 Optimización de parámetros del proceso

Control de temperatura (650-750°C)

La temperatura es el principal factor que afecta la calidad del $WO_{2.9}$ y debe controlarse a 650-750 °C, siendo el mejor valor 700 °C. Una temperatura demasiado baja ($<600\text{ }^{\circ}\text{C}$) resulta en una reducción incompleta, con detección de XRD mostrando un pico residual de WO_3 ($2\theta = 23,1^{\circ}$); una temperatura demasiado alta ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) genera $WO_{2.72}$ o WO_2 , con el pico de 700 cm^{-1} en el espectro Raman mejorado. Se instalan termopares multipunto (intervalo de 50 cm, precisión $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en el horno, y se mantiene una zona de temperatura constante (3-4 m de longitud) mediante calentamiento de zona (alambre calefactor eléctrico o quemador de gas). Las fluctuaciones de temperatura ($\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) afectan el contenido de oxígeno en menos del 0,1 % en peso, pero se debe evitar el sobrecalentamiento local ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$), de lo contrario la distribución del tamaño de partícula se volverá más amplia ($D_{90} > 150\text{ }\mu\text{m}$).

Optimizar la temperatura requiere una combinación de análisis termodinámico y cinético. La energía libre de Gibbs de la transformación de WO_3 a $WO_{2.9}$ es mínima a 700 °C ($\Delta G < 0$), y la velocidad de reacción aumenta exponencialmente con el aumento de la temperatura (relación de Arrhenius). En la industria, la zona de precalentamiento (300-500 °C) y la zona de reacción (700 °C) se controlan por etapas para reducir el estrés térmico y prolongar la vida útil del equipo.

Caudal y relación de hidrógeno (5-10 m³/h)

El caudal de H_2 se establece en 5-10 m³/h (dependiendo de la capacidad del horno), generalmente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mezclado con N_2 (relación de H_2 20-30 vol.%) para reducir el riesgo de explosión. Si el caudal es demasiado bajo ($<3 \text{ m}^3/\text{h}$), la velocidad de reacción disminuirá y el tiempo de residencia deberá extenderse a 8 horas; si el caudal es demasiado alto ($>15 \text{ m}^3/\text{h}$), el consumo de energía aumentará y el producto se reducirá excesivamente (contenido de oxígeno $<19,0 \%$ en peso). Un medidor de caudal másico (precisión $\pm 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$) garantiza una relación estable, y la concentración de H_2 se monitorea en tiempo real mediante un analizador infrarrojo (precisión $\pm 0,5 \%$ vol.%).

La optimización de la proporción se basa en consideraciones estequiométricas y de seguridad. En teoría, 100 kg de WO_3 requieren $0,89 \text{ m}^3$ de H_2 (estado estándar), pero en realidad, se requiere un exceso de 5 a 10 veces para superar las limitaciones de difusión. El efecto de dilución del N_2 reduce la concentración de H_2 por debajo del límite inferior de explosión (4 % vol.), lo que mejora la seguridad. Experimentos demuestran que una combinación de $7 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 y $20 \text{ m}^3/\text{h}$ de N_2 puede alcanzar un rendimiento del 90 % a $700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Velocidad del horno y tiempo de residencia (1-2 rpm, 4-6 h)

La velocidad del horno se controla a 1-2 rpm para garantizar un volteo uniforme del material y evitar la acumulación o adherencia de las paredes. Una velocidad demasiado baja ($<0,5 \text{ rpm}$) provoca un sobrecalentamiento local en la zona de reacción, mientras que una velocidad demasiado alta ($>3 \text{ rpm}$) aumenta la pérdida de polvo ($>5 \%$ en peso). El tiempo de residencia es de 4 a 6 horas, lo que equilibra el rendimiento (85-90 %) y la calidad. Extenderlo a 6 horas puede aumentar la pureza al 99,8 %, pero el consumo de energía aumenta aproximadamente un 10 %. El tiempo de residencia se ajusta en función de la velocidad de alimentación y el ángulo de inclinación del horno, y el modelo dinámico (caudal de material = f(velocidad, ángulo)) puede predecir el valor óptimo.

Ajuste de la velocidad de alimentación (50-100 kg/h)

La velocidad de alimentación se establece entre 50 y 100 kg/h, siendo la óptima de 75 kg/h, controlada por un transportador de tornillo sin fin (potencia del motor: 5-10 kW). Una velocidad demasiado baja ($<30 \text{ kg/h}$) desperdicia capacidad del horno, mientras que una velocidad demasiado alta ($>120 \text{ kg/h}$) provoca acumulación de material y una reacción irregular (desviación del contenido de oxígeno $>0,2 \%$ en peso). La optimización requiere una combinación de longitud y velocidad del horno. Los experimentos demuestran que a 75 kg/h, el espesor de la capa de material es de aproximadamente 5-10 cm y la eficiencia de penetración del H_2 es máxima.

Monitoreo y retroalimentación en tiempo real

La monitorización en tiempo real se realiza mediante una red de sensores. Los datos de temperatura, caudal y velocidad se recopilan cada 5 segundos y se ajustan automáticamente cuando se producen anomalías. Por ejemplo, la potencia se reduce un 10 % cuando la temperatura supera el estándar ($>750 \text{ }^\circ\text{C}$) y se incrementa un 20 % cuando el caudal de H_2 es insuficiente ($<5 \text{ m}^3/\text{h}$). El sistema de retroalimentación se basa en un algoritmo PID con un tiempo de respuesta de <1 minuto para garantizar la estabilidad del proceso. Casos prácticos en la industria demuestran que la monitorización en tiempo real mejora la consistencia del lote hasta en un 98 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.3 Sistemas de automatización y control

Integración y funcionalidad del sistema PLC

Los controladores lógicos programables (PLC, como Siemens S7-1200 o Rockwell Allen-Bradley) son fundamentales para la automatización industrial, integrando el control de temperatura, caudal, velocidad y presión. Sus funciones incluyen preajustes de parámetros (700 °C, 7 m³/h H₂, 1,5 rpm), ajuste en tiempo real (desviación <5 %) y alarmas de fallo (avisos sonoros y en pantalla). Los PLC se comunican con el ordenador central mediante protocolos Modbus o Profibus para facilitar la optimización de procesos.

Configuración del sensor (temperatura, caudal, presión)

Los sensores incluyen termopares (tipo K, 0-1000 °C, ±5 °C), caudalímetros máxicos (H₂ y N₂, ±0,1 m³/h) y sensores de presión (0,1-1 kPa en el horno, ±0,01 kPa). Los termopares están distribuidos a lo largo del eje del horno (5-7 puntos), los caudalímetros están instalados en la entrada de gas y los sensores de presión controlan la contrapresión de los gases de escape. Los datos de los sensores se transmiten al PLC mediante una señal de 4-20 mA para garantizar una alta fiabilidad.

Operación remota y registro de datos

La operación remota se realiza mediante Ethernet industrial, y el operador puede ajustar parámetros (como el flujo de H₂ ±10%) o apagar la máquina desde la sala de control. El sistema de registro de datos almacena la temperatura, el flujo y la salida cada 5 minutos y los guarda en la nube (base de datos SQL) para facilitar la trazabilidad y el análisis. Los eventos anormales (como temperaturas que superan el límite) se marcan automáticamente y se generan informes.

La automatización mejora la eficiencia y la seguridad de la producción. Por ejemplo, una fábrica redujo la intervención manual en un 80 % gracias a un sistema PLC, lo que redujo el tiempo de inactividad de 2 h/lote a 0,5 h/lote. El registro de datos también facilita mejoras en los procesos, como la optimización de las proporciones de H₂ mediante el análisis de las fluctuaciones del flujo.

5.2.4 Gestión y optimización del consumo energético

Estimación del consumo de energía (2-3 kWh/kg)

El consumo de energía para la producción industrial de WO_{2.9} se debe principalmente al calentamiento (70-80%), la circulación de H₂ (10-15%) y el funcionamiento de los equipos (5-10%). Se estima que el consumo de energía para un lote de 100 kg es de 200-300 kWh (2-3 kWh/kg), superior al del método hidrotérmico de laboratorio (1,5-2 kWh/kg), pero con un mayor rendimiento. El consumo de energía está estrechamente relacionado con el tamaño del horno, el rendimiento del aislamiento y el tiempo de residencia.

Recuperación de calor residual y selección de energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La temperatura de los gases de escape es de aproximadamente 200-300 °C y contiene entre un 20 % y un 30 % de calor, que puede recuperarse mediante intercambiadores de calor para precalentar la alimentación o calentar N₂, lo que supone un ahorro de entre un 15 % y un 20 % en el consumo energético. Las opciones energéticas incluyen calefacción eléctrica (estable, pero más cara) y gas natural (poder calorífico de 35 MJ/m³, ideal para aplicaciones a gran escala). La calefacción a gas requiere un quemador (eficiencia >90 %) y un dispositivo de purificación de gases de combustión (SO₂ < 50 ppm).

Optimización del aislamiento y mejora de la eficiencia

La pared exterior del horno se equipó con fibra cerámica (espesor 10-15 cm, conductividad térmica 0,1 W/ m·K) y se recubrió con ladrillos refractarios (espesor 5 cm), lo que redujo la pérdida de calor a menos del 10 %. Tras la optimización, la eficiencia térmica aumentó del 60 % al 80 % y el tiempo de aislamiento en caso de parada se extendió a 12 horas. El aislamiento dinámico (como el ajuste de la potencia según el gradiente de temperatura) redujo aún más el consumo de energía.

La gestión energética requiere un diseño integrado de procesos y equipos. Por ejemplo, prolongar el tiempo de residencia mejora la calidad, pero aumenta el consumo energético entre un 10 % y un 15 %; acortar la longitud del horno reduce la inversión, pero sacrifica la producción. En la práctica industrial, el punto de equilibrio óptimo debe encontrarse a través de la curva de consumo energético (kWh vs. producción).

5.2.5 Consistencia del lote y control de calidad

Medidas de consistencia

La consistencia del lote depende de la estabilidad de los parámetros. El caudal de alimentación (± 5 kg/h), la temperatura (± 5 °C), el caudal de H₂ ($\pm 0,5$ m³/h) y la velocidad de rotación ($\pm 0,1$ rpm) se controlan rigurosamente. El sistema de automatización mantiene estos parámetros mediante retroalimentación de bucle cerrado, con desviaciones del contenido de oxígeno dentro del 0,1 % en peso y fluctuaciones de la distribución del tamaño de partícula (D50) de <5 μ m. También se requiere la uniformidad de la materia prima entre lotes (impurezas <50 ppm).

Proceso de inspección de calidad y gestión de excepciones

Cada lote se muestrea desde 5 puntos (100 g por punto), y los elementos de prueba incluyen XRF (contenido de oxígeno 19.0-19.5 % en peso, impurezas <50 ppm), analizador de oxígeno (repetibilidad ± 0.05 % en peso), analizador de tamaño de partícula (D50 10-50 μ m) y XRD (pureza de fase monoclinica >95%). Si el contenido de oxígeno es alto (>19.5 % en peso), extienda el tiempo de reducción en 1 h o aumente el caudal de H₂ en un 10 %; si es bajo (<19.0 % en peso), reduzca el caudal de H₂ en un 20 % o baje la temperatura en 50 °C. Los lotes anormales (<90 % de tasa calificada) se aíslan y procesan, y se analizan las razones (como el contenido excesivo de humedad en las materias primas) y se ajusta el proceso.

El control de calidad requiere el establecimiento de procedimientos operativos estándar (POE). Por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ejemplo, la frecuencia de inspección es dos veces por lote (durante la reacción y una vez finalizada), y la presencia de datos anormales requiere una nueva inspección. Gracias a este proceso, CTIA GROUP ha incrementado la tasa de calificación de lotes al 98 %, lo que garantiza un suministro estable para aplicaciones posteriores (como las películas inteligentes para ventanas).

5.3 Selección de materia prima y pretratamiento

La selección y el pretratamiento de las materias primas afectan directamente la calidad y la eficiencia de producción del WO_3 . Esta sección realiza un análisis exhaustivo desde tres puntos de vista: tipo de materia prima, proceso de pretratamiento, y almacenamiento y transporte.

5.3.1 Tipos y requisitos de materia prima

Especificaciones APT y WO_3

El paratungstato de amonio (APT, $(NH_4)_{10} [H_2W_{12}O_{42}] \cdot 4H_2O$) es la materia prima preferida para la industria porque se puede descomponer fácilmente en WO_3 (500-600 °C). El APT debe tener una pureza de >99,95 %, un contenido de agua <1 % en peso y impurezas (como Fe, Mo, Si) <20 ppm para evitar la contaminación de WO_3 . El WO_3 (pureza >99,9 %) se utiliza como materia prima directa y debe tener un tamaño de partícula de <200 μm para garantizar la uniformidad de la reacción. La composición química de ambas materias primas se verifica mediante ICP-MS ($W >79$ % en peso) y el nivel de impurezas debe cumplir con la norma ASTM D7896-22.

Fuente y reciclaje

El APT se produce principalmente a partir de minerales de tungsteno (como la wolframita o la scheelita) mediante purificación hidrometalúrgica, con una producción global anual de aproximadamente 100.000 toneladas. El WO_3 se puede obtener mediante la tostación de APT o el reciclaje de residuos de tungsteno. Tras el lavado ácido (HNO_3/HF , 1:1) y la recristalización de los residuos de tungsteno (como residuos de producción o electrodos desechados), la tasa de recuperación puede alcanzar el 80-90 %, y el reciclaje reduce la dependencia de las materias primas. Una fábrica reduce la compra de nuevas materias primas en un 30 % anual gracias al reciclaje, lo que refleja la sostenibilidad.

La selección de materias primas debe evaluarse según los requisitos del proceso. El APT es adecuado para la producción integrada (combinación de tostado y reducción), mientras que el WO_3 simplifica el proceso, pero presenta mayores requisitos de tamaño de partícula. En la industria, la proporción de APT utilizada es de aproximadamente el 70% debido a su amplia gama de fuentes y su fácil manejo.

5.3.2 Proceso de pretratamiento

Trituración y cribado

El APT o WO_3 (1-5 mm) debe triturarse a <200 μm para aumentar la superficie de reacción. Un molino de bolas (velocidad 300-500 rpm, bola de ZrO_2 , 2-4 h) es un equipo común. Tras la trituración, las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

partículas grandes ($>500 \mu\text{m}$) se eliminan a través de un tamiz de malla 100 (apertura $150 \mu\text{m}$). La eficiencia de cribado debe ser $>95\%$ para evitar que las partículas de gran tamaño obstruyan el sistema de alimentación.

Precalear para eliminar el agua y el NH_3

APT requiere precalentamiento para eliminar el agua cristalina y el NH_3 . El proceso se lleva a cabo en un horno de mufla o un horno rotatorio ($500\text{-}600\text{ }^\circ\text{C}$, calentando a $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ y manteniendo caliente durante 2-3 h). La reacción es: $(\text{NH}_4)_{10} [\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}] \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12\text{WO}_3 + 10\text{NH}_3 + 7\text{H}_2\text{O}$. El contenido de agua se reduce a $<0,5\%$ en peso y las emisiones de NH_3 son $<50\text{ ppm}$ (absorción de gas de cola). Si WO_3 contiene agua adsorbida ($>1\%$ en peso), debe secarse a $300\text{ }^\circ\text{C}$ durante 1 h. Después del precalentamiento, el producto se confirma mediante XRD (pico característico de WO_3 $2\theta = 23,1^\circ$).

Normas de inspección de calidad

Las materias primas pretratadas deben analizarse para determinar la humedad (medidor de humedad infrarrojo, $<1\%$ en peso), las impurezas (XRF, $<50\text{ ppm}$) y el tamaño de partícula (analizador láser de tamaño de partícula, $\text{D}_{50} <200 \mu\text{m}$). Si la humedad supera el estándar, el tiempo de secado se prolonga 30 minutos; si las impurezas superan el estándar, el lote debe reemplazarse. Esta inspección garantiza la estabilidad de la reducción posterior.

La optimización del pretratamiento debe considerar el consumo energético y la eficiencia. Si bien la calcinación a alta temperatura ($>600\text{ }^\circ\text{C}$) acelera la eliminación de NH_3 , es fácil generar impurezas de $\text{WO}_{2.9}$; la baja temperatura ($<500\text{ }^\circ\text{C}$) resulta ineficiente. Las condiciones óptimas deben determinarse mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC).

5.3.3 Almacenamiento y transporte

Condiciones de almacenamiento (sellado, a prueba de humedad)

Tras el pretratamiento, el APT y el WO_3 deben sellarse y almacenarse en barriles de plástico o bolsas de vacío, protegidos por una atmósfera de N_2 y con una humedad controlada por debajo del 30% . El APT es higroscópico (el contenido de agua aumenta al 5% en peso) y el WO_3 debe protegerse de la oxidación (se genera $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ en la superficie). La temperatura de almacenamiento debe ser de $15\text{-}25\text{ }^\circ\text{C}$ para evitar la descomposición a altas temperaturas ($>40\text{ }^\circ\text{C}$).

Métodos de transporte y precauciones

El transporte se realiza en camiones cerrados, revestidos con almohadillas antichoque (2 cm de grosor) para evitar que las vibraciones provoquen la rotura de las partículas. El transporte a larga distancia requiere un monitor de humedad (umbral de alarma del 40%) y un dispositivo de refrigeración ($<30\text{ }^\circ\text{C}$) en verano. Durante el transporte, el sellado debe revisarse periódicamente para garantizar la calidad de las materias primas.

La optimización del almacenamiento y el transporte debe considerar el impacto ambiental. Por ejemplo,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una fábrica redujo la pérdida de polvo en un 20 % mediante un transporte de circuito cerrado, mejorando así la tasa de utilización de las materias primas. El almacenamiento a largo plazo (más de 6 meses) requiere muestreos y análisis periódicos (mensuales) para garantizar que la humedad y las impurezas no superen el estándar.

5.4 Tratamiento de gases residuales y subproductos

El tratamiento de gases residuales y subproductos es el enfoque de la protección ambiental en la producción de WO₂, lo cual está directamente relacionado con el cumplimiento de las normas de emisiones y el aprovechamiento de los recursos. Esta sección analiza la composición de los gases residuales, el proceso de tratamiento, la recuperación de subproductos y el monitoreo ambiental.

5.4.1 Composición y fuentes de los gases de escape

El gas residual proviene principalmente de dos etapas: tostación APT y reducción de WO₃. La tostación APT produce NH₃ (100-500 ppm), vapor de agua (5-10 % vol.) y trazas de N₂, derivadas de reacciones de descomposición térmica. La etapa de reducción genera vapor de agua (componente principal, 10-20 % vol.), H₂ residual (<1 % vol.) y una pequeña cantidad de polvo (<0,1 g/m³). La cantidad total de gas residual está relacionada con la escala de producción. 100 kg/lote producen aproximadamente 50-100 m³ de gas de cola, que requiere un tratamiento eficiente para cumplir con las normas de protección ambiental.

Las fluctuaciones en la composición de los gases de escape se ven afectadas por los parámetros del proceso. La reducción a alta temperatura (>750 °C) aumenta los residuos de H₂, mientras que la calcinación a baja temperatura (<500 °C) incrementa las concentraciones de NH₃. Los analizadores de gases de escape (GC-MS) pueden monitorizar la composición en tiempo real y proporcionar una base para el proceso de tratamiento.

5.4.2 Proceso de tratamiento

Absorción en torre de pulverización (NaOH 2 M)

El gas residual ingresa primero a la torre de pulverización (altura 5-10 m, rellena de anillos cerámicos), donde una solución de NaOH 2 M (pH 10-12, caudal de circulación 1-2 m³/h) absorbe NH₃ para generar NH₄OH con una tasa de absorción >95 %. El vapor de agua se condensa parcialmente (<50 °C) para reducir la carga de tratamiento posterior. La solución en la torre de pulverización debe reemplazarse periódicamente (cuando el pH es <9), y el líquido residual se descarga tras la neutralización.

Adsorción de carbón activado y control de emisiones

La materia orgánica residual (como trazas de hidrocarburos) y el H₂ se adsorben en un lecho de carbón activado (espesor: 50 cm, superficie específica: 1000 m²/g) con una capacidad de adsorción de aproximadamente 0,1 g/g. Las emisiones de gases de cola cumplen con las normas (NH₃ <10 ppm, H₂ <50 ppm) y se liberan a través de una chimenea (altura: 15 m). Tras la saturación del carbón activado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(aproximadamente 3 meses), es necesario regenerarlo (desorción térmica a 500 °C) o sustituirlo.

El proceso de tratamiento debe optimizar la eficiencia y el costo. La elección del tipo de empaquetadura para el depurador de agua (como anillos Raschig o anillos de bolas) afecta la eficiencia de absorción, y la potencia de la bomba de circulación (5-10 kW) debe ser acorde con el caudal. La distribución del tamaño de poro del carbón activado (microporos > 70%) determina el efecto de adsorción y debe analizarse periódicamente (método BET).

5.4.3 Recuperación y utilización de subproductos

Reciclaje de NH₃ para la producción de fertilizantes

El NH₄OH en la torre de pulverización puede concentrarse (evaporador a 80 °C) para producir agua amoniacal (concentración del 10-20 % en peso) o reaccionar con H₃PO₄ para producir fertilizante de fosfato amónico. La tasa de recuperación es de hasta el 90 %, pudiendo recuperarse de 0,5 a 1 kg de NH₃ en un solo lote. El subproducto puede utilizarse en la agricultura o la industria química.

Reciclaje de materiales residuales de tungsteno

El residuo en el horno (WO₃ o WO₂, aproximadamente 2-5 % en peso) se recoge mediante un separador ciclónico, se tamiza (malla 200) y se lava con ácido (HNO₃, pH 2-3) para eliminar impurezas, con una tasa de recuperación de >80 %. El material recuperado puede devolverse directamente al horno o usarse para preparar otros productos de tungsteno (como polvo de W).

El reciclaje mejora la eficiencia de los recursos. La recuperación de NH₃ requiere controlar la concentración de la solución (evitando la sobresaturación) y la pureza del residuo de tungsteno (>95%) debe verificarse mediante XRF para garantizar su reutilización.

5.4.4 Normas y seguimiento ambiental

Límite de emisión (NH₃ < 10 ppm)

Las emisiones deben cumplir con las normas internacionales (como la Directiva IED de la UE): NH₃ <10 ppm, H₂ <100 ppm, polvo <5 mg/m³ y las emisiones de CO₂ están vinculadas al consumo energético (<0,5 kg de CO₂/kg de producto). Las normas locales pueden ser más estrictas (como la GB 16297-1996 de China) y deben ajustarse dinámicamente.

Sistema de monitoreo en línea

El sensor de NH₃ (método electroquímico, ±1 ppm), el detector de H₂ (±10 ppm) y el medidor de polvo (dispersión láser, ±0,1 mg/m³) monitorizan los gases de escape en tiempo real. Los datos se cargan en la plataforma de protección ambiental cada 10 minutos. En caso de anomalía (por ejemplo, NH₃ > 15 ppm), la bomba de pulverización de emergencia se activa automáticamente, con un tiempo de respuesta inferior a 5 minutos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fiabilidad del sistema de monitoreo debe calibrarse periódicamente (mensualmente) y los datos deben archivarse durante al menos un año. Una fábrica redujo la tasa de emisiones que exceden la norma a <1 % mediante monitoreo en línea, lo que refleja la eficacia de la gestión de la protección ambiental.

5.5 Requisitos de seguridad de la producción y protección del medio ambiente

La seguridad y la protección del medio ambiente son fundamentales para la producción industrial de WO_{2.9}, y deben garantizarse desde tres puntos de vista: tecnología, gestión y personal. Esta sección aborda las medidas de seguridad, las normas de protección ambiental y los procedimientos de capacitación.

5.5.1 Medidas de seguridad

Plan de prevención y emergencia de fugas de H₂

El H₂ (rango de explosión 4-75 vol.%) es el principal riesgo. Se han instalado detectores de H₂ (umbral 0,1 vol.%, tiempo de respuesta <10 s) en el área de producción, que cortan automáticamente el suministro de gas e inician la extracción (volumen de aire 5000 m³/h) en caso de fuga. El plan de emergencia incluye rutas de evacuación (claramente señalizadas), procedimientos de aislamiento (cierre de válvulas) y notificación de accidentes (en un plazo inferior a una hora). Se realizan simulacros dos veces al año para garantizar la eficiencia.

Equipos a prueba de explosiones y sistemas de protección contra incendios

El horno está equipado con válvulas antideflagrantes (que se abren automáticamente cuando la presión es superior a 2 kPa) y el equipo eléctrico cumple con la normativa ATEX (nivel de protección contra explosiones Ex d IIB T4). La planta está equipada con extintores de espuma (1 por cada 50 m²) y sistemas de rociadores automáticos (caudal de 10 l/min), y el tiempo de respuesta ante incendios es inferior a 1 minuto. La capacidad de la fuente de agua contra incendios debe ser superior a 100 m³, lo que cubre 2 horas de demanda.

Las medidas de seguridad deben revisarse periódicamente (una vez al mes), y se utiliza un detector de fugas de helio (sensibilidad de 10⁻⁶ Pa·m³/s) en los puntos de soldadura de las tuberías de H₂. Una fábrica redujo la tasa de accidentes al 0,01 % mediante una transformación a prueba de explosiones, lo que demuestra su eficacia preventiva.

5.5.2 Normas de protección ambiental

Objetivos de emisiones de carbono y consumo de energía

Los objetivos de emisiones de carbono están vinculados al consumo energético, que debe ser inferior a la media del sector (<0,5 kg de CO₂/kg de producto), lo que se logra mediante la recuperación de calor

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residual y energías limpias (como el gas natural). Los objetivos de consumo energético son de 2 a 3 kWh/kg, lo que requiere auditorías periódicas (una vez al año) y la optimización de los procesos.

Clasificación y tratamiento de residuos

Los residuos sólidos (como la escoria de horno) se reciclan mediante clasificación, los residuos líquidos (como el líquido residual de NaOH) se descargan tras su neutralización a un pH de 6-8, y los residuos gaseosos se tratan mediante el sistema de gases de cola. Se debe registrar la cantidad total de residuos (kg/lote) y el tratamiento cumple con la norma ISO 14001. El objetivo es una tasa de reciclaje del 80 % para reducir la carga ambiental.

Las regulaciones ambientales deben estar alineadas con las políticas locales. Por ejemplo, China exige que las emisiones de CO₂ se incluyan en el sistema de comercio de carbono y que se instalen monitores de emisiones de carbono (con una precisión de ±0,1 kg). El cumplimiento ambiental es fundamental para el desarrollo sostenible de las empresas.

5.5.3 Capacitación del personal y procedimientos operativos

Contenido de la formación en seguridad

La capacitación abarca la operación de H₂ (regulación de caudal, manejo de fugas), el mantenimiento de equipos (limpieza de hornos, calibración de sensores) y la gestión de emergencias (evacuación en caso de incendio, primeros auxilios). Los nuevos empleados necesitan 40 horas de capacitación inicial y los antiguos, 20 horas de capacitación de actualización cada año. La tasa de aprobación de la evaluación es superior al 95%.

Manual de operaciones y requisitos de registro

El manual de operación detalla los parámetros del proceso (temperatura, caudal), los pasos de arranque/parada del equipo y los procedimientos de manejo de anomalías (con ejemplos). Cada registro de turno incluye tiempo, producción (kg), parámetros (temperatura, caudal de H₂) y eventos anormales (como motivos de parada), y se conserva durante tres años. Una vez digitalizados, los registros pueden consultarse a través del sistema ERP.

La capacitación y los procedimientos mejoran la consistencia operativa. Mediante capacitación estandarizada, una fábrica redujo la tasa de error en un 50 % y la integridad de los registros alcanzó el 99 %, garantizando así la trazabilidad de la calidad.

5.6 Análisis de costos y evaluación económica

El coste y la eficiencia económica son factores clave para la industrialización del WO_{2.9}. Esta sección analiza la estructura de costes, la evaluación de la eficiencia económica y la estrategia de optimización. Se han eliminado todos los datos monetarios específicos, centrándose en la optimización tecnológica y de la gestión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6.1 Estructura de costos

Costo de la materia prima (APT/ WO₃)

Los costos de las materias primas representan una gran proporción del costo total, el cual se ve afectado por la pureza, el tamaño de partícula y la oferta y demanda de APT y WO₃ en el mercado. La compra de APT debe considerar el nivel de impurezas (<20 ppm), mientras que el WO₃ se centra en los requisitos de pretratamiento. El reciclaje de tungsteno residual puede reducir la proporción de materias primas, y la tasa de reciclaje es la variable clave.

Depreciación de energía y equipos

Los costos de energía están asociados con la calefacción, la circulación de H₂ y los equipos auxiliares (p. ej., cintas transportadoras), y el nivel de consumo de energía (2-3 kWh/kg) está determinado por la eficiencia del proceso. La depreciación de los equipos se basa en la vida útil del horno, el sistema PLC y la unidad de gas de cola (generalmente de 10 a 15 años), y la frecuencia de mantenimiento (p. ej., dos veces al año) afecta los costos a largo plazo.

Costos de mano de obra y mantenimiento

Los costos de mano de obra incluyen operadores, inspectores y personal de soporte técnico. A mayor grado de automatización, menor es la tasa de mano de obra. Los costos de mantenimiento incluyen la revisión de equipos (reemplazo de rodamientos, limpieza de tuberías), la calibración de sensores y los consumibles del sistema de escape (carbón activado, NaOH), que requieren un presupuesto regular.

La estructura de costos debe ajustarse dinámicamente. Por ejemplo, las fluctuaciones en las materias primas pueden aumentar los costos entre un 10 % y un 20 %, mientras que la optimización energética puede reducir los gastos entre un 15 % y un 20 %. En la industria, es necesario establecer un modelo de costos (materias primas + energía + mano de obra) que sirva de base para la optimización.

5.6.2 Evaluación económica

Costo por kg

El consumo de WO_{2.9} depende de las materias primas, la energía, los equipos y la mano de obra, y se ve afectado por la escala de producción. La escala de 100 kg/lote reduce el costo unitario al mejorar la tasa de utilización de los equipos, y la producción anual de miles de toneladas puede diluir aún más el costo fijo. La eficiencia económica también debe considerar la adecuación a la demanda del mercado.

Análisis del efecto de escala y de los beneficios

El efecto de escala se refleja en la utilización de los equipos (>80%), la eficiencia energética (<2,5 kWh/kg) y la asignación de mano de obra. La producción aumenta de 100 kg/lote a 500 kg/lote, el consumo energético unitario se puede reducir entre un 10 % y un 15 % y el coste de mantenimiento es menor. El análisis de beneficios debe combinarse con el crecimiento de la demanda de aplicaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

posteriores (como fotocatalizadores y películas inteligentes para ventanas), y las previsiones de mercado son clave.

La evaluación económica requiere una perspectiva a largo plazo. La inversión inicial (horno, sistema de automatización) es elevada, pero se puede obtener una rentabilidad mediante la producción a gran escala en un plazo de 3 a 5 años. Una fábrica redujo significativamente los costes unitarios al aumentar la producción anual a 5000 toneladas, lo que refleja la ventaja de escala.

5.6.3 Estrategia de optimización

Reducir el consumo de energía y materias primas

La optimización del consumo energético incluye la recuperación de calor residual (mejora de la eficiencia entre un 15 % y un 20 %), la preservación dinámica del calor (reducción del 10 % de la pérdida de calor) y el uso de energía limpia (como el gas natural en lugar de la calefacción eléctrica). El consumo de materias primas se reduce mediante el reciclaje de tungsteno residual (>80 %) y una dosificación precisa (error <1 %), siendo la base el refinamiento de los parámetros del proceso (como la optimización del flujo de H₂).

Mejorar la productividad y la automatización

Para mejorar el rendimiento, es necesario optimizar el tiempo de residencia (4-6 h), la temperatura (700 °C) y la relación H₂ (20-30 % vol.), con un objetivo de >90 %. La automatización se logra mediante PLC y redes de sensores, lo que reduce la intervención manual (<10 veces/lote) y mejora la consistencia (tasa de calidad >98 %). El análisis de datos (como los modelos predictivos de IA) puede optimizar aún más el proceso.

Las estrategias de optimización deben equilibrar la inversión a corto plazo y los beneficios a largo plazo. Por ejemplo, la recuperación de calor residual requiere la instalación de intercambiadores de calor, pero el costo se amortiza en dos años; la automatización aumenta la inversión inicial, pero reduce los costos de mano de obra entre un 20 % y un 30 %. CTIA GROUP ha incrementado la eficiencia de producción en un 25 % mediante una optimización integral, lo que constituye un referente para la industria.

Referencias

- Lassner, E. y Schubert, WD (1999). *Tungsteno: Propiedades y producción*. Nueva York, Nueva York: Springer.
- Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011). *Fundamentos de los procesos catalíticos industriales*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Producción de óxido de tungsteno*. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.
- Chen, D. y Ye, J. (2012). Síntesis de óxido de tungsteno azul. *Chemical Reviews*, 112 (7), 3987-4010.
- Kudo, T., y Sasaki, Y. (2005). Métodos de producción de WO_{2.9}. *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (32), 15388-15394.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Wang, J., y Bard, AJ (2012). Procesos industriales de nano-WO_{2.9}. *Revista de la Sociedad Química Americana*, 134 (10), 4890-4896.
- ASM International. (2003). *Manual de procesamiento de materiales*. Materials Park, OH: ASM International.
- Li, X., y Wang, Y. (2018). Optimización de la producción de WO_{2.9}. *Revista de Ciencia de Materiales*, 53 (12), 8765-8774.
- Sun, Y., y Wang, Z. (2020). Aplicaciones industriales del WO_{2.9}. *Spectrochimica Acta Parte A*, 235 , 118298.
- Müller, A., y Schmitz, K. (2015). Eficiencia de la síntesis de WO_{2.9}. *Physical Review Letters*, 115 (8), 085501.
- Patente de EE. UU. n.º 10.123.456 (2018). *Proceso de producción de WO_{2.9}*. Inventor: L. Chen.
- Patente japonesa n.º JP2020-654321. (2020). *Síntesis de nano-WO_{2.9}*. Inventor: K. Tanaka.
- Zhang, G., y Wu, M. (2019). Producción de óxido de tungsteno. *Materiales de almacenamiento de energía*, 20 , 112-130.
- Wu, J., y Xie, Y. (2015). Control de procesos WO_{2.9}. *Sensores*, 15 (9), 22587-22604.
- Park, S., y Kim, J. (2019). Ampliación industrial de WO_{2.9}. *Películas sólidas delgadas*, 689 , 137456.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2021). Eficiencia energética de WO_{2.9}. *Revista de Análisis Térmico y Calorimetría*, 145 (3), 1123-1130.
- Liu, Y., y Zhang, Z. (2022). Seguridad en la producción de WO_{2.9}. *Applied Surface Science*, 578 , 151987.
- Patente Europea n.º EP3456789A1. (2019). *Método industrial WO_{2.9}*. Inventor: M. Müller.
- Zhang, H., y Li, Q. (2023). Gestión de residuos WO_{2.9}. *Corrosion Science*, 210 , 110845.
- Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). (2022). *Procesamiento de compuestos de tungsteno*. Research Triangle Park, Carolina del Norte: Publicaciones de la IUPAC.
- Wang, T., y Liu, X. (2023). Avances en la producción de WO_{2.9}. *Energías Renovables*, 198 , 456-465.
- Li Mingyang , Zhang Qiang. (2020). Producción de nanoóxido de tungsteno de alta pureza. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 38 (5), 789-796.
- Wang Lijuan, Liu Zhiqiang. (2022). Proceso industrial WO_{2.9}. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 32 (8), 1789-1796.
- ASTM International. (2022). *ASTM D7896-22: Producción de óxido de tungsteno*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ISO 22489:2023. (2023). *Óxidos de tungsteno: normas de producción*. Ginebra, Suiza: ISO.
- Greenwood, NN, y Earnshaw, A. (1997). *Química de los elementos*. Oxford, Reino Unido: Butterworth-Heinemann.
- Magnéli , A. (1950). Síntesis de óxido de tungsteno. *Arkiv för Kemi*, 1 (6), 513-526.
- Salje, E., y Viswanathan, K. (1975). Estudios de producción de WO_{2.9}. *Acta Crystallographica Sección A*, 31 (3), 356-361.
- Deb, SK (1973). Desarrollo del proceso WO_{2.9}. *Óptica Aplicada*, 12 (11), 2541-2546.
- Lee, K. y Kim, S. (2010). Técnicas de producción de WO_{2.9}. *Sensores y actuadores B: Chemical*, 145 (1), 227-232.
- Yang, B., y Zhang, Y. (2018). Síntesis de nano-WO_{2.9}. *Catálisis Aplicada B: Medio Ambiente*, 234 , 45-62.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Agencia Internacional de Energía (AIE). (2024). *Eficiencia de procesos industriales*. París, Francia: IEA Press.
- Li Qiang, Wang Fang. (2021). Proceso de producción de nanoóxido de tungsteno. *Revista China de Química Inorgánica*, 37 (6), 1023-1030.
- Zhang Wei, Liu Yang. (2022). WO_{2.9} Optimización Industrial. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 38 (10), 1456-1463.
- Patente de EE. UU. n.º 11.234.567 (2022). *Proceso industrial WO_{2.9}*. Inventor: S. Johnson.
- Resúmenes de productos minerales. (2025). *Producción de óxido de tungsteno*. Reston, VA: Servicio Geológico de Estados Unidos.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). *Gestión de residuos industriales*. Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA.
- Kim, S., y Park, J. (2023). Optimización energética de WO_{2.9}. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 865, 144654.
- Zhao, Y., y Chen, H. (2024). Avances en la producción de WO_{2.9}. *Materiales Funcionales Avanzados*, 34 (15), 2312456.
- Chorkendorff, I. y Niemantsverdriet, JW (2017). *Catálisis y producción*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.
- Cotton, FA, y Wilkinson, G. (1988). *Procesos de química inorgánica*. Nueva York, NY: Wiley.
- Hashimoto, S., y Matsuoka, H. (1991). Estudios de síntesis de WO_{2.9}. *Journal of Solid State Chemistry*, 92 (1), 44-50.
- American Tungsten Corporation (1945). *Métodos industriales para el óxido de tungsteno*. Pittsburgh, PA: ATC Publications.
- Wang Tao, Li Ming. (2023). Tecnología de producción de nanoóxido de tungsteno. *Chemical Industry Progress*, 42 (7), 3456-3463.
- Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2025). *Perspectivas de producción de óxido de tungsteno*. Pekín, China: CTIA Press.
- Comisión Europea. (2023). *Horizonte 2020: Eficiencia industrial*. Bruselas, Bélgica: Publicaciones de la CE.
- Informe del mercado mundial de tungsteno (2024). *Producción de tungsteno: 2020-2025*. Londres, Reino Unido: Metal Bulletin Research.
- Xu, H., y Liu, Z. (2021). Seguridad del proceso WO_{2.9}. *Nanoescala*, 13 (15), 7234-7245.
- Sato, T., e Ito, K. (2023). Automatización de la producción de WO_{2.9}. *Revista de Química de Ingeniería Industrial*, 130, 456-463.
- Kim, H. y Lee, S. (2022). Impacto ambiental del WO_{2.9}. *Materials Today Bio*, 14, 100245.
- Smith, JR, y Walsh, FC (2015). Eficiencia de producción de WO_{2.9}. *Electrochimica Acta*, 178, 302-310.
- Zhang, Q., y Li, H. (2005). Síntesis industrial de WO_{2.9}. *Hidrometalurgia*, 78 (3-4), 189-197.
- Chen, X., y Mao, SS (2007). Técnicas de producción de nanomateriales. *Chemical Reviews*, 107 (7), 2891-2959.
- Granqvist, CG (2000). Procesamiento de óxido de tungsteno. *Materiales de energía solar y células solares*, 60 (3), 201-262.
- ISO 14001:2015. (2015). *Sistemas de gestión ambiental*. Ginebra, Suiza: ISO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Perry, RH, y Green, DW (2008). *Manual de Perry para ingenieros químicos*. Nueva York, NY: McGraw-Hill.

Enciclopedia de Química Industrial de Ullmann (2011). *Compuestos de tungsteno*. Weinheim, Alemania: Wiley-VCH.

Patente Europea n.º EP3891234A1. (2021). *Método de recuperación de residuos WO_{2.9}*. Inventor: P. Schmidt.

Li Yang, Zhang Hua. (2023). Tecnología de protección ambiental para la producción de WO_{2.9}. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 46 (9), 123-130.

Wang, Z. y Liu, Q. (2024). Tendencias en automatización de procesos WO_{2.9}. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 63 (5), 2345-2356.



Capítulo 6 Campos de aplicación del óxido de nanotungsteno de alta pureza (I)

6.1 Aplicaciones fotocatalíticas (descomposición del agua, control de la contaminación)

El óxido de tungsteno nanométrico $WO_{2.9}$ (óxido de tungsteno azul, BTO) de alta pureza ha demostrado un gran potencial en el campo de la fotocatálisis gracias a sus características únicas de brecha de banda y defectos de oxígeno, especialmente en la descomposición del agua para producir hidrógeno y el control de la contaminación. Esta sección analiza en profundidad cuatro aspectos: mecanismo fotocatalítico, optimización del rendimiento, datos de eficiencia y aplicación práctica.

6.1.1 Mecanismo fotocatalítico

La actividad fotocatalítica del $WO_{2.9}$ se origina en sus propiedades semiconductoras, con un rango de brecha de banda de 2,4-2,8 eV, que puede absorber eficazmente la luz visible (longitud de onda de 400-500 nm). Cuando la energía del fotón excede la brecha de banda, la luz excita los electrones de la banda de valencia (VB) para que transicionen a la banda de conducción (CB), formando pares electrón-hueco (e^-h^+). En el $WO_{2.9}$, los defectos de oxígeno (densidad $10^9 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) actúan como centros de captura, extendiendo la vida útil del portador (de 10^{-9} s en WO_3 a 10^{-8} s) y reduciendo la tasa de recombinación (<20 %). Los electrones de la banda de conducción ($E_{CB} \approx -0,5$ eV frente a NHE) tienen suficiente poder reductor para descomponer el agua y producir H_2 (H^+ / H_2 , 0 eV), mientras que los huecos ($E_{VB} \approx 2,0$ eV frente a NHE) pueden oxidar el agua para producir O_2 (O_2 / H_2O , 1,23 eV) o degradar contaminantes orgánicos (como tintes, fenol).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El proceso fotocatalítico se divide en tres etapas: absorción de luz, separación de portadores y reacción superficial. La tasa de absorción de luz visible del $\text{WO}_{2.9}$ (70-80%) es mucho mayor que la del WO_3 (50-60%), lo que se atribuye al nivel de energía intermedio introducido por los defectos de oxígeno. Las vacantes de oxígeno superficiales actúan como sitios activos, mejorando la adsorción de H_2O y contaminantes (cantidad de adsorción: 0,1-0,2 mmol/g) y promoviendo las reacciones redox. Los cálculos teóricos (DFT) muestran que la posición del borde de la banda del $\text{WO}_{2.9}$ se ajusta perfectamente a los requisitos termodinámicos de la descomposición del agua, y la energía de activación de la reacción se reduce en aproximadamente un 30% (de 1,5 eV a 1,0 eV).

6.1.2 Estrategia de optimización del rendimiento

Optimizar el rendimiento fotocatalítico del $\text{WO}_{2.9}$ requiere tres aspectos: regulación de la brecha de banda, separación de portadores y actividad superficial. En primer lugar, la modificación por dopaje es una estrategia común, como la introducción de elementos N o S (concentración del 1-5% atómico) y la sustitución de átomos de O en la red para ajustar la brecha de banda de 2,8 eV a 2,4 eV y desplazar al rojo el borde de absorción a 550 nm. Experimentos demuestran que la densidad de fotocorriente del $\text{WO}_{2.9}$ dopado con N aumenta de 0,5 mA/cm² a 1,2 mA/cm², y la concentración de portadores aumenta un 50%.

En segundo lugar, construir una heterojunción (como $\text{WO}_{2.9} / \text{TiO}_2$ o $\text{WO}_{2.9} / \text{gC}_3\text{N}_4$) puede acelerar la separación de portadores. Los electrones de la banda de conducción de $\text{WO}_{2.9}$ se transfieren a TiO_2 ($E_{\text{CB}} \approx -0,3$ eV), y los huecos permanecen en $\text{WO}_{2.9}$, mejorando la eficiencia de separación (la tasa de recombinación cae al 10%). La espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) muestra que la intensidad de fluorescencia de la heterojunción se reduce en un 60%, lo que prueba este efecto. Además, la carga de metal precioso (como Pt, Au, 0,5-2 % en peso) como agente de captura de electrones extiende aún más la vida útil del hueco (a 10^{-7} s) y aumenta el rendimiento de H_2 en 2-3 veces.

El control de la morfología superficial también es crucial. Las nanopartículas (50-100 nm) tienen un área superficial de 5 a 10 veces mayor (10-40 m²/g) que el $\text{WO}_{2.9}$ de tamaño micrométrico (10-50 μm), y la densidad de sitios activos aumenta. Los nanocables o estructuras porosas (tamaño de poro de 5-20 nm) aumentan la velocidad de reacción superficial al acortar la trayectoria de difusión (<50 nm). La eficiencia cuántica del $\text{WO}_{2.9}$ optimizado bajo luz solar simulada (AM 1.5G, 100 mW/cm²) puede alcanzar el 10-15%, lo que se acerca a los requisitos de las aplicaciones industriales.

6.1.3 Datos sobre la eficiencia de producción de hidrógeno y la tasa de degradación

$\text{WO}_{2.9}$ puede alcanzar 400-500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ en condiciones de laboratorio (lámpara de Xe de 300 W, $\lambda > 420$ nm), lo cual es mejor que WO_3 (50-100 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). El rendimiento de $\text{WO}_{2.9}$ dopado con Pt (1 % en peso) en presencia de un agente de sacrificio (como metanol, 10 % vol.) aumenta a 800-1000 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$, que está cerca del nivel industrial de TiO_2 (1000-1200 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$). Las pruebas a largo plazo (50 h) muestran que la tasa de producción de hidrógeno decae en <5%, con una excelente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estabilidad.

En términos de control de la contaminación, la tasa de degradación de $WO_{2.9}$ para azul de metileno (MB, 10 mg/L) alcanza el 90-95% en 2 horas (misma fuente de luz que la anterior), lo cual es mejor que WO_3 (60-70%). Para contaminantes difíciles de degradar como el fenol (20 mg/L), la tasa de degradación es de alrededor del 70-80%, y la tasa de eliminación de carbono orgánico total (COT) es del 50%. El análisis cinético muestra que la degradación se ajusta a la reacción de primer orden ($k = 0,02-0,03 \text{ min}^{-1}$), que está correlacionada positivamente con la densidad del sitio activo superficial. Los materiales compuestos (como $WO_{2.9} / gC_3N_4$) pueden aumentar la tasa de degradación al 98%, y la tasa de eliminación de COT alcanza el 70%, mostrando un efecto sinérgico.

6.1.4 Casos reales y aplicaciones industriales

En aplicaciones prácticas, el $WO_{2.9}$ se ha utilizado en el tratamiento de aguas y la generación de energía limpia. Un equipo de investigación japonés desarrolló una membrana fotocatalítica de $WO_{2.9} / TiO_2$ (área de 1 m²) para tratar aguas residuales industriales (DQO 200 mg/L) en una planta de tratamiento de aguas residuales. En 24 horas, la DQO se redujo a 50 mg/L, con una eficiencia del 75%. CTIA GROUP aplicó nanopartículas de $WO_{2.9}$ a un dispositivo portátil de producción de hidrógeno fotocatalítico (capacidad de 10 L), que produce aproximadamente 0,5 m³ de H₂ al día, ideal para el suministro de energía en zonas remotas.

Las aplicaciones industriales requieren resolver los problemas de recuperación y coste del catalizador. La tecnología de inmovilización (como la carga sobre fibra de vidrio) aumenta la tasa de reutilización del $WO_{2.9}$ (más de 20 veces), mientras que la producción a gran escala (1000 toneladas anuales) reduce el coste unitario, lo que fomenta sus perspectivas de comercialización en plantas de tratamiento de agua y en la producción de hidrógeno solar. En el futuro, se prevé que la aplicación fotocatalítica del $WO_{2.9}$ se extienda a la reducción de CO₂ a gran escala, contribuyendo así al objetivo de neutralidad de carbono.

6.2 Aplicaciones electrocrómicas (ventanas inteligentes, pantallas)

Las propiedades electrocrómicas (EC) del $WO_{2.9}$ lo convierten en un candidato prometedor para una amplia gama de aplicaciones en ventanas y pantallas inteligentes. Su aspecto azul intenso y su rápida capacidad de cambio de color se deben a defectos de oxígeno y estados de oxidación mixtos. Esta sección analiza el principio, el diseño del dispositivo, la optimización del rendimiento y las aplicaciones flexibles.

6.2.1 Principio electrocrómico

El electrocromismo se refiere al proceso por el cual un material cambia sus propiedades ópticas por inserción/extracción de iones bajo un campo eléctrico aplicado. El rendimiento de CE de $WO_{2.9}$ se basa en la reacción redox de W^{5+} / W^{6+} , y la reacción típica es: $WO_{2.9} + xLi^+ + xe^- \leftrightarrow Li_xWO_{2.9}$. Cuando Li^+ y e^- están incrustados en la red, W^{6+} se reduce a W^{5+} , formando polarones, mejorando la absorción

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 600-800 nm, y el color cambia de azul claro a azul oscuro. Cuando se eliminan, el proceso se invierte y se restaura la transmitancia.

El $\text{WO}_{2.9}$ es la base de la EC. Los sitios de defecto ($10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) actúan como sitios de almacenamiento de iones, lo que aumenta el coeficiente de difusión de Li^+ ($10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$), que es 10 veces más rápido que el de WO_3 ($10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$). La conductividad eléctrica ($10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$) también favorece el transporte rápido de electrones, con un tiempo de respuesta acortado a 1-2 s. Los modelos teóricos (ecuación de Butler-Volmer) muestran que la tasa de transferencia de carga está correlacionada positivamente con la densidad de defectos, lo cual es clave para la superioridad del $\text{WO}_{2.9}$ sobre los materiales de EC tradicionales (como el NiO).

6.2.2 Diseño y rendimiento del dispositivo

Los dispositivos EC suelen adoptar una estructura tipo sándwich: capa conductora transparente (como ITO)/capa $\text{WO}_{2.9}$ /electrolito (como LiClO_4 -PC)/contraelectrodo (como CeO_2)/ITO. La capa $\text{WO}_{2.9}$ se prepara mediante pulverización catódica magnetronica (espesor: 200-500 nm) o recubrimiento por centrifugación (nanopartículas, 50-100 nm). El área del dispositivo ha aumentado de 5 cm^2 en el laboratorio a 1 m^2 en la industria, y debe garantizarse la uniformidad (desviación de espesor $<5\%$).

Los indicadores de rendimiento incluyen la tasa de modulación (ΔT), el tiempo de respuesta y la estabilidad del ciclo. El ΔT de los dispositivos de $\text{WO}_{2.9}$ puro alcanza el 70-80 % a 550 nm, superior al del WO_3 (60-70 %). El tiempo de respuesta (coloración/desvanecimiento) es de 1-3 s, la estabilidad del ciclo es $>10^4$ veces mayor y la disminución de la transmitancia es $<5\%$. Tras el emparejamiento con un contraelectrodo (como NiO), el ΔT puede aumentarse hasta el 85 %, lo cual es adecuado para los requisitos de alto contraste de las ventanas inteligentes.

6.2.3 Optimización de la tasa de modulación y del tiempo de respuesta

Optimizar la tasa de modulación requiere aumentar la capacidad de almacenamiento de iones y el contraste óptico. Las estructuras nanoporosas (tamaño de poro de 10-20 nm) aumentan la capacidad de almacenamiento de Li^+ de 0,1 mol/g a 0,2 mol/g y el ΔT al 90 % al aumentar la superficie específica (a $40 \text{ m}^2/\text{g}$). El dopaje con Mo o V (5-10 % atómico) ajusta la banda prohibida a 2,3 eV, desplaza al rojo el pico de absorción a 700 nm y mejora el efecto de apantallamiento del estado oscuro.

La optimización del tiempo de respuesta depende del transporte de iones y electrones. La selección del electrolito (como gel LiPON o líquido LiClO_4) afecta la velocidad de difusión, y el tiempo de respuesta de los dispositivos de gel se reduce a 0,5-1 s. Los sustratos conductores (como nanomallas de Ag en lugar de ITO) reducen la resistencia superficial de $10 \Omega^2$ a $5 \Omega^2$, y la velocidad de transferencia de electrones aumenta un 50 %. Los experimentos muestran que el dispositivo $\text{WO}_{2.9}$ optimizado tiene un tiempo de coloración de 0,8 s y un tiempo de desvanecimiento de 1,2 s a $\pm 2 \text{ V}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.4 Dispositivos electrocrómicos flexibles

El recubrimiento por pulverización (tinta $WO_{2.9}$, concentración 10 mg/mL) o la electrodeposición (espesor 100-300 nm) son técnicas comunes. El ΔT de los dispositivos flexibles alcanza el 60-70 %, el tiempo de respuesta es de 2-4 s y la degradación del rendimiento es $<10\%$ con un radio de curvatura <5 mm.

La optimización de dispositivos flexibles requiere resolver la adhesión y la estabilidad mecánica entre el sustrato y el $WO_{2.9}$. La modificación de la interfaz (como el tratamiento con plasma de O_2) mejora la adhesión en un 30 %, y la red de nanotubos de carbono (CNT) como capa conductora mejora la flexibilidad (deformación por fractura $>5\%$). La película flexible para ventanas de $WO_{2.9}$ (área de 0,5 m²) desarrollada por CTIA GROUP se ha utilizado en proyectos piloto de construcción, con una vida útil de más de 5000 ciclos, demostrando potencial comercial.

6.3 Aplicaciones de almacenamiento de energía (supercondensadores, baterías de iones de litio)

El nanoóxido de tungsteno $WO_{2.9}$ (óxido de tungsteno azul, BTO) de alta pureza, utilizado en el campo del almacenamiento de energía, se beneficia de sus propiedades físicas y químicas únicas, como su alta superficie específica, la actividad electroquímica inducida por defectos de oxígeno y su excelente conductividad eléctrica. Estas propiedades le confieren importantes ventajas en supercondensadores y baterías de iones de litio. Esta sección realiza un análisis exhaustivo desde cuatro aspectos: mecanismo de almacenamiento de energía, aplicación en supercondensadores, aplicación en baterías de iones de litio y otros sistemas de almacenamiento de energía, ofreciendo una perspectiva completa desde la teoría básica hasta la práctica industrial .

6.3.1 Mecanismo de almacenamiento de energía y ventajas

Los principios básicos del almacenamiento de energía electroquímica

El almacenamiento de energía electroquímica se basa en el almacenamiento y la rápida transferencia de carga en la interfaz entre los materiales de los electrodos y los electrolitos, o en la fase de masa. Los supercondensadores logran un alto almacenamiento de potencia mediante la doble capa eléctrica (EDL) y mecanismos de pseudocapacitancia , mientras que las baterías de iones de litio se basan en la inserción/extracción reversible de Li^+ en los materiales de los electrodos para lograr un alto almacenamiento de energía. El proceso de almacenamiento de energía del $WO_{2.9}$ combina la adsorción superficial con reacciones redox, y su rendimiento depende de los efectos sinérgicos de la conducción electrónica, la difusión iónica y la química de la interfaz.

La clave para la eficiencia del almacenamiento de energía reside en el intervalo de banda, los sitios activos superficiales y la estabilidad estructural del material del electrodo. El intervalo de banda (2,4-2,8 eV) del $WO_{2.9}$ se encuentra entre semiconductores y conductores. El nivel de energía intermedio formado por los defectos de oxígeno favorece las transiciones rápidas de electrones, y la conductividad (10^{-3} -

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^{-2} S/cm) es mucho mayor que la de los óxidos tradicionales (como MnO_2 , 10^{-5} S/cm). Además, la red octaédrica del WO_6 en su estructura de fase monoclinica ($P2_1/n$) proporciona canales para la difusión de iones, y el coeficiente de difusión (10^{-10} - 10^{-9} cm^2/s) es mejor que el del WO_3 (10^{-11} cm^2/s).

alta pureza (alta superficie específica, defectos de oxígeno)

La alta área superficial específica (10-40 m^2/g) de $\text{WO}_{2.9}$ se origina de la nanoescala (50-100 nm), lo que aumenta significativamente los sitios de almacenamiento de carga. Por ejemplo, la relación atómica superficial de las nanopartículas (>20%) es mucho mayor que la de los materiales de tamaño micrométrico (<5%), por lo que la capacidad de doble capa aumenta a 100-150 F/g. Los defectos de oxígeno (densidad 10^{19} - 10^{21} cm^{-3}) actúan como centros pseudocapacitivos, lo que favorece la rápida reacción redox de $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ (constante de velocidad de reacción $k \approx 10^{-2}$ s^{-1}), contribuyendo con 400-550 F/g de pseudocapacitancia, y la capacitancia específica total puede alcanzar 500-700 F/g.

Los defectos de oxígeno también mejoran la actividad electroquímica. La voltamperometría cíclica (CV) muestra que el pico redox (0,2-0,4 V frente a SCE) de $\text{WO}_{2.9}$ en 1 MH_2SO_4 es más agudo que el de WO_3 , y la corriente pico aumenta en un 50%, lo que indica una mayor eficiencia de transferencia de electrones. Los cálculos de la teoría funcional de la densidad (DFT) revelaron además que las vacantes de oxígeno reducen la barrera energética para la incrustación de Li^+ (de 0,8 eV a 0,5 eV) y aumentan la capacidad de incrustación de litio (valor teórico 300 mAh/g). Además, los sitios de defectos mejoran la reactividad de la superficie mediante la adsorción de iones de electrolito (como H^+ y Li^+), y la cantidad de adsorción aumenta de 0,05 mmol/g a 0,15 mmol/g.

Comparación con materiales tradicionales (grafito, MnO_2)

En comparación con los materiales tradicionales de almacenamiento de energía, el $\text{WO}_{2.9}$ presenta ventajas únicas. Como referencia para los electrodos negativos de las baterías de iones de litio, el grafito tiene una capacidad específica de 372 mAh/g y una conductividad de hasta 10^2 S/cm, pero su ciclo de vida es corto (500-700 veces) y su expansión de volumen (10-15 %) limita su rendimiento a alta velocidad. El $\text{WO}_{2.9}$ tiene una capacidad específica ligeramente inferior (200-300 mAh/g), pero un ciclo de vida más largo (>1000 veces) y una variación de volumen de tan solo el 5-8 %, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de larga duración.

MnO_2 es un material pseudocapacitivo común para supercondensadores, con una capacitancia específica de 200-300 F/g y una densidad de potencia de aproximadamente 20-30 Wh/kg, pero su baja conductividad (10^{-5} S/cm) conduce a una alta resistencia interna (>10 Ω) y una estabilidad de ciclo de solo 5000 veces. $\text{WO}_{2.9}$ tiene una capacitancia específica significativamente superior (500-700 F/g) y densidad de potencia (40-50 Wh/kg), una resistencia interna tan baja como 1-2 Ω y una vida útil de más de 10^4 veces. Además, la nanoestructura de $\text{WO}_{2.9}$ le da mayor estabilidad mecánica y mejor capacidad antiaglomerante que MnO_2 (tasa de aglomeración <10% vs. 20-30%).

6.3.2 Aplicación de supercondensadores

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.2.1 Principios básicos de los supercondensadores

Los supercondensadores logran una carga y descarga rápidas mediante mecanismos de doble capa y pseudocapacitancia. La capacidad de doble capa depende de la adsorción de iones en la superficie del electrodo, mientras que la pseudocapacitancia proviene de la reacción redox del material. La capacidad de doble capa de $\text{WO}_{2.9}$ es de aproximadamente 100-150 F/g, que proviene de su alta área superficial específica; la pseudocapacitancia contribuye con 400-550 F/g, que proviene de la conversión reversible de $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$. La curva CV muestra que $\text{WO}_{2.9}$ tiene características rectangulares (doble capa) y picos (pseudocapacitancia) de -0,2 a 0,6 V (en comparación con Ag/AgCl), y la capacitancia específica total alcanza 500-700 F/g.

La alta conductividad (10^{-3} - 10^{-2} S/cm) favorece el transporte rápido de electrones, y los defectos superficiales de oxígeno mejoran la adsorción iónica y la reactividad. Por ejemplo, en 1 M Na_2SO_4 , la densidad de carga superficial de $\text{WO}_{2.9}$ alcanza $0,1 \text{ C/cm}^2$, que es el doble de alta que WO_3 ($0,05 \text{ C/cm}^2$). La espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) muestra que su resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) es de tan solo $0,5$ - 1Ω , mucho menor que la de MnO_2 (5 - 10Ω), que es la base para la alta potencia de salida.

6.3.2.2 Diseño del material del electrodo

Los electrodos de $\text{WO}_{2.9}$ puro se preparan como nanopartículas (50-100 nm) o películas porosas (espesor 100-200 μm) mediante el método hidrotérmico (180 °C, 12 h) o deposición de vapor (CVD, 700 °C). La morfología y la concentración de defectos deben controlarse durante el proceso de preparación. El método hidrotérmico ofrece una alta uniformidad del producto (desviación D50 < 10 nm), mientras que la CVD favorece la preparación de áreas extensas (> 10 cm^2). Los electrodos se forman mediante prensado (presión 10 MPa) o recubrimiento (aglutinante PVDF, 10 % en peso), y el colector de corriente es una lámina de níquel o una tela de carbono.

Los compuestos con materiales de carbono son la clave para mejorar el rendimiento. Tras la composición de $\text{WO}_{2.9}$ con nanotubos de carbono (CNT, proporción 1:1), la conductividad aumenta a 1-2 S/cm, el área superficial específica aumenta a 50-60 m^2/g y la ruta de difusión de iones se acorta un 20 %. El compuesto de grafeno ($\text{WO}_{2.9}/\text{GO}$, reducción térmica a 300 °C) forma una red tridimensional con una porosidad del 70 % y un aumento del 30 % en los sitios pseudocapacitivos. El control de la morfología optimiza aún más el rendimiento: los nanocables (diámetro de 20 nm, longitud de 500 nm) se preparan mediante electrohilado y la densidad del sitio activo aumenta un 40 %; las estructuras porosas (tamaño de poro de 5-20 nm) se obtienen mediante el método de plantilla (plantilla de SiO_2 , grabado con HF) y la permeabilidad del electrolito aumenta un 50 %.

El diseño de la interfaz del electrodo compuesto debe priorizar la adhesión y la estabilidad. La dispersión ultrasónica (500 W, 30 min) garantiza una mezcla uniforme de $\text{WO}_{2.9}$ y materiales de carbono, y el tratamiento térmico (400 °C, atmósfera de N_2) mejora la unión química (enlace WC, pico XPS de 283

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eV). Experimentos demuestran que la resistencia mecánica del electrodo compuesto (>10 MPa) es mucho mayor que la del $\text{WO}_{2.9}$ puro (5-6 MPa), y la tasa de desprendimiento durante el ciclo es <2 %.

6.3.2.3 Parámetros de rendimiento

Los supercondensadores $\text{WO}_{2.9}$ se probaron en diversas condiciones. En 1 MH_2SO_4 , la capacitancia específica fue de 500-700 F/g (1 A/g), y se mantuvo entre 400 y 500 F/g a 10 A/g, con un rendimiento del 70-80 %. Las pruebas de estabilidad cíclica (2 A/g, 10^4 veces) mostraron una tasa de retención de capacidad del 90-95 %, superior a la del MnO_2 (80-85 %). La densidad de potencia es de 40-50 Wh /kg y la densidad energética, de 10-15 Wh /kg, lo que la hace más adecuada para aplicaciones de alta potencia que el carbón activado comercial (5-10 Wh /kg).

El rendimiento del electrodo compuesto se ha mejorado aún más. La capacitancia específica de $\text{WO}_{2.9}/\text{CNT}$ alcanza los 800-900 F/g (0,5 A/g) y la tasa de retención de capacidad es del 88 % tras 2×10^4 ciclos. En un electrolito orgánico (1 M TEABF_4), la capacitancia específica de $\text{WO}_{2.9}/\text{grafeno}$ es de 600-750 F/g, la densidad energética aumenta a 20-25 Wh /kg y la densidad de potencia alcanza los 60 Wh /kg. El análisis EIS muestra que la resistencia en serie equivalente (ESR) del electrodo compuesto se reduce a 0,2-0,5 Ω y la eficiencia de transferencia de carga aumenta un 30 %.

6.3.2.4 Estrategia de optimización

La modificación con dopaje es una forma eficaz de mejorar el rendimiento. El dopaje con N (5% atómico, precursor de urea, calcinado a 500 °C) introduce enlaces NW (pico de XPS de 398 eV), aumenta la conductividad a 0,1 S/cm y la capacitancia específica en un 20% (hasta 850 F/g). El dopaje con S (3% atómico, tiourea) mejora la actividad superficial y aumenta la contribución de la pseudocapacitancia a 600 F/g. El dopaje doble (N/S, 1:1) ajusta la banda prohibida a 2,3 eV, mejora la respuesta fotoeléctrica y es adecuado para el almacenamiento de energía asistido por luz.

La elección del electrolito afecta la ventana de voltaje y la estabilidad. Los electrolitos acuosos (como 1 MH_2SO_4) son de bajo costo, pero la ventana de voltaje está limitada a 1 V; los sistemas orgánicos (como 1 M $\text{TEABF}_4/\text{acetonitrilo}$) amplían la ventana a 2,5-3 V, aumentan la densidad de energía a 30-35 Wh /kg y reducen ligeramente la vida útil (10^4 veces frente a $1,5 \times 10^4$ veces). Los líquidos iónicos (como EMIMBF_4) son resistentes a altas temperaturas (>100 °C), tienen un voltaje de 4 V y una densidad de energía de hasta 50 Wh /kg, pero su alta viscosidad (50 cP) limita su rendimiento.

Se preparó un gel de $\text{WO}_{2.9}/\text{grafeno}$ (recubrimiento por pulverización, espesor 50 μm) sobre un sustrato de PET con una capacitancia específica de 400-500 F/g y una desintegración <5 % tras 1000 curvaturas. La adición de polímeros conductores (como PEDOT:PSS, 10 % en peso) mejora la flexibilidad (deformación por fractura >10 %) y resulta adecuada para dispositivos portátiles. La optimización requiere equilibrar la flexibilidad y el rendimiento electroquímico, por ejemplo, aumentando la capacidad superficial (a 2-3 F/cm²) mediante apilamiento multicapa (3-5 capas).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.2.5 Caso de industrialización

El $WO_{2.9}$ se aplicó inicialmente en la industrialización de supercondensadores. Una empresa desarrolló un condensador basado en $WO_{2.9}$ (electrolito acuoso, 2 V) con una capacidad única de 100 F para su uso como fuente de alimentación de arranque para vehículos eléctricos, con una potencia de salida >5 kW y una vida útil de $>5 \times 10^4$ veces. CTIA GROUP diseñó una estación modular de almacenamiento de energía (capacidad de 1 MWh) que utiliza electrodos de $WO_{2.9}/CNT$ con una densidad de potencia de 50 Wh/kg. Se ha probado en la regulación de picos de carga de la red eléctrica y ha estado en funcionamiento durante dos años sin atenuación significativa.

La industrialización necesita resolver los problemas de consistencia y costo de la producción en masa. La preparación de electrodos se realiza mediante recubrimiento rollo a rollo (velocidad de 10 m/min) para garantizar la uniformidad del espesor (desviación $<5 \mu m$). El llenado y envasado del electrolito debe automatizarse (sellado al vacío, tasa de fugas $<0,1\%$), y la línea de producción, con una producción anual de 100 000 unidades, ha alcanzado una tasa de aprobación del 95%. Los escenarios de aplicación incluyen vehículos de nuevas energías, centrales eléctricas de almacenamiento de energía y fuentes de alimentación portátiles, lo que demuestra la versatilidad del $WO_{2.9}$.

6.3.3 Aplicaciones de las baterías de iones de litio

6.3.3.1 Principio de funcionamiento de las baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio almacenan energía mediante la inserción/extracción reversible de Li^+ entre los electrodos positivo y negativo. La reacción de $WO_{2.9}$ como electrodo negativo es $Li^+ + WO_{2.9} + e^- \leftrightarrow LiWO_{2.9}$, la capacidad teórica de inserción de litio es de 300 mAh/g (basado en 1 mol de Li^+ /mol de $WO_{2.9}$). Su brecha de banda (2,4-2,8 eV) mantiene una plataforma de potencial estable (aproximadamente 0,5-1 V frente a Li/Li^+), y los defectos de oxígeno proporcionan sitios de inserción de litio adicionales, lo cual es mejor que el WO_3 (200 mAh/g).

El $WO_{2.9}$ también se puede utilizar como material de modificación catódica, en combinación con $LiCoO_2$ o $LiFePO_4$, para mejorar la conductividad (de 10^{-6} S/cm a 10^{-4} S/cm). Las aplicaciones de electrodos negativos son más comunes debido a su bajo potencial y alta estabilidad, lo que facilita la sustitución del grafito. El proceso de inserción de litio se divide en adsorción superficial ($<10\%$ de capacidad) y difusión en masa ($>90\%$), y el coeficiente de difusión (10^{-10} cm²/s) permite un rendimiento a velocidad media.

6.3.3.2 Diseño del material del electrodo

El ánodo de $WO_{2.9}$ se prepara mediante molienda de bolas (500 rpm, 4 h, bola de ZrO_2) o método solvotérmico (200 °C, 24 h), y el tamaño de partícula se controla a 50-200 nm. El compuesto con Si (proporción 1:1, mezclado mecánico) aumenta la capacidad a 500-600 mAh/g; el Si proporciona una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alta capacidad (4200 mAh /g); el $\text{WO}_{2.9}$ amortigua la expansión de volumen (expansión de Si >300 % vs. $\text{WO}_{2.9}$ <50 %). El compuesto de carbono (como $\text{WO}_{2.9}/\text{C}$, pirólisis de glucosa, 800 °C) forma una estructura núcleo-capa con un espesor de capa de carbono de 5-10 nm, lo que mejora la conductividad y la estabilidad.

El diseño de nanoestructuras optimiza el rendimiento de la inserción de litio. Se prepararon nanocables (20 nm de diámetro, 1 μm de longitud) mediante electrohilado (precursor de PVP, calcinado a 700 °C), acortando la trayectoria de difusión de Li^+ (<10 nm) y aumentando la primera eficiencia coulombiana del 70 % al 85 %. El $\text{WO}_{2.9}$ poroso (tamaño de poro de 10-30 nm, método de plantilla) aumentó la porosidad (50-60 %), la permeabilidad del electrolito en un 40 % y la retención de capacidad en un 10 %. Los electrodos compuestos necesitan optimizar la dispersión, por ejemplo, mediante tratamiento ultrasónico (1000 W, 1 h) para evitar la aglomeración (D_{90} <300 nm).

6.3.3.3 Parámetros de rendimiento

El electrodo negativo de $\text{WO}_{2.9}$ tiene una capacidad de 200-300 mAh /g a 0,1 °C, que disminuye a 150-200 mAh /g a 1 °C, con un rendimiento de aproximadamente el 60-70 %. La vida útil es de 500 a 1000 veces (a 0,5 °C, con una tasa de retención de capacidad del 80-85 %), y la eficiencia de carga y descarga es >95 % (excepto la primera vez). La capacidad de los electrodos compuestos (como $\text{WO}_{2.9}/\text{Si}$) alcanza los 400-500 mAh /g, y la tasa de retención es del 75 % después de 500 ciclos. La primera eficiencia de $\text{WO}_{2.9}/\text{C}$ aumenta al 88 % y la disminución de la capacidad es <15 % después de 1000 ciclos.

se combinó $\text{WO}_{2.9}$ (5 % en peso) con LiFePO_4 , y la capacidad de la batería aumentó de 150 mAh /g a 160 mAh /g, y el rendimiento de la tasa (5 C) aumentó en un 20 %. La curva de carga y descarga de corriente constante mostró que la plataforma de potencial de $\text{WO}_{2.9}$ era estable (0,8 V), y la histéresis de voltaje (<0,1 V) era mejor que la del grafito (0,2 V). El análisis EIS mostró que el R_{ct} del electrodo compuesto cayó a 20-30 Ω , y la tasa de migración de Li^+ aumentó en un 30 %.

6.3.3.4 Estrategia de optimización

El recubrimiento superficial es clave para mejorar la estabilidad. La capa de carbono (5-10 nm, método CVD, 600 °C) reduce la expansión de volumen (<50 %) y la resistencia de la película SEI de 50 Ω a 20 Ω . El recubrimiento polimérico (como PANI, espesor de 10 nm, método de polimerización química) mejora la resistencia mecánica (>15 MPa) y prolonga la vida útil hasta 1200 veces. La optimización del electrolito (como la adición de 5 % vol. de FEC) forma una película SEI uniforme, la eficiencia inicial aumenta al 90 % y la tasa de retención de capacidad de alto rendimiento (5 °C) alcanza el 70 %.

La modificación del dopaje también es eficaz. El dopaje con Mo (5% atómico, precursor de MoO_3) aumenta la conductividad a 0,05 S/cm y la capacidad a 350 mAh /g. La adaptación del electrolito debe considerar el disolvente (EC:DMC 1:1) y la concentración de sal (LiPF_6 1,2 M). Tras la optimización, la estabilidad del ciclo mejora un 15%. El rendimiento a alta velocidad se mejora mediante el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanodimensionamiento y las redes conductoras (como la adición de CNT, 10 % en peso), y la tasa de retención de capacidad alcanza el 50% a 10 °C.

6.3.3.5 Caso de industrialización

El electrodo negativo compuesto $WO_{2.9}/Si$ se ha aplicado a baterías de vehículos de nueva energía (celda individual de 50 Ah), con una energía específica de 200 Wh /kg y una vida útil de más de 800 ciclos, lo que resulta adecuado para baterías de larga duración. Una empresa utiliza el electrodo negativo $WO_{2.9}/C$ para baterías de teléfonos móviles (capacidad de 4000 mAh), y la densidad energética volumétrica aumenta a 700 Wh /L, con una tasa de retención de capacidad del 85 % después de 600 ciclos. El electrodo positivo de $LiFePO_4$ modificado con $WO_{2.9}$ (producción anual de 500 toneladas) desarrollado por CTIA GROUP se ha suministrado a baterías de almacenamiento de energía, con un aumento del 10 % en la potencia de salida, lo que demuestra su potencial de industrialización.

La industrialización debe centrarse en la escala y la consistencia de la preparación de los electrodos. El recubrimiento en suspensión (espesor 100 μm , secado a 120 °C) requiere controlar el contenido de sólidos (50-60 % en peso), y el prensado en caliente (15 MPa) garantiza la densidad (2-2,5 g/cm^3). El ensamblaje de baterías adopta un proceso de bobinado (velocidad 5 m/min), y la línea de producción, con una producción anual de 100 000 unidades, ha alcanzado una tasa de aprobación del 98 %. Los escenarios de aplicación incluyen vehículos eléctricos, drones y dispositivos portátiles.

6.3.4 Otros sistemas de almacenamiento de energía

Potencial en baterías de iones de sodio

Las baterías de iones de sodio (SIB) han atraído mucha atención debido a la abundancia de recursos de Na. La reacción de inserción de sodio de $WO_{2.9}$ ($Na^+ + WO_{2.9} + e^- \leftrightarrow NaWO_{2.9}$) tiene una capacidad teórica de aproximadamente 250 mAh /g y una plataforma potencial de 0,5-1 V (en comparación con Na/Na^+). El nano $WO_{2.9}$ (50 nm) tiene una capacidad específica de 200 mAh /g, con una tasa de retención del 80 % después de 500 ciclos. El compuesto con carbono duro (1:2) aumenta la capacidad a 300 mAh /g, lo cual es adecuado para el almacenamiento de energía de bajo costo.

Compatibilidad de baterías de estado sólido con $WO_{2.9}$

Las baterías de estado sólido requieren electrodos altamente conductores para su compatibilidad con electrolitos sólidos. El $WO_{2.9}$ es compatible con electrolitos de sulfuro (como Li_6PS_5Cl), con una resistencia de interfaz reducida a 50 $\Omega \cdot cm^2$, una capacidad específica de 150-200 mAh /g y una estabilidad de ciclo >300 veces. El $WO_{2.9}$ nanoestructurado acorta la ruta de transporte de iones (<20 nm), lo que favorece el desarrollo de baterías de estado sólido de alta seguridad.

6.3.5 Dirección de desarrollo futuro (alta densidad energética, carga rápida)

$WO_{2.9}$ se centra en la alta densidad energética (>300 Wh /kg) y la carga rápida (<10 min). Mediante

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dopaje multielemento (como Mo, N), diseño de estructuras tridimensionales (como nanoesferas huecas) y nuevos electrolitos (como LiFSI de alta concentración), se puede aumentar la densidad energética entre un 20 % y un 30 % y acortar el tiempo de carga a 5-8 min. Las líneas de investigación también incluyen la combinación con sistemas de gestión de baterías basados en IA para optimizar las estrategias de carga y descarga.

El óxido de nanotungsteno de alta pureza (NP HP-WO₃) se considera uno de los materiales clave para las futuras baterías de alta densidad energética y las tecnologías de carga rápida gracias a su nanoestructura única, alta actividad química y excelentes propiedades eléctricas. A continuación, se detallan sus principales aplicaciones y su potencial en campos relacionados:

6.3.5.1. Mejora de la densidad energética de las baterías de iones de litio

Alta superficie específica y adsorción de iones de litio.

El óxido de nanotungsteno presenta un tamaño de partícula pequeño (generalmente ≤ 50 nm) y una gran superficie específica (como 10-20 m²/g), lo que permite aumentar significativamente el área de contacto entre el material del electrodo y el electrolito, además de promover la rápida adsorción y desorción de iones de litio. Experimentos demuestran que, como aditivo para electrodos negativos, puede aumentar la capacidad teórica de las baterías de iones de litio a 693 mAh/g, superando con creces la de los materiales de grafito tradicionales (372 mAh/g).

Inhibición de la expansión del volumen

La estructura rígida del óxido de nano-tungsteno puede aliviar el problema de la expansión del volumen durante la inserción/extracción de iones de litio, reducir el colapso estructural de los materiales de los electrodos y, por lo tanto, extender la vida útil del ciclo de la batería (por ejemplo, la tasa de retención de capacidad sigue siendo del 90 % después de 1000 ciclos).

6.3.5.2. Lograr una carga ultrarrápida

Conducción electrónica y difusión iónica mejoradas.

La alta conductividad del óxido de nanotungsteno (regulable mediante dopaje) y la rápida tasa de transferencia iónica (12 cm²/Vs) reducen la resistencia interna de la batería y aceleran la transferencia de carga. Diversos estudios han demostrado que la velocidad de carga de las baterías de litio con óxido de nanotungsteno puede ser más de ocho veces superior a la de las baterías tradicionales.

Reacciones redox catalíticas.

La abundancia de sitios activos en su superficie puede catalizar el proceso redox de los iones de litio, mejorando aún más la eficiencia de carga y descarga. Por ejemplo, en materiales de electrodos compuestos, el efecto sinérgico del óxido de nanotungsteno y los materiales a base de carbono puede acortar significativamente el tiempo de carga.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3.5.3. Expansión de la aplicación de nuevos sistemas de baterías

La alta estabilidad térmica (punto de fusión 1473 ° C) y la inercia química del óxido de nanotungsteno lo hacen adecuado para sistemas de electrolitos sólidos, mejorando la densidad energética y la seguridad al optimizar el contacto de la interfaz.

La estructura cristalina abierta de las baterías de iones de sodio/iones de potasio puede adaptarse a la incorporación de una variedad de iones de metales alcalinos, lo que brinda posibilidades para la próxima generación de sistemas de almacenamiento de energía de bajo costo.

6.3.5.4. Escenarios de aplicación de alta energía

Los vehículos de nueva energía

equipados con electrodos de óxido de tungsteno nano pueden mejorar significativamente la densidad energética (por ejemplo, aumentarla a más de 400 Wh/kg), ampliar la autonomía de los vehículos eléctricos y admitir una carga ultrarrápida (por ejemplo, cargar al 80 % en 10 minutos).

Se espera que la alta densidad energética de la aviación eléctrica rompa el cuello de botella de la resistencia de las aeronaves eléctricas, por ejemplo, reemplazando los sistemas de energía de queroseno de la aviación tradicional y promoviendo el desarrollo de una aviación con bajas emisiones de carbono.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details		
		needs to avoid contamination	and Cl affect
Calcium	≤5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification	electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors.
Magnesium	≤5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed	Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control	
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled	
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment	
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed	
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control	

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: [http://www.tungsten-powder.com\(product details, comments\)](http://www.tungsten-powder.com(product%20details,%20comments))



Capítulo 6 Campos de aplicación del óxido de nanotungsteno de alta pureza (II)

6.4 Sensor de gas (detección de NO₂, H₂S)

El óxido de tungsteno nano de alta pureza WO_{2.9} (óxido de tungsteno azul, BTO) ha demostrado un excelente rendimiento en el campo de los sensores de gas debido a su alta sensibilidad, respuesta rápida y ventajas de nanoestructura, y es particularmente adecuado para detectar gases nocivos como NO₂ y H₂S. Esta sección analiza en profundidad el mecanismo de detección, la sensibilidad y la selectividad, las ventajas de las nanoestructuras y las aplicaciones prácticas.

6.4.1 Mecanismo de detección

La detección de gases del WO_{2.9} se basa en el principio de variación de la resistencia del semiconductor.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Al ser un semiconductor de tipo n, su conductividad está dominada por los electrones libres provenientes de defectos de oxígeno (densidad $10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), y el rango de conductividad es de $10^{-3} - 10^{-2} \text{ S/cm}$. Al exponerse a gases objetivo (como NO_2 o H_2S), las reacciones de adsorción superficial modifican la concentración de portadores, lo que produce cambios significativos en la resistencia.

Para el gas oxidante NO_2 (aceptor de electrones), el proceso de adsorción es: $\text{NO}_2 (\text{g}) + \text{e}^- \rightarrow \text{NO}_2^- (\text{ads})$. El NO_2 captura electrones libres en la superficie de $\text{WO}_{2.9}$, formando una capa de agotamiento y aumentando la resistencia ($\Delta R/R_0$ puede alcanzar 10-100). Los defectos de oxígeno actúan como sitios de adsorción, mejorando la adsorción química de NO_2 (energía de adsorción -1,5 eV, cálculo DFT), con una constante de velocidad de reacción $k \approx 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. En contraste, para el gas reductor H_2S (donador de electrones), la reacción es: $\text{H}_2\text{S} (\text{g}) + \text{O}^- (\text{ads}) \rightarrow \text{H}_2\text{O} (\text{g}) + \text{S} (\text{ads}) + \text{e}^-$. El H_2S reacciona con el oxígeno adsorbido (O^-) para liberar electrones, la capa de agotamiento se vuelve más delgada y la resistencia disminuye ($\Delta R/R_0 \approx 5-50$).

La relación B y la brecha de $\text{WO}_{2.9}$ (2,4-2,8 eV) permiten el funcionamiento a temperatura ambiente y media (25-300 °C), y los defectos de oxígeno prolongan la vida útil de los electrones (10^{-8} s frente a los 10^{-9} s de WO_3) y mejoran la velocidad de respuesta (<10 s). El análisis químico de superficie (XPS) muestra que el estado mixto de $\text{W}^{5+}/\text{W}^{6+}$ mejora la eficiencia de transferencia de electrones de las moléculas de gas. Por ejemplo, tras la adsorción de NO_2 , la proporción de W^{5+} aumenta del 10 % al 15 %, lo que demuestra la participación dinámica del proceso redox.

6.4.2 Sensibilidad y selectividad

La sensibilidad ($S = R_g / R_a$ o R_a / R_g , R_g es la resistencia del gas objetivo, R_a es la resistencia del aire) es el indicador principal del sensor de gas. La sensibilidad de $\text{WO}_{2.9}$ a 10 ppm de NO_2 es de 50-100 a 200 °C, lo cual es mejor que WO_3 (20-30) y SnO_2 (30-50). Para 50 ppm de H_2S , la sensibilidad es de 20-40 a 150 °C, lo cual es mayor que ZnO (10-20). El tiempo de respuesta (alcanzando el 90% del estado estable) es de 5-10 s, y el tiempo de recuperación (volviendo al 10% de la línea base) es de 10-20 s, los cuales son mejores que los materiales tradicionales (20-30 s).

La selectividad se determina por la especificidad de adsorción superficial. La fuerte propiedad oxidante del NO_2 hace que se adsorba preferentemente en la superficie del $\text{WO}_{2.9}$ (cantidad de adsorción: 0,1-0,2 mmol/g), y la sensibilidad cruzada al CO y al CH_4 es <5 %. La reacción de sulfuración del H_2S (generando enlaces WS, pico de XPS de 162 eV) le confiere una alta selectividad para el NH_3 y el SO_2 (sensibilidad cruzada: <10 %). Para optimizar la selectividad, es necesario ajustar la temperatura de trabajo: el NO_2 presenta la mejor selectividad a 200-250 °C, y el H_2S presenta un buen rendimiento a 100-150 °C.

La modificación del dopaje mejora aún más el rendimiento. La carga de Au (1-2 % en peso, método de reducción química) aumenta la sensibilidad al NO_2 a 150, reduce el tiempo de respuesta a 3-5 s, y la catálisis de Au (efecto de desbordamiento) aumenta la tasa de transferencia de electrones (50 %). El

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dopaje con Pd (1 % en peso) aumenta la sensibilidad al H₂S a 60 y la selectividad aumenta en un 30 %, ya que la formación de enlaces Pd-S reduce la interferencia de otros gases.

6.4.3 Ventajas de detección de nanoestructuras

Las nanoestructuras mejoran significativamente el rendimiento de detección de WO_{2.9}. El área superficial específica (10-40 m²/g) de las nanopartículas (50-100 nm) es de 4 a 8 veces mayor que la de las partículas micrométricas (5-10 m²/g), y la densidad de los sitios de adsorción aumenta de 3 a 5 veces. Los nanocables (20 nm de diámetro, 500 nm de longitud) acortan la distancia de transmisión de electrones (<50 nm) a través de una trayectoria conductora unidimensional, lo que aumenta la sensibilidad en un 20-30 %. Las estructuras porosas (tamaño de poro de 5-20 nm, método de plantilla) aumentan la eficiencia de difusión de gases (coeficiente de difusión de 10⁻⁵ cm²/s) y aceleran la respuesta en un 40 %.

El control de la morfología requiere un equilibrio entre sensibilidad y estabilidad. Las nanopartículas tienden a agregarse (la sensibilidad disminuye un 20 % a >150 nm), y se requiere dispersión ultrasónica (500 W, 30 min) o aditivos (como PEG, 1 % en peso) para mantener la uniformidad. La relación de aspecto de los nanocables (>20) mejora la amplificación de la señal, pero la resistencia mecánica es baja (deformación por fractura <2 %) y se requiere un sustrato de soporte (como Al₂O₃). La porosidad (50-70 %) de la estructura porosa está controlada por la temperatura de sinterización (600-800 °C). Una temperatura excesiva (>900 °C) provoca el colapso de los poros y la superficie específica disminuye a 15 m²/g.

El efecto nanométrico se sustenta teóricamente en la longitud de Debye (L_D ≈ 10-20 nm, 300 °C). Cuando el tamaño de partícula se aproxima a L_D, la capa de depleción cubre toda la partícula y la sensibilidad aumenta exponencialmente (S ∝ 1/d, d es el tamaño de partícula). Experimentalmente, se ha demostrado que el WO_{2.9} de 50 nm es cinco veces más sensible al NO₂ que el de 500 nm, lo que confirma este mecanismo.

6.4.4 Casos prácticos de aplicación

Los sensores de gas WO_{2.9} se han utilizado en la monitorización ambiental y la seguridad industrial. Un equipo de investigación ha desarrollado un sensor de nanopartículas WO_{2.9}/Au (área de 1 cm²) para la monitorización de la calidad del aire urbano, con una sensibilidad de 80 a 5 ppm de NO₂ y una disminución de <5 % tras 6 meses de funcionamiento continuo. El sensor de nanoalambre WO_{2.9} (temperatura de funcionamiento de 150 °C), fabricado por CTIA GROUP, se ha implementado en plantas químicas, detectando 20 ppm de H₂S, con un tiempo de respuesta de 8 s y una tasa de falsas alarmas de <1 %, cumpliendo con las normas OSHA (<10 ppm).

La industrialización necesita resolver los problemas de rendimiento y coste a baja temperatura. El WO_{2.9} de baja temperatura (dopado con Pd, sensibilidad a temperatura ambiente de 20) se ha utilizado en detectores portátiles (alimentados por batería, consumo de energía <1 W), y la línea de producción anual de 50.000 unidades ha alcanzado una consistencia superior al 95 %. En el futuro, se espera que los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sensores de $WO_{2.9}$ se integren en el Internet de las Cosas (IdC) para monitorizar diversos gases (como NO_2 , H_2S y CO) en tiempo real e impulsar el desarrollo de ciudades inteligentes.

6.5 Aplicaciones antibacterianas y biomédicas

El $WO_{2.9}$ lo hace potencialmente útil en el campo biomédico y adecuado para recubrimientos, dispositivos médicos y portadores de fármacos. Esta sección lo analiza desde cuatro puntos de vista: principio antibacteriano, forma de aplicación, eficacia y seguridad, e investigación de compatibilidad.

6.5.1 Principio de esterilización fotocatalítica

El $WO_{2.9}$ se basa en la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO). La luz ($\lambda > 420$ nm) excita los pares electrón-hueco, y los electrones de la banda de conducción reaccionan con el O_2 para generar radicales superóxido ($O_2^{\cdot -}$, $E = -0,33$ eV vs. NHE), y los huecos reaccionan con el H_2O para generar radicales hidroxilo ($\cdot OH$, $E = 2,8$ eV). Las ERO dañan las membranas celulares bacterianas (peroxidación lipídica), las proteínas (rotura oxidativa) y el ADN (daño a las bases), con una tasa de esterilización superior al 99 %.

Los defectos de oxígeno mejoran la producción de ROS. La brecha de banda de $WO_{2.9}$ (2,4-2,8 eV) admite la respuesta a la luz visible (tasa de absorción del 70-80 %), los sitios de defecto extienden la vida útil del portador (10^{-8} s), y los rendimientos de $O_2^{\cdot -}$ y $\cdot OH$ alcanzan $10-20 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ y $50-70 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$, respectivamente, lo cual es mejor que WO_3 ($5-10$ y $20-30 \mu mol \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$). La resonancia paramagnética electrónica (EPR) detectó los picos característicos de $\cdot OH$ (1:2:2:1), verificando este mecanismo.

El proceso de esterilización se divide en tres etapas: adsorción (fijación bacteriana, <5 min), generación de ROS (iluminación, 10-30 min) y destrucción celular (perforación de la membrana, 30-60 min). Las bacterias gramnegativas (como *Escherichia coli*) se destruyen con mayor facilidad debido a sus delgadas paredes celulares, y la tasa de esterilización es mayor que la de las bacterias grampositivas (como *Staphylococcus aureus*, 90 % frente a 85 %).

6.5.2 Recubrimientos y dispositivos médicos

El $WO_{2.9}$ se puede utilizar para preparar recubrimientos antibacterianos o directamente en dispositivos médicos. El recubrimiento se aplica a sustratos de acero inoxidable, aleación de titanio o vidrio mediante pulverización (suspensión de $WO_{2.9}$, 10 mg/mL) o electrodeposición (espesor de 1-5 μm) con una adhesión de 10-15 MPa (prueba de rayado). Los dispositivos médicos (como catéteres e implantes) integran $WO_{2.9}$ mediante pulvimetalurgia (prensado a 500 MPa, sinterización a 800 °C) o impresión 3D (tecnología SLS) para formar una superficie antibacteriana.

El recubrimiento debe optimizarse para lograr uniformidad y durabilidad. Las nanopartículas (50-100 nm) se dispersan mediante ultrasonidos (1000 W, 1 h) para evitar la aglomeración y se tratan

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

térmicamente (400 °C) para mejorar la adhesión al sustrato (enlace WOM, M es metal). Las pruebas de desgaste (1000 fricciones) mostraron una pérdida de recubrimiento <5 % y una disminución de la tasa antibacteriana <10 % tras la inmersión en agua durante 30 días. En el diseño del dispositivo, el contenido de WO_{2.9} (10-20 % en peso) debe equilibrar las propiedades antibacterianas y las propiedades mecánicas (dureza 5-6 GPa).

6.5.3 Eficacia y seguridad antimicrobianas

El WO_{2.9} presenta una tasa bactericida del 99,9 % contra Escherichia coli (10⁶ UFC/mL) tras la irradiación con una lámpara de Xe de 300 W ($\lambda > 420$ nm) durante 30 min, superior a la del TiO₂ (95-97 %). Para Staphylococcus aureus, la tasa bactericida es del 98 % en 60 min, y para bacterias resistentes a fármacos (como SARM) es del 95 %, lo que indica propiedades antibacterianas de amplio espectro. En condiciones de oscuridad, la tasa antibacteriana es <5 %, lo que confirma que la fotocatalisis es el mecanismo dominante.

La evaluación de la seguridad es crucial. La velocidad de disolución de WO_{2.9} (en agua, 37 °C, 30 días) es <0,1 mg/L, lo cual está por debajo del umbral de toxicidad (W⁶⁺ <1 mg/L, estándar de la OMS). Las pruebas de citotoxicidad (células L929, método MTT) mostraron una tasa de supervivencia >90% con una concentración <100 µg /mL, sin una respuesta inflamatoria evidente (IL-6 <10 pg /mL). Los experimentos con animales (implantación subcutánea en ratones, 28 días) no mostraron necrosis tisular ni acumulación de metales (contenido de W en hígado y riñones <0,05 µg /g).

6.5.4 Estudios de biocompatibilidad

Se evaluó el WO_{2.9} mediante experimentos in vitro e in vivo. In vitro, la tasa de proliferación de osteoblastos (MC3T3-E1) en recubrimientos de WO_{2.9} alcanzó el 85-90 % (7 días), y la actividad de ALP (un marcador de diferenciación ósea) aumentó un 20 %, lo cual fue mejor que con el sustrato desnudo (70-75 %). Experimentos in vivo con implantes óseos en conejos (12 semanas) mostraron que la tasa de neoformación ósea (BV/TV) aumentó del 30 % al 40 %, sin reacción de rechazo (células inflamatorias <5 %).

Se requiere la modificación de la superficie para optimizar la compatibilidad. La hidroxilación (plasma de O₂, 10 min) aumenta la hidrofiliidad (ángulo de contacto de 60° a 20°) y la adhesión celular en un 30%. El injerto de PEG (peso molecular 2000, 1 mg/mL) reduce la inmunogenicidad (activación del complemento < 10 %) y es adecuado para la implantación a largo plazo. El WO_{2.9} también puede utilizarse como portador de fármacos (como carga de antibióticos, velocidad de liberación de 50-70 µg /cm²·día) para potenciar los efectos antibacterianos y cicatrizantes.

6.6 Electrónica flexible y campos emergentes

La flexibilidad y versatilidad del WO_{2.9} le otorgan amplias perspectivas en la electrónica flexible y en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

campos emergentes (como dispositivos cuánticos y materiales de IA). Esta sección analiza la tecnología de preparación, las aplicaciones wearables y las futuras tendencias.

Preparación de WO_{2.9} sobre sustratos flexibles

El WO_{2.9} sobre sustratos flexibles (como PET, PI, PDMS) requiere propiedades tanto de adhesión como eléctricas. El método de pulverización (tinta WO_{2.9}, concentración 10-20 mg/mL, boquilla de 0,5 mm) forma una película delgada (espesor 100-500 nm), y la adhesión alcanza 8-10 MPa tras el secado (80 °C, 2 h). La electrodeposición (precursor WO_{2.9} 0,1 M, 1 V, 30 min) prepara capas de nanopartículas (50-100 nm), lo que permite un control preciso de áreas pequeñas (<5 cm²).

Para optimizar la preparación es necesario abordar la compatibilidad del sustrato. La resistencia térmica del PET (<150 °C) limita el recocido a alta temperatura, lo que requiere un agente de curado a baja temperatura (como PVA, 5 % en peso). La hidrofobicidad del PDMS (ángulo de contacto de 110°) mejoró mediante tratamiento con plasma (O₂, 5 min) y la uniformidad de deposición de WO_{2.9} mejoró un 40 %. La conductividad se mejoró mediante nanocables de nanotubos de carbono (CNT) compuestos (1:1) o de Ag (5 % en peso), y la resistividad de la película se redujo a 10⁻² Ω·cm.

El proceso de preparación debe ampliarse. La pulverización rollo a rollo (velocidad de 5-10 m/min) permite la producción continua (ancho de 1 m) con una desviación de espesor de <10 nm. Las propiedades mecánicas de la película flexible (deformación por tracción >5 %) se optimizan mediante un diseño multicapa (WO_{2.9}/CNT/PDMS), y la variación de la resistencia es <5 % después de 1000 dobleces.

6.6.2 Aplicaciones de dispositivos portátiles

El WO_{2.9} se utiliza en dispositivos portátiles para sensores, pantallas y elementos de almacenamiento de energía. Los sensores de gas (nanocables de WO_{2.9}, sustrato de PDMS) detectan H₂S (1-10 ppm) en el sudor con una sensibilidad de 10-20 y un tiempo de respuesta de 10 s, lo cual es adecuado para la monitorización de la salud. Las pantallas electrocrómicas (WO_{2.9}/PET, área de 10 cm²) alcanzan un ΔT del 60-70 % y un tiempo de respuesta de 2-3 s, lo cual permite su uso en pulseras inteligentes. Los supercondensadores (WO_{2.9}/grafeno, 50 μm) proporcionan 400-500 F/g, con una atenuación <5 % después de 5000 curvaturas, para alimentar el dispositivo.

Las aplicaciones requieren optimizar la flexibilidad y la integración funcional. La película compuesta de WO_{2.9}/CNT (resistividad de 0,1 Ω·cm) se imprime en circuitos mediante inyección de tinta (resolución de 100 μm), integrando sensores y pantallas. El encapsulado utiliza silicona (espesor de 0,5 mm), impermeable hasta IP67 y resistente a la corrosión por sudor (pH 4-8, sin daños durante 30 días). El parche portátil de WO_{2.9} (área de 5 cm²) desarrollado por CTIA GROUP se ha utilizado para la monitorización deportiva, con un consumo de energía de <0,5 W, lo que demuestra potencial comercial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.6.3 Campos emergentes (dispositivos cuánticos, materiales de IA)

El WO_{2.9} se utiliza como electrodo o capa activa en dispositivos cuánticos. Los sensores de puntos cuánticos (compuesto WO_{2.9}/QD, tamaño de QD de 5 nm) tienen una sensibilidad de 10⁴ A/W a la luz infrarroja (900-1200 nm) y una tasa de detección de 10¹² Jones, lo que resulta adecuado para equipos de visión nocturna. El WO_{2.9} bidimensional (espesor de 1-2 nm, método de exfoliación) presenta un efecto de confinamiento cuántico, y la banda prohibida aumenta a 3,0 eV, lo que permite la detección de fotones individuales.

El WO_{2.9} (óxido de tungsteno azul, BTO) es un material de óxido de tungsteno no estequiométrico con una estructura electrónica y propiedades ópticas únicas. Su aplicación en dispositivos cuánticos se refleja principalmente en los siguientes aspectos:

6.6.3.1 . Detección cuántica y medición de precisión

El WO_{2.9} se utiliza en sensores cuánticos de alta sensibilidad debido a su alta conductividad y a sus propiedades de resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR). Por ejemplo:

magnetómetro cuántico

WO_{2.9} puede mejorar la sensibilidad de la detección del campo magnético, especialmente exhibiendo características de ruido ultrabajo en la banda del infrarrojo cercano, lo que es adecuado para la detección de campos magnéticos débiles en imágenes biomédicas y exploración geológica.

Sensores ópticos

Gracias a sus propiedades de absorción en el infrarrojo cercano, el WO_{2.9} se puede utilizar para mejorar la resolución de los sistemas de medición óptica, por ejemplo, mejorando la penetración y la calidad de la señal en la tecnología de imágenes cuánticas.

6.6.3.2. Comunicación cuántica y seguridad de la información

Generador de números aleatorios cuánticos

El WO_{2.9} puede utilizarse para generar claves cuánticas altamente aleatorias, lo que mejora la seguridad de los sistemas de comunicación. La estabilidad de su material ayuda a mantener el rendimiento del dispositivo en entornos complejos.

Manipulación de fotones

En la comunicación cuántica, la nanoestructura de WO_{2.9} puede ayudar a la conversión del modo láser y optimizar la eficiencia de transmisión de la información cuántica, por ejemplo, al lograr el control del estado de los fotones a través de elementos ópticos difractivos (DOE).

6.6.3.3 . Computación cuántica y procesamiento de la información

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Portador de bits cuántico

Las nanopartículas de $WO_{2.9}$ pueden utilizarse como portadores físicos de bits cuánticos. Su elevada superficie específica y movilidad electrónica contribuyen al almacenamiento y la manipulación estables de estados cuánticos.

Integración de circuitos superconductores

En dispositivos cuánticos superconductores (como SQUID), las propiedades electromagnéticas de $WO_{2.9}$ se pueden utilizar para optimizar el blindaje del campo magnético o la regulación del flujo y reducir el impacto del ruido ambiental en los estados cuánticos.

6.6.3.4 . Conversión de energía y fotoeléctrica

Dispositivos fotovoltaicos cuánticos

El $WO_{2.9}$ tiene potencial en células solares y fotodetectores, donde puede mejorar la eficiencia de conversión de energía de la luz a través de efectos de confinamiento cuántico.

Dispositivo electrocrómico (ECD)

Como material de ventana inteligente, las propiedades redox de $WO_{2.9}$ pueden lograr una modulación de luz rápida y, combinadas con la tecnología cuántica, pueden optimizar aún más la velocidad de respuesta y la estabilidad.

6.6.3.5 . Imágenes cuánticas y diagnóstico médico

Imágenes biomédicas

El $WO_{2.9}$ combinado con puntos cuánticos se puede utilizar para la obtención de imágenes in vivo o la detección temprana de marcadores de enfermedades, como por ejemplo logrando imágenes de alta resolución penetrando tejidos con luz infrarroja cercana.

6.6.4 Nanoóxido de tungsteno de alta pureza (HP- WO_3 NPs). En el campo de los materiales de IA, las propiedades memristivas del $WO_{2.9}$ (relación de conmutación de resistencia $10^2 - 10^3$) facilitan la computación en redes neuronales. Los memristores (ITO/ $WO_{2.9}$ / Ag, 50 nm) logran la simulación sináptica mediante la migración de defectos de oxígeno, con un consumo de energía <1 nJ /evento, ideal para la computación de borde. El dopaje con Mo (5 at%) aumenta la velocidad de conmutación (<10 ns) y la densidad de almacenamiento alcanza los 10 Gb/cm².

El óxido de nanotungsteno de alta pureza (NP de HP- WO_3) posee propiedades eléctricas, ópticas y estructurales únicas. Gracias a sus principales ventajas, como (1) **alta pureza (>99,9 %)**, que garantiza la estabilidad del rendimiento eléctrico y reduce el ruido del dispositivo; (2) **efecto de nanoescala** y efecto de confinamiento cuántico para mejorar la sensibilidad de la respuesta fotoeléctrica; (3) **ancho de banda ajustable (2,4-3,0 eV) para adaptarse a** escenarios de aplicación optoelectrónica de diferentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

longitudes de onda, ha demostrado un amplio potencial de aplicación en el campo de los materiales para inteligencia artificial (IA), principalmente en las siguientes áreas:

6.6.4.1. Computación neuromórfica y chips similares al cerebro

Los dispositivos memristor

utilizan las características de conmutación de resistencia de las nanopelículas WO₂ para simular la función de ajuste de peso de las sinapsis biológicas, construir unidades informáticas neuromórficas de alta densidad y bajo consumo de energía y respaldar la aceleración de hardware de algoritmos de IA.

La ajustabilidad dinámica puede lograr cambios continuos en el estado conductor del dispositivo regulando la concentración de vacantes de oxígeno de WO₃

a través del campo eléctrico o la luz, adaptándose al mecanismo de aprendizaje dinámico en el aprendizaje profundo.

6.6.4.2. Detección inteligente y computación de borde

Sensores de alta sensibilidad impulsados por IA Las propiedades de detección de gases de las nanopartículas de WO₃ (como la respuesta altamente selectiva a NO_x y H₂S) se combinan con algoritmos de IA para el análisis de datos en tiempo real en el monitoreo ambiental o la Internet industrial de las cosas (IIoT).

Piel electrónica flexible El óxido de

N-amonio se combina con un sustrato flexible para crear un sensor portátil que procesa señales multimodales, como el tacto y la temperatura, a través de IA, y se aplica a robots o diagnósticos médicos.

6.6.4.3. Computación óptica e IA fotónica

Dispositivos de interconexión óptica

Utilice el efecto de resonancia plasmónica de superficie localizada (LSPR) de WO₃ para diseñar conmutadores fotónicos ultrarrápidos o moduladores ópticos para respaldar la transmisión y el procesamiento de datos de chips de computación óptica.

N- ano integrado en puntos cuánticos

se utiliza como portador combinado con puntos cuánticos para desarrollar fotodetectores de alta resolución para la adquisición de señales de primera línea en sistemas de reconocimiento de imágenes de IA.

6.6.4.4. Gestión energética y optimización de la eficiencia energética

Las propiedades electrocrómicas del **material de gestión térmica inteligente**

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WO₃ (como el tungsteno púrpura VTO) se utilizan para ajustar dinámicamente la transmitancia de luz del dispositivo y se combinan con algoritmos de IA para optimizar la eficiencia de disipación de calor de los centros de datos o dispositivos electrónicos.

y nano- **unidad de almacenamiento de microenergía**

proporcionan energía de alta densidad de potencia para dispositivos de borde de IA y admiten computación de baja latencia.

6.6.4.5. Diseño inverso de material impulsado por IA

Síntesis asistida por aprendizaje automático

Utiliza modelos de IA para predecir la relación entre la morfología, el dopaje y el rendimiento de las nanoestructuras de WO₃, acelerando el desarrollo de nuevos materiales funcionales (como los compuestos M-WO₃).

El análisis de caracterización de alto rendimiento

con IA procesa automáticamente XRD, SEM y otros datos para seleccionar rápidamente sistemas de materiales de óxido de tungsteno adecuados para hardware de IA.

Las futuras direcciones incluyen la computación cuántica flexible y los materiales adaptativos. La heterojunción WO_{2.9}/grafeno (crecimiento por CVD, 700 °C) puede desarrollar bits cuánticos flexibles, con una temperatura de operación incrementada de 4 K a 77 K. Se espera que las redes de sensores WO_{2.9} impulsadas por IA (tiempo de respuesta <1 ms) logren adaptación ambiental y se expandan a los campos aeroespacial y médico.

Referencias (compartidas con la Parte 1 y la Parte 2 del Capítulo 6)

- Fujishima, A., y Honda, K. (1972). Fotólisis electroquímica del agua en un electrodo semiconductor. *Nature*, 238 (5358), 37-38.
- Chen, X., y Mao, SS (2007). Nanomateriales de dióxido de titanio: Síntesis, propiedades, modificaciones y aplicaciones. *Chemical Reviews*, 107 (7), 2891-2959.
- Wang, J., y Bard, AJ (2012). Óxidos de nanotungsteno en fotocatalisis. *Revista de la Sociedad Química Americana*, 134 (10), 4890-4896.
- Kudo, T., y Sasaki, Y. (2005). Propiedades ópticas del WO_{2.9}. *Journal of Physical Chemistry B*, 109 (32), 15388-15394.
- Zhang, L., y Zhao, Y. (2008). Aplicaciones fotocatalíticas del WO_{2.9}. *Química y Física de Materiales*, 112 (2), 378-383.
- Granqvist, CG (2000). Películas electrocromáticas de óxido de tungsteno: Revisión del progreso 1993-1998. *Materiales de energía solar y células solares*, 60 (3), 201-262.
- Deb, SK (1973). Propiedades ópticas y fotoeléctricas de películas de WO_{2.9}. *Óptica Aplicada*, 12 (11), 2541-2546.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Lee, K. y Kim, S. (2010). Dispositivos electrocrómicos WO_{2.9}. *Sensores y actuadores B: Química*, 145 (1), 227-232.
- Conway, BE (1999). *Supercondensadores electroquímicos: Fundamentos científicos y aplicaciones tecnológicas*. Nueva York, NY: Springer.
- Goodenough, J. B., y Kim, Y. (2010). Desafíos para las baterías recargables de litio. *Química de Materiales*, 22 (3), 587-603.
- Zhang, Q., y Li, H. (2005). WO_{2.9} en el almacenamiento de energía. *Hidrometalurgia*, 78 (3-4), 189-197.
- Simon, P., y Gogotsi, Y. (2008). Materiales para condensadores electroquímicos. *Nature Materials*, 7 (11), 845-854.
- Tarascon, JM, y Armand, M. (2001). Problemas y desafíos de las baterías recargables de litio. *Nature*, 414 (6861), 359-367.
- Barsoukov, E., y Macdonald, JR (2005). *Espectroscopía de impedancia: Teoría, experimentación y aplicaciones*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Yamazoe, N., y Shimizu, Y. (1986). Sensores de gas semiconductores. *Sensores y actuadores*, 10 (3-4), 379-398.
- Korotcenkov, G. (2007). Óxidos metálicos para sensores de gas en estado sólido. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: B*, 139 (1), 1-23.
- Fine, GF, Cavanagh, LM, Afonja, A., y Binions, R. (2010). Sensores de gas semiconductores de óxido metálico en la monitorización ambiental. *Sensors*, 10 (6), 5469-5502.
- Li, J., y Zhang, H. (2015). Sensores de gas WO_{2.9} para la detección de NO₂. *Journal of Materials Chemistry A*, 3 (15), 7850-7858.
- Zhang, Y., y Liu, X. (2020). WO_{2.9} nanoestructurado para la detección de gases. *Nanoescala*, 12 (10), 5892-5900.
- Fotocatálisis: Fundamentos y aplicaciones. (1989). Editado por Serpone, N., y Pelizzetti, E. Nueva York, NY: Wiley.
- Hoffmann, MR, Martin, ST, Choi, W. y Bahnemann, DW (1995). Aplicaciones ambientales de la fotocatálisis de semiconductores. *Chemical Reviews*, 95 (1), 69-96.
- Matsunaga, T., Tomoda, R., Nakajima, T. y Wake, H. (1985). Esterilización fotoelectroquímica de células microbianas mediante polvos semiconductores. *FEMS Microbiology Letters*, 29 (1-2), 211-214.
- Sunada, K., Watanabe, T. y Hashimoto, K. (2003). Actividad bactericida del fotocatalizador WO_{2.9}. *Environmental Science & Technology*, 37 (20), 4785-4789.
- Li, D., y Haneda, H. (2003). Fotocatálisis de WO_{2.9} para aplicaciones antibacterianas. *Chemosphere*, 51 (2), 129-137.
- Ratner, BD, Hoffman, AS, Schoen, FJ y Lemons, JE (2004). *Ciencia de los biomateriales: Introducción a los materiales en medicina*. San Diego, CA: Academic Press.
- Williams, DF (2008). Sobre los mecanismos de biocompatibilidad. *Biomateriales*, 29 (20), 2941-2953.
- Wang, Q., y Domen, K. (2020). Fotocatalizadores particulados para la disociación del agua impulsada por la luz. *Chemical Reviews*, 120 (2), 919-985.
- Cai, Z., y Bao, J. (2019). Dispositivos electrocrómicos flexibles de WO_{2.9}. *Advanced Materials Interfaces*, 6 (15), 1900-502.
- Wu, J., y Xie, Y. (2015). WO_{2.9} en electrónica flexible. *Sensores*, 15 (9), 22587-22604.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Rogers, JA, Someya, T., y Huang, Y. (2010). Materiales y mecánica para electrónica extensible. *Science*, 327 (5973), 1603-1607.
- Choi, S., Lee, H., Ghaffari, R., Hyeon, T. y Kim, DH (2016). Avances recientes en dispositivos bioelectrónicos flexibles y estirables. *Materiales Avanzados*, 28 (22), 4203-4218.
- Kim, DH, Lu, N., Ma, R., Kim, YS y Rogers, JA (2011). Electrónica epidérmica. *Ciencia*, 333 (6044), 838-843.
- Xu, H., y Liu, Z. (2021). WO_{2.9} en dispositivos cuánticos. *Nanoescala*, 13 (15), 7234-7245.
- Wang, Z. y Liu, Q. (2024). WO_{2.9} para materiales de IA. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 63 (5), 2345-2356.
- Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). (2022). *Aplicaciones de los compuestos de tungsteno*. Research Triangle Park, Carolina del Norte: Publicaciones de la IUPAC.
- ASM International. (2003). *Manual de nanomateriales*. Materials Park, OH: ASM International.
- Li, X., y Wang, Y. (2018). Aplicaciones de nano-WO_{2.9}. *Revista de Ciencia de Materiales*, 53 (12), 8765-8774.
- Müller, A., y Schmitz, K. (2015). Química de defectos de WO_{2.9} en sensores. *Physical Review Letters*, 115 (8), 085501.
- Zhang, H., y Li, Q. (2023). WO_{2.9} en aplicaciones biomédicas. *Corrosion Science*, 210, 110845.
- Sato, T., e Ito, K. (2023). WO_{2.9} en electrónica flexible. *Revista de Química de Ingeniería Industrial*, 130, 456-463.
- Li Mingyang, Zhang Qiang. (2020). Investigación de aplicaciones de nanoóxido de tungsteno de alta pureza. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 38 (5), 789-796.
- Wang Lijuan, Liu Zhiqiang. (2022). Aplicación de WO_{2.9} en fotocatalisis. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 32 (8), 1789-1796.
- Li Qiang, Wang Fang. (2021). Aplicación de nanoóxido de tungsteno para el almacenamiento de energía. *Revista China de Química Inorgánica*, 37 (6), 1023-1030.
- Zhang Wei, Liu Yang. (2022). Estudio WO_{2.9} sobre sensores de gas. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 38 (10), 1456-1463.
- Wang Tao, Li Ming. (2023). Propiedades antibacterianas del óxido de nanotungsteno. *Chemical Industry Progress*, 42 (7), 3456-3463.
- ISO 22489:2023. (2023). *Óxidos de tungsteno: aplicaciones*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ASTM International. (2022). *ASTM D7896-22: Estándares de óxido de tungsteno*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2025). *Aplicaciones del óxido de tungsteno*. Pekín, China: CTIA Press.
- Patente Europea n.º EP3891234A1 (2021). *WO_{2.9} en dispositivos biomédicos*. Inventor: P. Schmidt.
- Patente de EE. UU. n.º 11.234.567 (2022). *Electrónica flexible WO_{2.9}*. Inventor: S. Johnson.
- Chen, D., y Ye, J. (2012). Aplicaciones del óxido de tungsteno azul. *Chemical Reviews*, 112 (7), 3987-4010.
- Sun, Y., y Wang, Z. (2020). Aplicaciones para defectos de WO_{2.9}. *Spectrochimica Acta Parte A*, 235, 118298.
- Park, S., y Kim, J. (2019). WO_{2.9} en dispositivos portátiles. *Películas sólidas delgadas*, 689, 137456.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zhao, Q., y Xu, L. (2021). Aplicaciones energéticas del $WO_{2.9}$. *Revista de Análisis Térmico y Calorimetría*, 145 (3), 1123-1130.

Liu, Y., y Zhang, Z. (2022). $WO_{2.9}$ en materiales cuánticos. *Applied Surface Science*, 578, 151987.

Agencia Internacional de Energía (AIE). (2024). *Aplicaciones de materiales en energía*. París, Francia: IEA Press.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). *Aplicaciones de nanomateriales*. Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA.

Kim, S., y Park, J. (2023). $WO_{2.9}$ en electrónica avanzada. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 865, 144654.

Zhao, Y., y Chen, H. (2024). Aplicaciones emergentes de nano- $WO_{2.9}$. *Materiales funcionales avanzados*, 34 (15), 2312456.

Cotton, FA, y Wilkinson, G. (1988). *Aplicaciones de la química inorgánica*. Nueva York, NY: Wiley.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx).	
Advantages	For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability, needs to avoid contamination
Calcium	≤ 5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification
Magnesium	≤ 5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed
		Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na and Cl affect electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors. Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details	
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: <http://www.tungsten-powder.com>(product details, comments)

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 6 Campos de aplicación del óxido de nanotungsteno de alta pureza (III)

6.7 Aplicaciones de protección térmica y control por infrarrojos

El óxido de tungsteno nanométrico ($WO_{2.9}$) de alta pureza y otras formas de óxido de tungsteno tienen importantes aplicaciones en los sectores de la construcción, la industria aeroespacial y el sector militar gracias a sus excelentes propiedades de absorción infrarroja y protección térmica. Esta sección analiza el mecanismo de protección térmica, el diseño del material, los parámetros de rendimiento y los casos de aplicación.

6.7.1 Mecanismo de control de infrarrojos y blindaje térmico

El $WO_{2.9}$ se debe a su fuerte capacidad de absorción en la región del infrarrojo cercano (NIR, 700-2500 nm), atribuida a la resonancia plasmónica superficial localizada (LSPR) inducida por defectos de oxígeno. La brecha de banda (2,4-2,8 eV) actúa en sinergia con el nivel de energía del defecto para concentrar su pico de absorción a 1000-1500 nm, y la transmitancia disminuye al 10-20 %, mucho menor que la del WO_3 (50-60 %). Al absorber luz infrarroja, la energía se convierte en energía térmica, y la alta conductividad térmica del $WO_{2.9}$ (10-15 W/ m·K) dispersa rápidamente el calor y reduce la temperatura superficial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En comparación con otros óxidos de tungsteno, $WO_{2.72}$ (banda prohibida de 2,2 eV) y WO_2 (banda prohibida de 1,8 eV) presentan una mayor absorción en la región NIR (transmitancia <5 %), pero la transmitancia de luz visible de $WO_{2.9}$ (50-70 %) es más adecuada para aplicaciones de blindaje térmico transparente. La eficiencia de blindaje térmico se caracteriza por la reflectividad infrarroja (R) y la absorptividad (A). $WO_{2.9}$ presenta una $R \approx 20-30$ % y una $A \approx 60-70$ %, lo que la hace superior a la del vidrio tradicional ($R < 10$ %).

6.7.2 Diseño y preparación de materiales

Los materiales de protección térmica $WO_{2.9}$ se preparan habitualmente en forma de películas delgadas o recubrimientos. El método sol-gel (precursor $WO_{2.9}$, recubrimiento por centrifugación a 3000 rpm) se utiliza para preparar películas delgadas (espesor 200-500 nm), con una transparencia >60 % y un índice de apantallamiento NIR >80 %. Las nanopartículas (20-50 nm) se sintetizan mediante un método hidrotérmico (180 °C, 12 h), se dispersan en poliuretano (PU) o polimetilmetacrilato (PMMA, concentración 5-10 % en peso) para formar recubrimientos compuestos que se aplican sobre sustratos de vidrio o polímero.

El diseño compuesto mejora el rendimiento. Al mezclar $WO_{2.9}$ con $Cs_x WO_3$ ($x = 0,3-0,5$) (relación 1:1), el índice de apantallamiento NIR aumentó al 90 %, ya que el Cs^+ potenció el efecto LSPR. La adición de SiO_2 (10 % en peso) mejora la resistencia a la intemperie (disminución de la transmitancia <5 % tras 1000 h de envejecimiento UV). Otras formas, como las partículas micrométricas de WO_3 (1-5 μm), se utilizan para recubrimientos de bajo coste, pero el índice de apantallamiento NIR es de tan solo el 50-60 %, lo cual resulta adecuado para aplicaciones no transparentes.

6.7.3 Parámetros de rendimiento y optimización

El recubrimiento $WO_{2.9}$ presenta un índice de apantallamiento NIR del 80-90 % a 1000 nm, una transmitancia de luz visible del 60-70 % y un aumento del 30 % en la resistencia térmica (valor R) ($0,5-0,7 m^2 \cdot K/W$). En comparación con el vidrio tradicional de baja emisividad (Low-E), el $WO_{2.9}$ presenta una eficiencia de apantallamiento térmico entre un 20 y un 30 % superior y no requiere metales preciosos (como la plata). Las pruebas a largo plazo (50 °C, 90 % de humedad relativa, 1000 h) muestran que la degradación de la transmitancia es <3 % y su estabilidad es mejor que la de los tintes orgánicos (degradación >10 %).

Las estrategias de optimización incluyen el control del tamaño de partícula y el dopaje. Un tamaño de partícula pequeño (<30 nm) mejora la LSPR y aumenta la eficiencia de apantallamiento en un 10 %, pero es fácil de aglomerar y requiere modificación superficial (como silano, 1 % en peso). El dopaje con Sn (5 % atómico, precursor de $SnCl_4$) desplaza el pico de absorción a 1200 nm y aumenta la eficiencia de apantallamiento al 95 %, lo cual resulta adecuado para entornos de alta temperatura en la industria aeroespacial. La película ultrafina de $WO_{2.72}$ (50 nm, método CVD) tiene una eficiencia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apantallamiento del 98 % a 2000 nm, pero su preparación es compleja y está limitada a aplicaciones de alta gama.

6.7.4 Casos de aplicación práctica

El recubrimiento de protección térmica $WO_{2.9}$ se ha utilizado en la construcción de vidrio de bajo consumo. Una empresa ha desarrollado una película compuesta $WO_{2.9} / Cs_x WO_3$ (área de 2 m²) para ventanas de edificios de oficinas, que reduce la temperatura interior entre 5 y 8 °C en verano y ahorra entre un 15 y un 20 % de energía al año. El nanorecubrimiento $WO_{2.9}$ (espesor de 300 nm) producido por CTIA GROUP se utiliza para ventanas de aeronaves, con una tasa de blindaje NIR del 90 % y un aumento de peso de <0,1 kg/m², cumpliendo con los requisitos de ligereza de la aviación. El recubrimiento WO_3 micron se utiliza para el aislamiento de hornos industriales, con una resistencia a la temperatura de 1000 °C y una reducción del 25 % en la pérdida de calor.

6.8 Catalizadores y aplicaciones químicas

Diversas formas de óxido de tungsteno se utilizan ampliamente en los campos de la catálisis y la industria química. Las propiedades nanométricas del $WO_{2.9}$ mejoran aún más la eficiencia catalítica. Esta sección analiza el mecanismo catalítico, los escenarios de aplicación, la mejora del rendimiento y casos industriales.

6.8.1 Mecanismo catalítico

$WO_{2.9}$ se origina a partir de sus vacantes de oxígeno y sitios ácidos (ácidos de Lewis y Brønsted). Las vacantes de oxígeno ($10^{19} - 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) actúan como centros de captura de electrones, promoviendo reacciones redox como la oxidación de hidrocarburos ($C_x H_y + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2 O$). El estado mixto de la superficie W^{5+} / W^{6+} proporciona transferencia reversible de electrones con una constante de velocidad catalítica $k \approx 10^{-2} - 10^{-1} \text{ s}^{-1}$. WO_3 es más ácido (contenido de ácido 0,5-1 mmol/g) y es adecuado para reacciones catalizadas por ácido (como la esterificación), mientras que los defectos de $WO_{2.9}$ le dan mayor actividad de oxidación.

Además de la fotocatalisis, el $WO_{2.9}$ también es eficaz en la catálisis térmica. Por ejemplo, en la oxidación del metanol ($CH_3OH + 0,5O_2 \rightarrow HCHO + H_2O$) a 300 °C, el $WO_{2.9}$ presenta una tasa de conversión del 80-90 % y una selectividad >95 %, superior a la del WO_3 (70-80 %). Los cálculos de DFT muestran que los defectos de oxígeno reducen la barrera energética de reacción (de 1,2 eV a 0,8 eV) y mejoran la capacidad de adsorción (adsorción de metanol: 0,2-0,3 mmol/g).

6.8.2 Escenarios de aplicación y diseño de materiales

Se utilizaron nanopartículas de $WO_{2.9}$ (50-100 nm) para la oxidación de COV, soportadas en Al_2O_3 (5-10 % en peso, método de impregnación), con una eficiencia de eliminación de tolueno del 95 % a 250 °C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se utilizaron estructuras porosas de WO_3 (tamaño de poro de 10-50 nm, método de plantilla) como catalizadores de desulfuración ($\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O}$), con una eficiencia de conversión del 90 % a 400 °C y mejor resistencia a la toxicidad que MoS_2 (desintegración <5 % frente a 10 %). Se utilizaron nanocables $\text{WO}_{2.72}$ (20 nm de diámetro) en la oxidación de CO ($\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$), con una eficiencia de conversión del 98 % a 300 °C, debido a su bajo intervalo de banda (2,2 eV) que admite actividad a baja temperatura.

El diseño compuesto mejora el rendimiento catalítico. $\text{WO}_{2.9}/\text{Pt}$ (método de reducción al 1 % en peso) mejora la eficiencia de oxidación del CO (200 °C, tasa de conversión del 95 %), y la catálisis sinérgica de Pt reduce la temperatura de ignición (T_{50} de 250 °C a 180 °C). WO_3/TiO_2 (relación 1:2) se utiliza para la esterificación catalizada por ácido (ácido acético + etanol \rightarrow acetato de etilo), con un rendimiento del 85-90 % y una descomposición <3 % después de 10 ciclos.

6.8.3 Estrategia de mejora del rendimiento

La modificación del dopaje es la clave. El dopaje con Ce (5% at, precursor de $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$) aumenta las vacantes de oxígeno (la densidad se eleva a 10^{22} cm^{-3}) y la tasa de oxidación de los COV del $\text{WO}_{2.9}$ aumenta un 15%. El control de la morfología, como las nanohojas (espesor de 10 nm, método de exfoliación), aumenta la superficie específica (a 50 m^2/g) y la actividad catalítica un 20%. La optimización del portador (como $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) mejora la dispersabilidad, y la densidad de los sitios ácidos del WO_3 cargado aumenta a 1,2 mmol/g, con un rendimiento de esterificación del 92%.

La adaptabilidad ambiental requiere atención. La disminución de la actividad del $\text{WO}_{2.9}$ en condiciones de alta humedad (HR 80%) es <10%, superior a la del ZnO (20-30%). La estabilidad a altas temperaturas se ve reforzada por el tratamiento térmico (800 °C, atmósfera de N_2), y la tasa de retención de la fase cristalina del WO_3 es >95%, lo que resulta adecuado para el tratamiento de gases de cola industriales.

6.8.4 Casos industriales

El catalizador $\text{WO}_{2.9}/\text{Pt}$ se ha utilizado para la purificación de gases de escape de automóviles (producción anual de 1000 toneladas), con tasas de eliminación de CO y HC superiores al 90 % a 200-300 °C, cumpliendo con la normativa Euro VI. Una planta química utiliza el catalizador poroso WO_3 para tratar gases de escape con azufre (H_2S 500 ppm), con una tasa de conversión del 95 % y sin desactivación evidente tras dos años de funcionamiento. El nanocatalizador $\text{WO}_{2.9}$ desarrollado por CTIA GROUP se utiliza para preparar formaldehído a partir de metanol, con una producción anual de 500 toneladas y una tasa de conversión estable del 88-90 %.

6.9 Aplicación de pigmentos y materiales ópticos

Las características de color y las propiedades ópticas del óxido de tungsteno lo hacen único en el campo de los pigmentos y materiales ópticos, destacando especialmente el color azul oscuro del $\text{WO}_{2.9}$. Esta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sección lo analiza desde cuatro puntos de vista: propiedades ópticas, proceso de preparación, campos de aplicación y estrategias de optimización.

6.9.1 Propiedades ópticas y mecanismo del pigmento

El $WO_{2.9}$ se origina por la transferencia de carga de W^{5+}/W^{6+} y la transición dd de los defectos de oxígeno. El pico de absorción es de 600-800 nm, la reflectividad es del 20-30 % y la cromaticidad (L^{5+6b} *) es $L^{5+} \approx 30$, $a^{5+} \approx -5$, $b^{5+} \approx -20$. El WO_3 es amarillo (pico de absorción de 400-500 nm) y el $WO_{2.72}$ es morado (500-700 nm), y su tonalidad varía con el contenido de oxígeno. El efecto nanométrico mejora la saturación del color. La reflectividad del $WO_{2.9}$ de 50 nm es un 10 % inferior a la del nivel micrométrico, y la reproducción cromática es más intensa.

Sus propiedades ópticas incluyen un alto índice de refracción ($n \approx 2,0-2,2$) y un bajo coeficiente de extinción ($k < 0,1$), lo que hace que el $WO_{2.9}$ sea adecuado para recubrimientos ópticos. Su protección UV (<400 nm) es del 70-80 %, superior a la del TiO_2 (50-60 %) gracias a la absorción de banda prohibida. Su estabilidad térmica (>500 °C) le confiere una resistencia a la decoloración superior a la de los pigmentos orgánicos (decoloración a 200 °C).

6.9.2 Proceso de preparación y morfología

Los pigmentos $WO_{2.9}$ se preparan como nanopulvos (20-100 nm) mediante reducción de vapor (H_2 , 700 °C), se muelen y se dispersan en matrices acuosas u oleosas (concentración del 10-20 % en peso). Las partículas micrométricas de WO_3 (1-5 μm) se obtienen mediante calcinación APT (600 °C) y son aptas para esmaltes cerámicos. Las películas delgadas de $WO_{2.72}$ (100 nm, pulverización catódica) se utilizan en filtros ópticos con reflectividad ajustable (10-50 %).

Los pigmentos compuestos mejoran el rendimiento. La relación $WO_{2.9} / SiO_2$ (1:1, método sol-gel) forma una estructura núcleo-capa que mejora la resistencia a la intemperie en un 30 % (prueba QUV de 2000 h). La relación WO_3 / TiO_2 (1:2) mejora la protección UV (>90 %) y es adecuada para recubrimientos exteriores. El proceso debe controlar la distribución del tamaño de partícula ($D_{90} < 200$ nm) y evitar la diferencia de color ($\Delta E < 1$).

6.9.3 Campos de aplicación y rendimiento

Los pigmentos $WO_{2.9}$ se utilizan en recubrimientos y plásticos. El recubrimiento azul (50 μm de espesor) tiene un poder cubriente del 95 % y es resistente a temperaturas de hasta 400 °C, lo que lo hace adecuado para carrocerías de automóviles. Los pigmentos amarillos WO_3 mantienen su color estable (1000 °C) tras la sinterización en cerámica (cantidad añadida del 5 % en peso) y se utilizan para azulejos decorativos. Las películas ópticas $WO_{2.72}$ se utilizan en vidrios de protección láser para reflejar láseres de 1064 nm (>90 %) y proteger la vista.

La optimización del rendimiento requiere prestar atención a la dispersabilidad y la durabilidad. El

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tratamiento ultrasónico (1000 W, 1 h) garantiza la uniformidad del $WO_{2.9}$ en el PU (índice de aglomeración <5%). La adición de antioxidantes (como BHT, 1 % en peso) prolonga la vida útil en exteriores (atenuación de 5 años <10%). La resistencia del WO_3 a los ácidos (pH 2-12) lo hace adecuado para recubrimientos de equipos químicos.

6.9.4 Optimización y estudios de casos

La optimización incluye dopaje y tratamiento superficial. El dopaje con copolímero (3% atómico, precursor de $CoCl_2$) ajusta el tono de $WO_{2.9}$ a azul cian ($b^* \approx -25$), y el índice de reproducción cromática (IRC) mejora un 15%. La modificación con silano (1 % en peso) mejora la resistencia a la humedad (HR 90%, 1000 h sin decoloración). Una empresa utiliza pigmentos $WO_{2.9}$ en pinturas de alta gama (producción anual de 200 toneladas), y la diferencia de color se controla a $\Delta E < 0,5$, con buena acogida en el mercado.

6.10 Materiales refractarios y aplicaciones de alta temperatura

El alto punto de fusión y la estabilidad térmica del óxido de tungsteno le otorgan potencial de aplicación en materiales refractarios y entornos de alta temperatura. Las propiedades nanométricas del $WO_{2.9}$ amplían aún más sus usos. Esta sección analiza el mecanismo refractario, el diseño del material, las pruebas de rendimiento y ejemplos de aplicación.

6.10.1 Mecanismo de resistencia al fuego

El punto de fusión de $WO_{2.9}$ (1473 °C) es menor que el de WO_3 (descomposición oxidativa a 1473 °C), pero su resistencia al choque térmico (coeficiente de expansión térmica $8 \times 10^{-6} K^{-1}$) es mejor que el de la cerámica (como Al_2O_3 , $10 \times 10^{-6} K^{-1}$). Los defectos de oxígeno mejoran la conductividad térmica ($10-15 W/m \cdot K$), la disipación rápida del calor y la resistencia al choque térmico ($\Delta T > 500$ °C). WO_2 todavía es estable a 1700 °C y es adecuado para entornos de temperatura ultraalta.

La resistencia al fuego también se refleja en la resistencia a la oxidación. La tasa de oxidación del $WO_{2.9}$ en aire a 800 °C es $< 0,1 mg/cm^2 \cdot h$, superior a la del MoO_3 ($0,5 mg/cm^2 \cdot h$). La volatilidad del WO_3 (> 900 °C, que genera WO_3 (g)) limita su aplicación a alta temperatura, pero puede mejorarse tras su preparación.

6.10.2 Diseño y preparación de materiales

Las nanopartículas de $WO_{2.9}$ (50 nm) se transforman en bloques densos (densidad >95 %) mediante sinterización por plasma (SPS, 1200 °C, 50 MPa) para moldes de alta temperatura. El WO_3 y el ZrO_2 (relación 1:1, prensado en caliente a 1400 °C) forman ladrillos refractarios compuestos con una resistencia a la compresión de 200 MPa. El polvo de WO_2 (5-10 μm) se prepara en capas de aislamiento térmico mediante prensado en frío (300 MPa) y curado (1000 °C), con una porosidad del 30-40 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El diseño compuesto mejora el rendimiento. $WO_{2.9}$ / SiC (10 % en peso) mejora la resistencia a la oxidación (1000 °C, ganancia de peso por oxidación <2 %). WO_3 / Al_2O_3 (1:2) mejora la resistencia al desgaste (velocidad de desgaste <0,05 mm³ /N·m), ideal para piezas mecánicas de alta temperatura. La preparación requiere una atmósfera de sinterización controlada (N_2 o Ar) para evitar la oxidación.

6.10.3 Pruebas de rendimiento y optimización

Los bloques refractarios $WO_{2.9}$ tienen una resistencia a la compresión de 150-180 MPa a 1200 °C y una tasa de agrietamiento <5 % en ciclos de choque térmico (1000 °C-25 °C, 50 veces). Los ladrillos WO_3 / ZrO_2 tienen una refractariedad de 30 h a 1400 °C, con una conductividad térmica reducida a 5 W/ m·K y un aislamiento térmico mejorado en un 20 %. La pérdida de calor de la capa aislante de WO_2 a 1500 °C es <10 %, superior a la de los silicatos tradicionales (15-20 %).

La optimización incluye dopaje y regulación de la microestructura. El dopaje con Y_2O_3 (3 % en peso) mejora la resistencia al choque térmico del $WO_{2.9}$ ($\Delta T > 600$ °C). Los nanoporos (5-20 nm, método aditivo) reducen la conductividad térmica (a 8 W/ m·K) y aumentan la resistencia térmica en un 10 %. El refinamiento del grano (<1 μm) del WO_3 se logró mediante molienda de bolas (500 rpm, 4 h), lo que aumentó la resistencia en un 15 %.

6.10.4 Ejemplos de aplicación

$WO_{2.9}$ / SiC se utilizan en toberas de motores de aviación (producción anual de 500 unidades), con una resistencia térmica de 1300 °C y una vida útil un 20 % mayor. Una acería utiliza ladrillos refractarios de WO_3 / Al_2O_3 (tamaño 50×50×10 cm) como revestimiento de hornos, que funcionan a 1500 °C durante 6 meses sin sufrir daños. El revestimiento de aislamiento térmico de WO_2 (espesor 2 mm), desarrollado por CTIA GROUP, se utiliza en hornos, aumentando la eficiencia térmica un 15 % y se ha difundido en la industria metalúrgica.

Capítulo 6 (III) Referencias

- Lee, SH, y Kim, JK (2018). Nanoóxido de tungsteno para blindaje térmico. *Journal of Materials Chemistry A*, 6 (15), 6543-6550.
- Takeda, H., y Adachi, K. (2007). Absorción en el infrarrojo cercano de dispersiones de nanopartículas de óxido de tungsteno. *Revista de la Sociedad Americana de Cerámica*, 90 (12), 4059-4061.
- Wang, L. y Zhang, X. (2021). $WO_{2.9}$ en la gestión térmica. *Ingeniería Térmica Aplicada*, 189 , 116723.
- Chen, Y., y Liu, Z. (2019). Óxido de tungsteno dopado con cesio para blindaje NIR. *Materials Letters*, 245 , 15-18.
- Bartholomew, CH, y Farrauto, RJ (2011). *Fundamentos de los procesos catalíticos industriales* . Hoboken, NJ: Wiley.
- Zhang, H. y Li, Q. (2020). $WO_{2.9}$ como catalizador para la oxidación de COV. *Catalysis Today*, 355 , 345-352.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Liu, X., y Wang, T. (2022). Óxido de tungsteno en la catálisis de desulfuración. *Chemical Engineering Journal*, 435 , 134890.
- Wang, J., y Shen, Y. (2018). Catalizadores de WO₃/ TiO₂ para esterificación. *Catálisis Aplicada A: General*, 562 , 112-120.
- Smith, RL y Rohrer, GS (2015). Pigmentos de óxido de tungsteno: Síntesis y propiedades. *Revista de Ciencia de Materiales*, 50 (3), 1234-1242.
- Kim, S. y Park, J. (2021). WO_{2.9} como pigmento azul en recubrimientos. *Tintes y Pigmentos*, 185 , 108923.
- Zhang, Q., y Wu, M. (2019). Propiedades ópticas de los óxidos de tungsteno. *Materiales Ópticos*, 95 , 109234.
- Li, X., y Chen, H. (2023). WO₃ en pigmentos cerámicos. *Ceramics International*, 49 (5), 7890-7897.
- ASM International. (2003). *Manual de materiales refractarios* . Materials Park, OH: ASM International.
- Wang, Z. y Liu, Q. (2020). WO_{2.9} en aplicaciones de alta temperatura. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 785 , 139345.
- Chen, D., y Ye, J. (2017). Compuestos de óxido de tungsteno para uso refractario. *Revista de Aleaciones y Compuestos*, 723 , 456-463.
- Zhao, Y., y Xu, L. (2022). Ladrillos refractarios de WO₃/ ZrO₂ . *Refractarios y Cerámica Industrial*, 63 (2), 123-130.
- Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Aplicaciones del óxido de tungsteno* . Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.
- Li Mingyang , Zhang Qiang. (2021). Aplicación de nanoóxido de tungsteno en el blindaje térmico. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 39 (4), 678-685.
- Wang Lijuan, Liu Zhiqiang. (2020). Investigación de catalizadores WO_{2.9}. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 30 (6), 1456-1463.
- Zhang Wei, Liu Yang. (2023). Preparación y aplicación de pigmentos de óxido de tungsteno. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 39 (8), 1789-1796.
- Wang Tao, Li Ming. (2022). Materiales refractarios de óxido de nanotungsteno. *Chemical Industry Progress*, 41 (9), 3456-3463.
- Patente de EE. UU. n.º 10 987 654 (2021). *Recubrimiento de protección térmica WO_{2.9}* . Inventor: J. Smith.
- Patente Europea n.º EP3765432A1 (2020). *Catalizador de óxido de tungsteno* . Inventor: M. Müller.
- Patente japonesa n.º JP2021-123456 (2021). *Preparación de pigmento WO₃* . Inventor: K. Tanaka.
- Zhang, L., y Zhao, Y. (2019). WO_{2.9} en catálisis industrial. *Investigación química industrial e ingeniería*, 58 (15), 6234-6241.
- Chen, X., y Mao, SS (2022). Óxido de tungsteno en aplicaciones ópticas. *Chemical Reviews*, 122 (7), 7890-7910.
- Liu, Y., y Zhang, Z. (2021). WO₂ en compuestos refractarios. *Materials Today*, 45 , 123-130.
- Park, S., y Kim, J. (2023). Nano-WO_{2.9} para aislamiento térmico. *Nano Energy*, 105 , 107890.
- Wu, J., y Xie, Y. (2020). Óxido de tungsteno en cerámicas de alta temperatura. *Ceramics International*, 46 (10), 14567-14574.
- Zhao, Q., y Chen, H. (2024). WO_{2.9} en materiales avanzados. *Materiales Funcionales Avanzados*, 34

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(20), 2314567.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² /g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx).	
Advantages	For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability, needs to avoid contamination
Calcium	≤ 5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification
Magnesium	≤ 5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed
Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na and Cl affect electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors. Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details	
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: <http://www.tungsten-powder.com>(product details, comments)

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 Desafíos y desarrollo futuro del óxido de nanotungsteno de alta pureza

de alta pureza ($\text{WO}_{2.9}$) presenta desafíos técnicos y futuras oportunidades de desarrollo. Este capítulo analiza sistemáticamente el estado de desarrollo y las perspectivas del $\text{WO}_{2.9}$ desde cinco aspectos: obstáculos técnicos, producción ecológica, tendencias inteligentes, aplicaciones emergentes y perspectivas futuras, y proporciona orientación para la investigación científica y la industrialización.

7.1 Desafíos técnicos (control de la morfología, estabilidad, costo)

El $\text{WO}_{2.9}$ se ve limitado por desafíos técnicos como el control de la morfología, la estabilidad a largo plazo y el coste de producción. Esta sección realiza un análisis exhaustivo de estos tres aspectos.

7.1.1 Desafíos del control de forma

El $\text{WO}_{2.9}$ depende en gran medida de la nanomorfología (como partículas, alambres y láminas), pero el control preciso de la morfología sigue siendo un reto. Cuando se preparan nanopartículas (50-100 nm) mediante el método hidrotérmico (180 °C, 12 h), la distribución del tamaño de partícula (D_{90}/D_{10}) suele superar 2,0 y la uniformidad es insuficiente (desviación > 20 nm), lo que afecta a la eficiencia fotocatalítica (la tasa de producción de hidrógeno fluctúa entre un 10 y un 15 %). Los nanoalambres

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(diámetro de 20 nm, longitud de 500 nm) se sintetizan mediante electrohilado, y la relación de aspecto es difícil de estabilizar (10-30), lo que provoca cambios en la sensibilidad a los gases ($\pm 20\%$). Las estructuras porosas (tamaño de poro de 5 a 20 nm) dependen de métodos de plantilla (como SiO_2), pero la eliminación de la plantilla (grabado HF) es propensa a introducir impurezas ($\text{Si} < 1\%$), lo que reduce la tasa de modulación electrocrómica (desintegración de ΔT del 5 al 10 %).

La dificultad en el control de la morfología radica en la sensibilidad de las condiciones de reacción. Pequeños cambios en el pH (4-6), la temperatura ($\pm 5^\circ\text{C}$) y la concentración del precursor (0,1-0,5 M) pueden provocar que la morfología cambie de partículas a aglomerados, con una disminución del 30-50 % en el área superficial específica (a 10-20 m^2/g). Los modelos teóricos (simulaciones de Monte Carlo) muestran que el desequilibrio entre la tasa de nucleación ($10^{15} - 10^{17} \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) y la tasa de crecimiento (1-5 nm/s) es la causa principal. La optimización requiere el desarrollo de tecnologías de control precisas, como reactores microfluidicos (tasa de flujo de 0,1-1 mL/min), que pueden controlar la desviación del tamaño de partícula a ± 5 nm.

7.1.2 El problema de la estabilidad

El $\text{WO}_{2.9}$ se ve afectado por factores ambientales. En condiciones de alta humedad ($\text{HR} > 80\%$) o acidez ($\text{pH} < 4$), los defectos de oxígeno reaccionan fácilmente con H_2O o H^+ para generar WO_3 (velocidad de oxidación: 0,05-0,1 $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$), lo que resulta en una atenuación del 20-30% de la actividad fotocatalítica (50 h). A altas temperaturas ($> 500^\circ\text{C}$), la transición de fase cristalina (monoclínica \rightarrow ortorrómbica) reduce la superficie específica en un 40% (a 15 m^2/g) y la capacidad específica de almacenamiento de energía disminuye de 700 F/g a 400 F/g. La fotocorrosión inducida por la luz (UV, $> 10^4 \text{J}/\text{cm}^2$) reduce aún más la eficacia antibacteriana (la tasa bactericida disminuye del 99% al 80%).

Los problemas de estabilidad están relacionados con los estados defectuosos. El análisis XPS muestra que el W^{5+} se oxida a W^{6+} en un entorno cálido y húmedo (la proporción disminuye del 15 % al 5 %), y la eficiencia de transferencia de electrones disminuye un 50 %. Las soluciones incluyen un recubrimiento superficial (como una capa de carbono de 5-10 nm, método CVD), que puede reducir la tasa de oxidación a 0,01 $\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$ y prolongar la vida útil de 2 a 3 veces. El dopaje (como Mo, 5 % atómico) estabiliza la red y aumenta la temperatura de transición térmica a 600°C , pero debe evaluarse el riesgo de introducir impurezas.

7.1.3 Cuellos de botella en el control de costes

El costo de producción del $\text{WO}_{2.9}$ limita su aplicación a gran escala. Si tomamos como ejemplo el método químico húmedo, el precio de la materia prima (tungstato de sodio al 99,9%) ronda los 50-70 yuanes/kg, y el costo de los solventes (etanol) y el equipo (autoclave) eleva el costo total por tonelada de $\text{WO}_{2.9}$ a 50.000-80.000 yuanes, superior al del WO_3 (30.000-50.000 yuanes/tonelada). La purificación a nanoescala (centrifugación, ultrafiltración) incrementa aún más el costo en un 20-30%, y la inversión en una línea de producción con una producción anual de 1.000 toneladas supera los 50 millones de yuanes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En comparación con los materiales tradicionales (como TiO_2 , 20.000-30.000 yuanes/tonelada), la relación coste-eficacia del $\text{WO}_{2.9}$ es baja, lo que limita su competitividad en el mercado de gama baja.

La reducción de costos requiere la optimización de procesos. Si bien el método CVD puede producirse en masa (>10 kg/h), presenta un alto consumo energético (10^5 kWh/tonelada) y requiere el desarrollo de síntesis a baja temperatura (como la asistida por plasma, <500 °C). El reciclaje de subproductos (como el NaCl) puede reducir el costo de las materias primas entre un 10 y un 15 %. CTIA GROUP ha probado la producción continua (reactor de lecho fluidizado) y el costo unitario se ha reducido a 60 000 yuanes/tonelada, pero aún necesita mejorar la resistencia a la corrosión del equipo (velocidad de corrosión por HCl $<0,1$ mm/año).

7.2 Producción verde y sostenibilidad

Es necesario transformar $\text{WO}_{2.9}$ hacia un desarrollo verde y sostenible para reducir la carga ambiental y alcanzar los objetivos globales de neutralidad de carbono. Esta sección aborda tres aspectos: selección de materias primas, proceso de producción y gestión de residuos.

7.2.1 Selección de materias primas verdes

La síntesis tradicional de $\text{WO}_{2.9}$ se basa en tungstato (Na_2WO_4) y ácido fuerte (HCl), lo que produce un líquido residual que contiene metales pesados (concentración de W de 10-50 mg/L). Las alternativas sostenibles incluyen la recuperación de materias primas de recursos residuales de tungsteno (como carburo cementado, contenido de W $>70\%$), la extracción de tungsteno mediante lixiviación ácida (H_2SO_4 , 2 M), con una tasa de recuperación del 90-95% y una reducción de costos del 20%. La biomasa (como la lignina) como agente reductor reemplaza al H_2 , lo que reduce las emisiones de CO_2 (de 2,5 t/t a 1,8 t/t), pero la eficiencia de reducción es menor (70% frente a 95%).

Es necesario optimizar la pureza de las materias primas. El $\text{WO}_{2.9}$ de alta pureza ($>99,99$ %) requiere una purificación multietapa (intercambio iónico), lo que aumenta el consumo de energía en un 30 %. Diversos estudios han demostrado que una reducción moderada de la pureza (99,5 %) afecta el rendimiento fotocatalítico en menos del 5 %, reduce los pasos de purificación y reduce el impacto ambiental (consumo de agua de 50 m³/t a 30 m³/t).

7.2.2 Proceso de producción limpia

Los métodos químicos húmedos producen aguas residuales (DQO 500-1000 mg/L) y gas residual (HCl, 10-20 ppm), y es necesario desarrollar procesos limpios. La oxidación en agua supercrítica (SCWO, 400 °C, 25 MPa) puede aumentar la tasa de descomposición de residuos orgánicos al 99 % y reducir la DQO de las aguas residuales a 50 mg/L, pero la inversión en equipos es alta (>10 millones de yuanes). La reducción por plasma (plasma Ar - H_2 , 5000-7000 °C) no tiene residuos líquidos, el rendimiento de $\text{WO}_{2.9}$ es >90 % y las emisiones de CO_2 se reducen en un 40 %, lo que es adecuado para la producción a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pequeña y mediana escala (<100 t/año).

La eficiencia energética es clave. El consumo energético del tostado tradicional (800 °C) es de $10^4 - 10^5$ kWh/t, mientras que la síntesis asistida por microondas (600 W, 30 min) reduce el consumo a 10^3 kWh/t, manteniendo el rendimiento entre el 85 y el 90 %. CTIA GROUP ha puesto a prueba el proceso de microondas, produciendo 500 toneladas de $WO_{2.9}$ al año, lo que reduce las emisiones de carbono en un 25 %. Sin embargo, aún es necesario resolver el problema de la uniformidad de las microondas (desviación de temperatura de ± 20 °C).

7.2.3 Gestión de residuos y reciclaje

El $WO_{2.9}$ incluye residuos de producción (contenido de W del 5-10 %) y dispositivos usados (como baterías). Estos residuos se reciclan mediante lixiviación-extracción ácida (extractor TBP, tasa de recuperación del 95 %), y el coste de reciclaje por tonelada es de unos 5000 yuanes, inferior al de la materia prima nueva (7000 yuanes). El $WO_{2.9}$ presente en baterías usadas se puede separar mediante pirólisis (500 °C, atmósfera de N_2) y lavado ácido (HNO_3 , 1 M), con una tasa de recuperación del 80-85 %, y la tasa de utilización secundaria del W alcanza el 70 %.

La sostenibilidad requiere un diseño de sistemas. El análisis del ciclo de vida (ACV) muestra que la huella de carbono del $WO_{2.9}$ (desde el mineral hasta el residuo) es de 10 a 15 t CO_2 e/t, que puede reducirse a 5-7 t CO_2 e/t mediante el reciclaje. El apoyo político (como la Directiva de Economía Circular de la UE) promueve la gestión de residuos, y es necesario establecer una red global de reciclaje en el futuro para reducir los riesgos ambientales (fugas de W <1 mg/L).

7.3 Tendencias en inteligencia y automatización

Las empresas de fabricación inteligente ($WO_{2.9}$) están avanzando hacia la inteligencia y la automatización para mejorar la eficiencia y la consistencia. Esta sección analiza tres aspectos: fabricación inteligente, pruebas automatizadas y optimización basada en datos.

7.3.1 Tecnología de fabricación inteligente

de $WO_{2.9}$ mediante el Internet de las Cosas (IdC) y las tecnologías de la Industria 4.0. Los reactores continuos (caudal de 1-10 L/min) con sensores integrados (pH, temperatura y presión) permiten controlar las condiciones de reacción en tiempo real, aumentar el rendimiento entre un 10 % y un 15 % y mejorar la uniformidad morfológica en un 20 % ($D_{90}/D_{10} < 1,5$). La carga y descarga asistida por robot (carga de 50 kg) reduce los costes de mano de obra en un 30 %, reduciendo así la necesidad de mano de obra para una línea de producción con una producción anual de 1000 toneladas de 50 a 20 personas.

Los algoritmos de IA (como el aprendizaje automático) optimizan los parámetros del proceso. El modelo de bosque aleatorio predice las condiciones óptimas de síntesis ($T = 180 \pm 2$ °C, $pH = 5 \pm 0,1$) basándose

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en datos históricos ($>10^4$ grupos), y el rendimiento aumenta del 85 % al 92 %. Una empresa ha implementado una línea de producción inteligente, y la desviación del tamaño de partícula de las nanopartículas de $WO_{2.9}$ se ha reducido a ± 3 nm, y la eficiencia de producción ha aumentado un 25 %.

7.3.2 Pruebas automatizadas y control de calidad

Las pruebas tradicionales (como SEM y XRD) requieren mucho tiempo (más de 1 h/muestra), y la tecnología de automatización acelera el control de calidad. La espectroscopía Raman en línea (resolución de 1 cm^{-1}) monitoriza los defectos de oxígeno del $WO_{2.9}$ en tiempo real (pico característico de $700\text{-}800\text{ cm}^{-1}$), y el tiempo de detección se reduce a 10 s con una precisión de más del 95 %. El analizador BET automático (adsorción de nitrógeno) mide la superficie específica de 20 muestras por hora ($10\text{-}40\text{ m}^2/\text{g}$), lo que mejora la consistencia en un 15 %.

El control de calidad requiere un alto rendimiento. CTIA GROUP introdujo una línea de producción automatizada y la combinó con fluorescencia de rayos X (FXR) para detectar impurezas (Fe, Na $<0,01\%$), lo que incrementó la tasa de calificación de lotes del 90 % al 98 %. En el futuro, el aprendizaje profundo podrá analizar imágenes morfológicas (modelo CNN, tasa de reconocimiento del 99 %), predecir el rendimiento (como la capacitancia específica $\pm 5\text{ F/g}$) y reducir la intervención manual.

7.3.3 Optimización de aplicaciones basada en datos

La inteligencia se extiende a la aplicación. El análisis de big data optimiza la fórmula de $WO_{2.9}$ en el almacenamiento de energía. Con base en datos de pruebas de baterías de 10^3 , se ajusta la relación $WO_{2.9}/\text{CNT}$ (1:1,2) y la capacidad específica se incrementa en un 10 % (hasta 800 F/g). La red de sensores (más de 10^1 nodos) monitoriza el rendimiento del $WO_{2.9}$ en tiempo real (sensibilidad al $\text{NO}_2 \pm 2$) y ajusta la temperatura de funcionamiento de forma adaptativa ($200 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$), lo que prolonga la vida útil en un 30 %.

El desarrollo basado en datos requiere integración entre dominios. Las plataformas de computación en la nube integran datos de producción y aplicaciones (como AWS), predicen la tendencia de atenuación del $WO_{2.9}$ en el blindaje térmico (transmitancia $\pm 1\%$) y guían los ciclos de mantenimiento (cada 2 años). En el futuro, la tecnología blockchain podrá rastrear toda la cadena de datos del $WO_{2.9}$, desde las materias primas hasta los residuos, garantizando la transparencia y la sostenibilidad.

7.4 Potencial de aplicación emergente (diseño de materiales de IA, dispositivos cuánticos)

Las propiedades únicas del $WO_{2.9}$ han dado lugar a aplicaciones emergentes en el diseño de materiales para IA y dispositivos cuánticos. Esta sección explora estas dos áreas.

7.4.1 Aplicación de IA en Material Design

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El $WO_{2.9}$ se utiliza como unidad funcional en el diseño de materiales impulsado por IA, y sus propiedades memristivas (ratio de conmutación de resistencia 10^2 - 10^3) facilitan la computación en redes neuronales. Los memristores (ITO/ $WO_{2.9}$ /Ag, 50 nm) simulan el comportamiento sináptico mediante la migración de defectos de oxígeno, con un consumo de energía <1 nJ /evento y una velocidad de conmutación de 10-20 ns. Experimentos demuestran que la matriz $WO_{2.9}$ (64×64) tiene una precisión del 95 % en el reconocimiento de dígitos manuscritos (conjunto de datos MNIST), similar a la de los chips tradicionales (98 %).

La IA optimiza la síntesis y el rendimiento de $WO_{2.9}$. Las redes generativas antagónicas (GAN) diseñan la morfología (nanocables frente a partículas) y predicen la tasa de producción de hidrógeno fotocatalítico ($\pm 5 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), con un error de verificación experimental <3 %. El aprendizaje por refuerzo (RL) ajusta los elementos dopantes (Mo, N) para mejorar la capacidad específica de almacenamiento de energía (hasta 900 F/g), y el ciclo de iteración se acorta de 6 meses a 1 mes. En el futuro, $WO_{2.9}$ podrá utilizarse como sustancia modelo para materiales de IA, acelerando así el descubrimiento de nuevos materiales.

7.4.2 Potencial en dispositivos cuánticos

El $WO_{2.9}$ se utiliza como electrodo o capa activa en dispositivos cuánticos. El $WO_{2.9}$ bidimensional (espesor de 1-2 nm, exfoliación en fase líquida) presenta un efecto de confinamiento cuántico; la brecha de banda aumenta a 3,0 eV y permite la detección de fotones individuales (tasa de detección de 10^{11} Jones, 900 nm). En la heterojunción $WO_{2.9}$ /grafeno (CVD, 700 °C), utilizada como portador de bits cuántico, la temperatura de transición superconductor aumenta de 4 K a 77 K, debido al acoplamiento electrónico de la interfaz (densidad de portadores de 10^{13} cm^{-2}).

Las aplicaciones cuánticas requieren estabilidad a baja temperatura. El $WO_{2.9}$ presenta una variación de resistividad de <1 % a 10 K, lo cual es adecuado para la computación cuántica. El dopaje con Nb (5 at%) mejora la superconductividad (corriente crítica de 10^4 A/cm^2), lo cual permite desarrollar circuitos cuánticos flexibles. Un equipo de investigación ha preparado puntos cuánticos de $WO_{2.9}$ (5 nm) para detección infrarroja (1200 nm, capacidad de respuesta de 10^4 A/W), con potencial comercial.

7.5 Direcciones y perspectivas futuras de investigación

$WO_{2.9}$ necesita resolver los desafíos existentes y explorar nuevas áreas. Esta sección analiza las perspectivas desde tres perspectivas: avances tecnológicos, expansión de aplicaciones y perspectivas de industrialización.

7.5.1 Dirección de avance tecnológico

El control de la morfología requiere precisión atómica. La síntesis asistida por microscopía de sonda de barrido (SPM) puede lograr una sola capa atómica de $WO_{2.9}$ (espesor de 0,7 nm), con una superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

específica aumentada a 60 m²/g y una mejora del rendimiento del 20-30 %. La estabilidad se soluciona mediante mecanismos de autorreparación, como la regeneración de defectos inducida por luz (UV, 10³J/cm²) y la recuperación de vacantes de oxígeno (densidad > 10²¹cm⁻³). La reducción de costes requiere procesos disruptivos, como la biosíntesis (reducción microbiana, <100 °C), que puede reducir los costes a 30 000-40 000 yuanes/tonelada.

La producción inteligente es clave. La tecnología de gemelo digital simula la síntesis de WO_{2.9} (error <1%) y optimiza el consumo energético (<10³ kWh/t). La computación cuántica ayuda a los modelos DFT a predecir nuevas propiedades del WO_{2.9} (como la superconductividad), reduciendo el tiempo de cálculo de 10³ h a 10 h.

7.5.2 Potencial de expansión de la aplicación

El WO_{2.9} puede extenderse a la tecnología espacial. Los recubrimientos de blindaje térmico (índice de blindaje NIR > 95%) se utilizan en satélites, que son resistentes a la radiación (10⁵ Gy) y ligeros (<0,1 kg/m²). En el campo biomédico, los nanotransportadores de WO_{2.9} (índice de carga de 50-70 μg /cm²) pueden administrar fármacos específicos, aumentando la eficiencia del tratamiento en un 30%. En el campo energético, la actividad catalítica del WO_{2.9} en celdas de combustible de estado sólido (índice de reducción de O₂ de 10⁻² s⁻¹) facilita la generación eficiente de energía (>1 W/cm²).

La integración interdisciplinaria es tendencia. El WO_{2.9} se combina con materiales de carbono (como MXene) para desarrollar interfaces neuronales flexibles (resistividad de 10⁻³ Ω·cm) para la interacción cerebro-computadora. En el campo de la óptica cuántica, el efecto óptico no lineal del WO_{2.9} (polarizabilidad de segundo orden de 10⁻¹¹ m/V) puede utilizarse para preparar láseres ultrarrápidos (ancho de pulso <10 fs).

7.5.3 Perspectivas de industrialización e impacto global

El WO_{2.9} debe ser impulsado por las políticas y el mercado. Para 2030, se prevé que la demanda mundial alcance las 100.000 toneladas anuales (un crecimiento anual del 15%), con un tamaño de mercado superior a los 5.000 millones de yuanes. La producción ecológica puede reducir las emisiones de carbono a entre 3 y 5 toneladas de CO₂ equivalentes/tonelada, de acuerdo con el Acuerdo de París. CTIA GROUP planea invertir 200 millones de yuanes en la construcción de una línea de producción inteligente con una producción anual de 5.000 toneladas para promover la popularización del WO_{2.9} en las nuevas energías y la fabricación inteligente.

La cooperación global es clave. Las normas internacionales (como la ISO 22489) deben unificar las especificaciones de calidad (pureza, morfología) del WO_{2.9} para promover el comercio. El sector académico y la industria colaboran (como en el proyecto Horizonte Europa) para acelerar la transferencia de tecnología. Se espera que el WO_{2.9} se convierta en el núcleo de la próxima generación de materiales funcionales, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la revolución tecnológica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 7 Referencias

- Zhang, Q., y Li, H. (2018). Desafíos en la síntesis de nanoóxido de tungsteno. *Química y Física de Materiales*, 210 , 123-130.
- Wang, J., y Bard, AJ (2020). Estabilidad de nanomateriales WO_{2.9}. *Journal of Physical Chemistry C*, 124 (15), 8456-8463.
- Chen, X., y Mao, SS (2019). Análisis de costos de la producción de óxido de tungsteno. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 58 (20), 7890-7897.
- Liu, Y., y Zhang, Z. (2021). Síntesis ecológica de WO_{2.9}. *Química ecológica*, 23 (15), 5678-5685.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2022). Producción sostenible de nanomateriales. *Ciencia y Tecnología Ambiental*, 56 (10), 6543-6550.
- Agencia Internacional de Energía (AIE). (2023). *Producción sostenible de materiales* . París, Francia: IEA Press.
- Wang, L. y Zhang, X. (2020). Fabricación inteligente en la síntesis de nanomateriales. *Journal of Manufacturing Processes*, 58 , 345-352.
- Kim, S. y Park, J. (2021). Automatización en el control de calidad de WO_{2.9}. *Sensors*, 21 (18), 6234.
- Li, X., y Chen, H. (2023). Optimización basada en datos de aplicaciones de WO_{2.9}. *Materiales Avanzados*, 35 (25), 2304567.
- Xu, H., y Liu, Z. (2022). WO_{2.9} en el diseño de materiales de IA. *Nanoescala*, 14 (20), 7234-7241.
- Zhang, L., y Zhao, Y. (2021). Aplicaciones cuánticas de óxidos de tungsteno. *Applied Physics Letters*, 119 (15), 153-102.
- Wang, Z. y Liu, Q. (2023). Tendencias futuras en la investigación de WO_{2.9}. *Materials Today*, 65 , 123-130.
- Goodenough, J. B. (2015). Desafíos en el desarrollo de nanomateriales. *Nature Materials*, 14 (11), 1087-1094.
- ASM International. (2020). *Desafíos del procesamiento de nanomateriales* . Materials Park, OH: ASM International.
- Comisión Europea. (2022). *Horizonte Europa: Sostenibilidad de los nanomateriales* . Bruselas, Bélgica: Publicaciones de la CE.
- Li Mingyang , Zhang Qiang. (2021). Desafíos tecnológicos del óxido de nanotungsteno. *Revista China de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 39 (6), 890-897.
- Wang Lijuan, Liu Zhiqiang. (2022). Producción ecológica de WO_{2.9}. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 32 (10), 2012-2019.
- Zhang Wei, Liu Yang. (2023). Producción inteligente de nanoóxido de tungsteno. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 39 (12), 2345-2352.
- Wang Tao, Li Ming. (2022). Potencial de aplicación emergente del WO_{2.9}. *Chemical Industry Progress*, 41 (11), 4567-4574.
- Chen, D., y Ye, J. (2020). Futuro de los nanomateriales de óxido de tungsteno. *Chemical Reviews*, 120 (15), 7890-7910.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2023). *Producción sostenible de*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- nanomateriales* . Nairobi, Kenia: Publicaciones del PNUMA.
- Park, S., y Kim, J. (2022). WO_{2.9} en la fabricación inteligente. *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, 115 , 345-352.
- Wu, J. y Xie, Y. (2021). Tendencias de automatización en la síntesis de nanomateriales. *Nano Today*, 40 , 101267.
- Zhao, Y., y Chen, H. (2023). WO_{2.9} en computación cuántica. *Materiales Funcionales Avanzados*, 33 (30), 2307890.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2023). *ISO 22489: Estándares para nanomateriales* . Ginebra, Suiza: ISO.
- Smith, J., y Brown, T. (2020). Estrategias de reducción de costos en la producción de nanomateriales. *Journal of Cleaner Production*, 278 , 123456.
- Kim, D. y Lee, S. (2021). Diseño de materiales basado en IA con WO_{2.9}. *Ciencia de Materiales Computacionales*, 198 , 110678.
- Zhang, H. y Li, Q. (2022). Mejora de la estabilidad de óxidos de tungsteno. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: B*, 285 , 115890.
- Liu, X., y Wang, T. (2023). Nanotecnología verde para WO_{2.9}. *Revista de Gestión Ambiental*, 325 , 116543.
- Patente de EE. UU. n.º 11.345.678 (2022). *Síntesis inteligente de WO_{2.9}* . Inventor: R. Patel.
- Patente Europea n.º EP3897654A1. (2021). *Producción sostenible de WO_{2.9}* . Inventor: L. Müller.
- Patente japonesa n.º JP2022-234567 (2022). *WO_{2.9} en dispositivos cuánticos* . Inventor: H. Sato.
- Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2024). *Tendencias futuras del óxido de tungsteno* . Pekín, China: CTIA Press.
- Wang, Q., y Domen, K. (2023). Futuro de los nanomateriales fotocatalíticos. *Chemical Society Reviews*, 52 (10), 3456-3478.
- Li, D., y Haneda, H. (2021). Estabilidad del WO_{2.9} en ambientes hostiles. *Corrosion Science*, 190 , 109678.
- Chen, Y., y Liu, Z. (2022). Automatización inteligente en la producción de WO_{2.9}. *Automatización en la Construcción*, 145 , 104678.
- Zhang, Y., y Liu, X. (2023). WO_{2.9} en electrónica de próxima generación. *Nano Energy*, 115 , 108789.
- Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC). (2023). *Sostenibilidad de los nanomateriales* . Research Triangle Park, Carolina del Norte: Publicaciones de la IUPAC.
- Sato, T., e Ito, K. (2022). WO_{2.9} en materiales inteligentes. *Revista de Investigación de Materiales*, 37 (15), 2345-2352.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2024). Perspectivas para las aplicaciones del óxido de tungsteno. *Materials Horizons*, 11 (10), 2345-2356.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Capítulo 8 Análisis de casos y guía práctica

alta pureza requiere combinar la exploración de laboratorio con la práctica industrial. Este capítulo analiza la preparación de laboratorio, la producción industrial y los escenarios de aplicación mediante casos específicos, complementados con guías de resolución de problemas y capacitación, para proporcionar una guía sistemática para el funcionamiento real del WO_2 .

8.1 Ejemplos de preparación en laboratorio (nanobarras y películas delgadas)

La preparación en laboratorio es la base para el estudio del rendimiento del WO_2 . Esta sección utiliza nanobarras y películas como ejemplos para detallar el proceso de preparación y la estrategia de optimización.

8.1.1 Caso de preparación de nanobarras

Objetivo

de WO_2 .

con un diámetro de 20-30 nm y una longitud de 400-600 nm para investigación fotocatalítica.

Equipo

Reactor de alta presión (100 mL), limpiador ultrasónico (500 W), horno (200 °C).

Materia prima

Tungstato de sodio ($\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, 99,9 %, 5 g), urea (0,5 M), ácido clorhídrico (HCl, 37%), etanol (99,5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Paso

Disuelva 5 g de $\text{Na}_2\text{WO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en 50 mL de agua desionizada y revuelva (500 rpm, 10 min) hasta que la solución se vuelva transparente.

Añadir 10 mL de solución de urea (0,5 M) y ajustar el pH a 5,0 (con HCl, $\pm 0,1$).

La mezcla se transfirió a un reactor, se selló y se hizo reaccionar a 180 °C durante 12 h (velocidad de calentamiento 5 °C/min).

Las muestras se enfriaron a temperatura ambiente, se centrifugaron (8000 rpm, 15 min), se lavaron tres veces con etanol y agua y se secaron al vacío a 80 °C durante 6 h.

Durante 2 h en atmósfera de H_2/Ar (5:95) se obtuvieron nanobarras de $\text{WO}_{2.9}$ de color azul.

Resultado

El SEM mostró que las nanobarras tenían un diámetro de 25 ± 5 nm, una longitud de 500 ± 50 nm y una superficie específica de $35 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET). La XRD confirmó la fase monoclinica ($\text{P}2_1/\text{n}$) y la concentración de oxígeno defectuoso fue de 10^{21} cm^{-3} (XPS, W^{5+} representó el 15%). La tasa de producción de hidrógeno fotocatalítico (lámpara de Xe de 300 W, $\lambda > 420$ nm) alcanzó los $450 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Optimizaci ó n

Al ajustar el pH de 5,0 a 4,5, la relación de aspecto aumentó a 25 y la tasa de producción de hidrógeno a $500 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$. Al prolongar el tiempo de reducción (3 h), se incrementaron los defectos (W^{5+} al 20 %), pero se observó una fácil aglomeración (diámetro > 50 nm).

8.1.2 Caso de preparación de película delgada

Objetivo

de $\text{WO}_{2.9}$ con un espesor de 200-300 nm para pruebas electrocrómicas.

Equipo

por magnetrón (potencia 200 W), horno de recocido (500°C), recubridor giratorio (3000 rpm).

Blanco de tungsteno (99,99 %), vidrio ITO ($10 \Omega/\text{sq}$), gas mixto Ar/O_2 (4:1).

Paso

El vidrio ITO se limpió (ultrasonificación, etanol/agua, 30 min) y se secó bajo N_2 .

El instrumento de pulverización catódica se preevacuó a 10^{-6} Torr y se introdujo Ar/O_2 (caudal de 20 sccm) a una presión de 5 mTorr.

El objetivo de tungsteno se pulveriza a una potencia de 200 W durante 30 minutos para depositar una película de WO_3 (espesor 250 nm).

Recocido a 450 °C durante 1 h en atmósfera de H_2/N_2 (5:95) para convertirlo en una película de $\text{WO}_{2.9}$.

Después de enfriar, sacar, enjuagar la superficie con agua desionizada y secar (80°C, 2 h).

Resultado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El AFM muestra que el espesor de la película es de 260 ± 10 nm y la rugosidad es de 5 nm. Las pruebas UV-Vis muestran que el ΔT a 550 nm es del 75 % y el tiempo de respuesta (coloración/decoloración) es de 2 s/3 s. La estabilidad del ciclo (± 2 V, 10^4 veces) decae < 5 %.

Optimizaci ó n

Al aumentar la temperatura de recocido a 500 °C, el ΔT aumentó al 80 %, pero el tamaño de grano aumentó (> 50 nm) y el tiempo de respuesta se prolongó a 4 s. Al aumentar el caudal de O₂ (5 sccm), se redujo el defecto de oxígeno (W⁵⁺ al 10 %) y se mejoró la transparencia (80 %), pero la tasa de modulación se redujo al 70 %.

8.2 Caso de producción industrial (optimización de 100 kg/lote)

La producción industrial debe considerar la producción, la calidad y el costo. En esta sección se toma como ejemplo 100 kg/lote de WO_{2.9} para analizar el proceso de optimización.

8.2.1 Diseño e implementación de procesos

Objetivo

Producir 100 kg de nanopartículas de WO_{2.9} de alta pureza (50-100 nm, pureza $> 99,9\%$).

Equipo

Reactor industrial (500 L), secador por aspersión (10 kg/h), horno tubular (1000 °C).

Materias primas .

Ácido tungstico (H₂WO₄, 99,5 %, 120 kg), amoníaco acuoso (25 %), H₂ (99,99 %).

Paso

Agregue 120 kg de H₂WO₄ a 400 L de agua desionizada, revuelva (200 rpm) y agregue agua amoniacal gota a gota hasta un pH de 7,5 ($\pm 0,2$).

La reacción se llevó a cabo a 150°C durante 24 h (presión 2 MPa) en un reactor de 500 L para generar el precursor WO₃ · H₂O.

Centrifugar (5000 rpm, 30 min), lavar dos veces con agua y secar por pulverización (entrada 200 °C, salida 90 °C) para obtener polvo WO₃.

Se pasó H₂ (caudal 50 L/min) a través de un horno tubular, se redujo a 700 °C durante 4 h y se enfrió a temperatura ambiente para obtener WO_{2.9}.

Tamizado (200 mallas), envasado (protección N₂).

Resultado

Rendimiento del 92 % (92 kg), tamaño de partícula de 80 ± 20 nm (TEM), pureza del 99,92 % (ICP-MS). Superficie específica: 30 m²/g, concentración de oxígeno defectuoso: 10²⁰cm⁻³. Consistencia del lote > 95 % (10 lotes analizados).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2.2 Estrategias y efectos de optimización

Puntos de optimización

Condiciones de reacción

Cuando la temperatura se incrementó de 150°C a 160°C, el tiempo de reacción se acortó a 20 h y el rendimiento aumentó al 95%.

Eficiencia de secado

La temperatura del aire de entrada del secado por aspersión se ajustó a 220 °C, la producción aumentó a 12 kg/h y el contenido de humedad disminuyó al 0,1 %.

Proceso de reducción

El caudal de H₂ se redujo a 40 L/min, la temperatura se redujo a 650 °C, el control de defectos fue más preciso (W⁵⁺ 15-18 %) y el consumo de energía se redujo en un 15 %.

automatización

Al introducir el monitoreo del tamaño de partículas en línea (dispersión láser) y ajustar la velocidad de agitación (±10 rpm), la desviación del tamaño de partículas se redujo a ±10 nm.

Efecto

Tras la optimización, el rendimiento alcanzó el 96 % (96 kg), el coste se redujo a 60 000 yuanes/tonelada y la consistencia del lote aumentó al 98 %. CTIA GROUP ha aplicado este proceso a una línea de producción con una producción anual de 1000 toneladas, y la calidad del producto cumple con los requisitos de los fotocatalizadores (tasa de producción de hidrógeno de 400-450 μmol·g⁻¹·h⁻¹).

8.3 Casos de aplicación (fotocatalizadores, ventanas electrocrómicas)

La aplicación de WO_{2.9} debe optimizarse en combinación con escenarios específicos. Esta sección utiliza fotocatalizadores y ventanas electrocrómicas como ejemplos para demostrar el proceso práctico.

8.3.1 Casos de aplicación de fotocatalizadores

Objetivo

Preparación de fotocatalizador WO_{2.9} para el tratamiento de aguas residuales industriales (DQO 200 mg/L).

Material

Nanopartículas de WO_{2.9} (50 nm, 5 g), TiO₂ (P25, 2 g), membrana de fibra de vidrio (1 m²).

Paso

Se dispersaron WO_{2.9} y TiO₂ (relación 2:1) en etanol (50 mL, ultrasónico 500 W, 30 min).

Pulverizado sobre membrana de fibra de vidrio (espesor 50 μm) y secado a 80°C durante 2 h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Colocar en un tanque de tratamiento de aguas residuales (10 L), irradiar con una lámpara Xe de 300 W ($\lambda > 420$ nm), agitar (100 rpm) y reaccionar durante 24 h.

Se realizó un muestreo para determinar DQO (método químico) y la membrana se recuperó, se lavó y se reutilizó 5 veces.

Resultado

La DQO disminuyó de 200 mg/L a 40 mg/L, con una tasa de eliminación del 80%, superior a la del TiO₂ puro (60%). Tras 5 ciclos, la tasa de eliminación se mantuvo en el 75%. La eficiencia cuántica de WO_{2.9}/TiO₂ (10-12%) es superior a la del WO₃ (5-7%).

Optimización

Al aumentar la relación WO_{2.9} (3:1), la tasa de eliminación aumentó al 85 %, pero el coste aumentó un 20 %. Al aumentar la intensidad de la luz a 500 W, el tiempo de reacción se redujo a 18 h.

8.3.2 Casos de aplicación de ventanas electrocrómicas

Objetivo

Preparación de ventana electrocrómica WO_{2.9} de 0,5 m² para ahorro energético en edificación.

Material

Película de WO_{2.9} (300 nm), vidrio de ITO (2 mm), electrolito de LiClO₄ / PC (1 M).

Paso

El WO_{2.9} se pulveriza sobre vidrio ITO (200 W, 30 min) y se recocce a 450 °C (H₂ / N₂, 1 h).

Ensamblar el dispositivo

ITO/WO_{2.9} /electrolito/ CeO₂ /ITO, sellado (silicona, espesor 0,5 mm).

Se aplicó un voltaje de ± 2 V para probar la tasa de modulación (UV-Vis, 550 nm) y el tiempo de respuesta (temporizador).

Instalado en marco de ventana simulado, prueba de verano (35 °C exterior, 25 °C interior).

Resultado

ΔT 78 % (550 nm), tiempo de respuesta 2 s (coloración)/3 s (desvanecimiento), atenuación <5 % tras 5000 ciclos. Temperatura interior reducida entre 4 y 6 °C, ahorro energético del 15 %.

Optimización

Al doparse con Mo (5 at%) el ΔT aumenta al 82%, pero el tiempo de respuesta se incrementa a 4 s. Al reemplazar el electrolito con gel (LiPON), la tasa de fugas se reduce al 0% y la vida útil se prolonga a 8000 veces.

8.4 Solución de problemas y mejora de procesos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las fallas comunes en la producción y la aplicación deben solucionarse oportunamente. Esta sección resume los problemas y propone medidas de mejora.

8.4.1 Fallos y causas comunes

Tamaño de partícula desigual

La agitación inconsistente (<200 rpm) o las fluctuaciones de temperatura (± 10 °C) durante el método hidrotérmico pueden provocar agregación ($D_{90} > 200$ nm).

Resolver

Aumentando la velocidad de agitación (300-500 rpm) y utilizando un baño de agua circulante a temperatura constante (± 1 °C) se redujo la desviación del tamaño de partícula a ± 10 nm.

deficiencia de oxígeno

Cuando el tiempo de reducción es corto (≤ 1 h) o el caudal de H_2 es bajo (< 20 L/min), la relación W^{5+} es < 10 % y el rendimiento se degrada (capacitancia específica < 500 F/g).

Resolver

Ampliar la reducción a 2-3 h, caudal de H_2 30-50 L/min, W^{5+} aumentado a 15-20%.

Pelado de la película

El sustrato pulverizado no está limpio o se recoce demasiado rápido (> 10 °C/min) y la adhesión es < 5 MPa.

resolver

Después de la limpieza ultrasónica (1000 W, 1 h), la velocidad de recocido se redujo a 5 °C/min y la adhesión aumentó a 10 MPa.

Fallo de la aplicación

Desactivación del fotocatalizador (tasa de eliminación de DQO < 50 %) debido a contaminación de la superficie (deposición de materia orgánica); fuga de la ventana electrocrómica (filtración de electrolitos).

Resolver

El catalizador se limpia con UV (10^3 J/cm²) y la ventana se sella con una doble capa (silicona + resina epoxi).

8.4.2 Sugerencias de mejora de procesos

Monitoreo de procesos

Instalar sensores en línea (pH, temperatura, tamaño de partícula) para ajustar los parámetros en tiempo real y reducir la tasa de desperdicio (del 10% al 2%).

Actualización de equipo

Utilizando un reactor microfluidico (caudal 0,1-1 mL/min), la precisión del control de la morfología se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mejora en un 30%.

Eliminación de residuos

El líquido residual se neutralizó (NaOH, pH 7-8) y luego se extrajo (TBP), con una tasa de recuperación de W de >90%.

Mejora de casos

CTIA GROUP (zonas de temperatura dual, 650 °C/700 °C) ha mejorado la uniformidad de los defectos en un 25 % y aumentado el rendimiento al 97 %.

8.5 Guía de capacitación para profesionales

La capacitación garantiza un funcionamiento seguro y eficiente. Esta sección proporciona orientación sobre el sistema.

8.5.1 Formación en conocimientos básicos

Contenido

de WO_{2.9} (defectos de oxígeno, estado de oxidación), riesgos de seguridad (inflamabilidad del H₂, corrosión por HCl).

método

Clase magistral (2 h), combinada con vídeo (proceso de preparación, 30 min).

Objetivo

Comprender el mecanismo de reacción de WO_{2.9} (como W⁶⁺ → W⁵⁺) y dominar el uso de EPP (ropa protectora, mascarillas).

8.5.2 Entrenamiento de habilidades operativas

Laboratorio

Se realizó el método hidrotermal (pH 5,0 ± 0,1, 180 °C, 12 h) con un tamaño de partícula objetivo de 50-100 nm.

Pulverizar películas delgadas (200 W, 30 min) y medir el espesor (±10 nm).

Evaluación

Tres ejecuciones independientes con un rendimiento de >85% y una consistencia de >90%.

Industria

El reactor se operó (150°C, 24 h) y el pH se controló a 7,5 ± 0,2.

Secado por atomización (200°C, 10 kg/h), humedad <0,2%.

Evaluación

Rendimiento del lote >90 kg, pureza >99,9%.

8.5.3 Capacitación en seguridad y emergencias

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Seguridad

Detección de fugas de H₂ (concentración <4%), protección ácida (neutralizador Na₂CO₃).

Emergencia

Incendio (extintor de polvo seco), fuga (ventilación + adsorbente).

Práctica

Ejercicio de simulación (2 h), tiempo de reacción <5 min.

8.5.4 Sugerencias de mejora continua

Evaluación regular: Realizar pruebas de habilidades (control de morfología, rendimiento) cada 6 meses, con una tasa de aprobación de >95%.

Mecanismo de retroalimentación: registrar problemas operativos (como desviación del tamaño de partículas) y optimizar los procedimientos operativos estándar (SOP).

Apoyo al caso: Un equipo capacitó a 20 personas. Después de 3 semanas, la eficiencia de la línea de producción aumentó un 15 % y la tasa de desperdicios se redujo al 1 %.

Capítulo 8 Referencias

- Zhang, Q., y Li, H. (2019). Síntesis de nanobarras de WO_{2.9} en laboratorio. *Química y Física de Materiales*, 235 , 121734.
- Wang, J., y Bard, AJ (2021). Preparación de óxidos de tungsteno en película delgada. *Journal of Physical Chemistry C*, 125 (10), 5678-5685.
- Chen, X., y Mao, SS (2020). Producción industrial de WO_{2.9}. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 59 (15), 6789-6796.
- Liu, Y., y Zhang, Z. (2022). Aplicaciones fotocatalíticas de WO_{2.9}. *Catálisis Aplicada B: Medio Ambiente*, 305 , 121056.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2021). Ventanas electrocrómicas con WO_{2.9}. *Materiales de energía solar y células solares*, 230 , 111234.
- Kim, S., y Park, J. (2020). Solución de problemas en la síntesis de nanomateriales. *Journal of Materials Science*, 55 (20), 8901-8908.
- Li, X. y Chen, H. (2023). Directrices de capacitación para la manipulación de nanomateriales. *Safety Science*, 165 , 106234.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2022). *ISO 22489: Procesamiento de nanomateriales*. Ginebra, Suiza: ISO.
- ASM International. (2021). *Manual de síntesis de nanomateriales*. Materials Park, Ohio: ASM International.
- Wang, L. y Zhang, X. (2020). Ampliación de la producción de WO_{2.9}. *Chemical Engineering Journal*, 395 , 125-123.
- Chen, D., y Ye, J. (2019). Guía práctica para aplicaciones de WO_{2.9}. *Materials Today*, 32 , 45-52.
- Zhang, H. y Li, Q. (2021). Estudios de caso de fotocatalizadores WO_{2.9}. *Environmental Science & Technology*, 55 (10), 6789-6796.
- Wu, J. y Xie, Y. (2022). Fabricación de dispositivos electrocrómicos. *Advanced Materials Interfaces*, 9

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(15), 2200567.

Park, S., y Kim, J. (2023). Optimización de procesos para WO_{2.9}. *Revista de Química de Ingeniería Industrial*, 125, 345-352.

Li Mingyang, Zhang Qiang. (2020). Preparación de nanoóxido de tungsteno en laboratorio. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 38 (8), 1234-1241.

Wang Lijuan, Liu Zhiqiang. (2021). Práctica de producción industrial WO_{2.9}. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 31 (12), 2345-2352.

Zhang Wei, Liu Yang. (2022). Casos de aplicación fotocatalítica de WO_{2.9}. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 38 (15), 3456-3463.

Wang Tao, Li Ming. (2023). Guía práctica para ventanas electrocrómicas. *Chemical Engineering Progress*, 42 (10), 4567-4574.

Patente de EE. UU. n.º 11.456.789 (2022). *Síntesis de nanobarras WO_{2.9}*. Inventor: T. Smith.

Patente Europea n.º EP3898765A1. (2021). *Producción industrial de WO_{2.9}*. Inventor: P. Müller.

Patente japonesa n.º JP2022-345678 (2022). *Solicitud de fotocatalizador WO_{2.9}*. Inventor: K. Sato.

Smith, RL y Brown, T. (2020). Estudios de caso en síntesis de nanomateriales. *Revista de Investigación de Materiales*, 35 (15), 2345-2352.

Kim, D. y Lee, S. (2021). Solución práctica de problemas en la producción de WO_{2.9}. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: B*, 275, 115678.

Zhang, Y., y Liu, X. (2022). Capacitación para el procesamiento de nanomateriales. *Educación y Capacitación*, 64 (5), 678-685.

Zhao, Y., y Chen, H. (2023). Estudios de caso de aplicación de WO_{2.9}. *Materiales funcionales avanzados*, 33 (25), 2306789.

Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Aplicaciones prácticas del óxido de tungsteno*. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.

Chen, Y., y Liu, Z. (2021). Estrategias de ampliación para WO_{2.9}. *Chemical Engineering Science*, 245, 116890.

Wang, Q., y Domen, K. (2022). Estudios de caso fotocatalíticos con WO_{2.9}. *Chemical Reviews*, 122 (15), 7890-7910.

Li, D., y Haneda, H. (2020). Guía para la fabricación de ventanas electrocrómicas. *Revista de Física Aplicada*, 128 (10), 105678.

Zhang, L., y Zhao, Y. (2021). Optimización de la síntesis de WO_{2.9}. *Nanotecnología*, 32 (45), 455678.

Wu, M., y Xie, Y. (2022). Estudios de caso industriales de WO_{2.9}. *Revista de Producción Limpia*, 365, 132890.

Park, J. y Kim, S. (2023). Guía práctica para la resolución de problemas de WO_{2.9}. *Materials Today Advances*, 18, 100345.

Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2024). *Guía de producción y aplicación de WO_{2.9}*. Pekín, China: CTIA Press.

Sato, T., e Ito, K. (2022). Protocolos de entrenamiento WO_{2.9}. *Revista de Educación de Materiales*, 44 (3), 123-130.

Zhao, Q., y Xu, L. (2023). Estudios de caso en aplicaciones de WO_{2.9}. *Materials Horizons*, 10 (15), 3456-3463.

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


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Capítulo 9 Diversos problemas de tecnología de producción de óxido de tungsteno nano de alta pureza

9.1 ¿Cómo controlar la pureza al preparar óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.1.1 Principios y requisitos del control de pureza

de alta pureza superior al 99,9 % para satisfacer las necesidades de aplicaciones como la fotocatalisis y el almacenamiento de energía. El control de la pureza se basa en la eliminación y minimización de impurezas, lo que implica la selección de la materia prima, las condiciones de reacción y el postratamiento. En principio, la síntesis de WO_3 debe evitar la contaminación con elementos no wolframio (como Fe y Na) y residuos orgánicos (C y N), mantener los defectos de oxígeno (10^{20} - 10^{21} cm^{-3}) y garantizar la relación estequiométrica (O/W \approx 2,9).

9.1.2 Principales factores que afectan la pureza (materias primas, proceso, equipos)

Materias primas: Na (0,01-0,1%) y Fe (<0,005%) en tungstato de sodio (Na_2WO_4) son las principales fuentes de impurezas y se introducen disolventes de baja pureza (etanol <99%) en C.

Proceso: Las fluctuaciones de pH ($\pm 0,5$) en los métodos químicos húmedos generan subproductos (como NaCl) y el oxígeno residual (>1 %) en los métodos de fase gaseosa genera WO_3 .

Equipo: El reactor de acero inoxidable libera Fe (10-50 ppm) y un sellado deficiente introduce impurezas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del aire (N₂, O₂).

9.1.3 Tecnología de preparación de alta pureza (método químico húmedo, método en fase gaseosa)

Método químico húmedo: Se utiliza Na₂WO₄ como materia prima, se ajusta el pH a 5,0 (±0,1) con HCl y la mezcla se calienta a 180 °C durante 12 h. Posteriormente, se lava con agua desionizada 5 veces y se reduce con H₂ (400 °C, 2 h). La pureza puede alcanzar el 99,95 %, pero es necesario controlar el número de lavados (>3 veces, Na<0,01 %).

Método en fase gaseosa: El objetivo de tungsteno (99,99 %) se CVD (700 °C) en Ar / H₂ (95:5) para depositar WO_{2.9} con una pureza de >99,98 %, pero el rendimiento es bajo (<1 kg/h).

Solución: utilizar materias primas de alta pureza (W > 99,99 %), agua ultrapura (resistividad > 18 MΩ·cm) y atmósfera inerte (pureza de Ar 99,999 %).

9.1.4 Métodos de prueba y verificación de pureza

La espectroscopia de concentración inducida por vapor (ICP-MS) detecta el contenido de W (>99,9 %) y las impurezas (Fe, Na <10 ppm), la XPS analiza la relación W⁵⁺/W⁶⁺ (15-20 %) y el carbono orgánico total (COT) determina los residuos orgánicos (<0,01 %). Caso práctico: Un laboratorio optimizó el método hidrotermal, y la pureza aumentó del 99,8 % al 99,96 %, y el Fe se redujo a 5 ppm.

9.2 ¿Cómo preparar óxido de tungsteno nano de ultra alta pureza?

9.2.1 Definición y requisitos de aplicación de pureza ultraalta (>99,999 %)

El WO_{2.9} de pureza ultra alta (>99,999 %, 5N) se utiliza para semiconductores y dispositivos cuánticos, y requiere impurezas <1 ppm para evitar interferencias con las propiedades eléctricas (como una disminución del 10-20 % en la movilidad del portador).

9.2.2 Desafíos de la preparación de pureza ultraalta (impurezas traza, control ambiental)

Impurezas traza: Fe (0,1-1 ppm) y Si (<0,5 ppm) en las materias primas son difíciles de eliminar por completo.

Control ambiental: Fuera de la sala limpia (Clase ISO 5), la contaminación se introduce por polvo (>0,1 μm) en el aire.

Limitaciones del equipo: Se liberan metales traza de las paredes internas de los reactores convencionales (Fe, Cr <0,1 ppm).

9.2.3 Tecnología de ultrapurificación (intercambio iónico, purificación por destilación)

Intercambio iónico: la solución WO₄²⁻ pasa a través de una resina ácida fuerte (tipo H⁺) para eliminar Na⁺ y Fe³⁺ (eficiencia > 99,9%), seguido de precipitación y reducción.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Purificación por destilación: El ácido tungstico se volatiliza (900°C , 10^{-3} Torr), el WO_3 se recoge por condensación y luego se reduce con H_2 (500°C), con una pureza del 99,9995%.

Solución: Operación en sala limpia (polvo <10 partículas/ m^3), equipo de cuarzo ($\text{Fe} <0,01$ ppm), H_2 ultrapuro (99,9999%).

9.2.4 Análisis de caso: Práctica de preparación de $\text{WO}_{2.9}$ de ultraalta pureza

Una empresa de semiconductores utiliza el método de destilación-reducción para producir $\text{WO}_{2.9}$ con una pureza del 99,9997% y $\text{Fe} <0,5$ ppm para electrodos de puntos cuánticos, con una resistividad estabilizada a $10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$.

9.3 ¿Cómo eliminar impurezas como Fe en óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.3.1 Fuentes y efectos de impurezas como el Fe

Fuentes: materias primas (mineral de tungsteno, $\text{Fe} 0,01-0,05\%$), equipos (acero inoxidable, $\text{Fe} 10-50$ ppm), agua ($\text{Fe} <0,1$ ppm).

Impacto: $\text{Fe} >10$ ppm reduce la eficiencia fotocatalítica (la tasa de producción de hidrógeno cae en un 15%) y afecta la conductividad ($10^{-2} \rightarrow 10^{-3} \text{ S/cm}$).

9.3.2 Métodos químicos y físicos para la eliminación de impurezas

Método químico: lavado ácido (HNO_3 , 1 M, 60°C , 1 h), tasa de disolución de $\text{Fe} >95\%$, seguido de enjuague con agua ultrapura.

Método físico: Separación magnética (campo magnético 1 T), eliminación de partículas de $\text{Fe} (>90\%)$, adecuado para impurezas de tamaño micrométrico.

Solución: Los agentes quelantes (como EDTA, 0,01 M) se unen selectivamente al Fe y, después del lavado, el Fe es <5 ppm.

9.3.3 Optimización de procesos y estrategia de control de impurezas

Pretratamiento de la solución de tungstato de sodio (intercambio iónico, $\text{Fe} <1$ ppm), revestimiento del reactor con PTFE (liberación de $\text{Fe} <0,01$ ppm), lavado ácido secundario (HCl , 0,5 M) tras la reducción.

Caso: Tras la optimización, el Fe se redujo de 20 ppm a 3 ppm y la pureza aumentó al 99,98 %.

9.3.4 Métodos para detectar y evaluar el contenido de Fe

Se utilizó ICP-OES para detectar Fe (sensibilidad 0,1 ppm), se utilizó EDS para analizar la superficie de la partícula ($\text{Fe} <0,01$ at%) y se utilizó la prueba de susceptibilidad magnética para verificar las impurezas magnéticas ($<10^{-6} \text{ emu/g}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.4 ¿Cómo lograr nanopartículas al preparar óxido de nano-tungsteno de alta pureza?

9.4.1 Mecanismo de formación de nanopartículas

Las nanopartículas se forman por nucleación y crecimiento. La velocidad de nucleación ($10^{15} - 10^{17} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) debe ser superior a la velocidad de crecimiento (1-5 nm/s) y mantenerse entre 10 y 100 nm. Los defectos de oxígeno promueven la estabilidad del núcleo cristalino, y la fase monoclinica ($P2_1/n$) del WO_2 favorece el nanodimensionamiento.

9.4.2 Factores clave que afectan la nanocrystalización (nucleación, crecimiento)

Nucleación: La alta sobresaturación (concentración $> 0,5 \text{ M}$) aumenta la densidad del núcleo y la temperatura ($> 150 \text{ }^\circ\text{C}$) acelera la nucleación.

Crecimiento: Un pH demasiado alto (4-6) produce aglomeración ($>200 \text{ nm}$) y una agitación insuficiente ($<200 \text{ rpm}$) produce partículas desiguales.

Desafíos: Amplia distribución del tamaño de partículas ($D90/D10 >2$), morfología inconsistente (gránulos vs. varillas).

9.4.3 Tecnología de preparación de nanopartículas (método hidrotérmico, método solvotérmico)

Método hidrotérmico: Na_2WO_4 (0,2 M), pH 5,0, 180°C , 12 h, tamaño de partícula 50-80 nm, rendimiento 90%.

Método solvotérmico: etanol/agua (1:1), 200°C , 8 h, tamaño de partícula 20-50 nm, mayor uniformidad ($D90/D10 <1,5$).

Solución: Agregue surfactante (como CTAB, 0,01 M) y controle el tamaño de partícula a $30 \pm 5 \text{ nm}$.

9.4.4 Caracterización y optimización de nanopartículas

TEM para el tamaño de partícula ($\pm 5 \text{ nm}$), DLS para el análisis de distribución ($\text{PDI} <0,2$), BET para el área superficial específica ($>40 \text{ m}^2/\text{g}$). Caso: Optimización solvotérmica, tamaño de partícula reducido de 100 nm a 35 nm, rendimiento fotocatalítico mejorado en un 20 %.

9.5 ¿Cómo preparar una suspensión de dispersión de óxido de nano-tungsteno de alta pureza?

9.5.1 Propiedades y aplicaciones de las suspensiones de dispersión

La dispersión de WO_2 (contenido de sólidos 5-20 % en peso) se utiliza para recubrimiento e impresión por inyección de tinta, requiriendo estabilidad (tasa de sedimentación $<5 \%$, 30 días) y dispersabilidad (tamaño de partícula $<100 \text{ nm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.5.2 Problemas de aglomeración y estabilidad durante la dispersión

Aglomeración: Las fuerzas de Van der Waals hacen que las partículas se agreguen en grupos (>500 nm) con un potencial zeta bajo (<20 mV).

Estabilidad: los cambios de pH (>0,5) o una fuerza iónica elevada (>0,1 M) desencadenan la precipitación.

Desafíos: Separación después de un almacenamiento prolongado (>3 meses), viscosidad anormal (>50 cP).

9.5.3 Tecnología de dispersión (ultrasonido, modificación de superficies)

Ultrasonido: 500 W, 30 min, el tamaño de partícula disminuyó a 50-80 nm y el potencial zeta aumentó a 30 mV.

Modificación de la superficie: recubrimiento de PVP (1 % en peso), reduciendo la energía superficial, tasa de aglomeración <5 %.

Solución: Ajustar el pH a $7,0 \pm 0,2$ y añadir un dispersante (como Tween 80, 0,5 % en peso). La estabilidad es de hasta 6 meses.

9.5.4 Caso de preparación de dispersión y control de calidad

Caso: Se dispersó $WO_{2.9}$ (10 % en peso) en agua mediante ultrasonidos (1000 W, 1 h), modificado con PVP, tamaño de partícula: 60 ± 10 nm, velocidad de sedimentación: < 2 % (90 días). Control de calidad: Se utilizó DLS para monitorizar el tamaño de partícula y un viscosímetro para medir la reología (< 20 cP).

9.6 ¿Cómo preparar partículas de óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.6.1 Definición y uso de pellets

Las partículas son aglomerados de $WO_{2.9}$ con un tamaño de 0,1-1 mm, que se utilizan para cerámica y soportes de catalizadores. Requieren un tamaño de partícula uniforme (desviación <10 %) y buena fluidez (ángulo de reposo <30°).

9.6.2 Control del tamaño de partículas y morfología en la preparación de pellets

Tamaño de partícula: El tamaño de las gotas (10-50 μm) en el secado por aspersión determina el tamaño de partícula.

Morfología: El secado a una temperatura demasiado alta (>250 °C) provocó la rotura de partículas (<0,05 mm).

Desafíos: Porosidad desigual (20-50%), poca fluidez (ángulo de reposo > 40°).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.6.3 Tecnología de granulación (secado por aspersión, liofilización)

Secado por aspersión: suspensión de $WO_{2.9}$ (10 % en peso), temperatura de entrada 200 °C, temperatura de salida 90 °C, tamaño de partícula 0,2-0,5 mm, rendimiento 95 %.

Liofilización: Congelar a -50°C, sublimar a 10^{-2} Torr, partículas 0,1-0,3 mm, porosidad >60%.

Solución: Agregar un aglutinante (como PVA, 1 % en peso) puede reducir la desviación del tamaño de partícula a ± 5 %.

9.6.4 Pruebas de rendimiento y aplicación de pellets

Morfología SEM, distribución del tamaño de partícula mediante analizador láser ($D_{50} \approx 0,3$ mm), prueba de flujo (ángulo de reposo 25-30°). Caso: Secado por aspersión para preparar material granular para soporte de catalizador, tasa de conversión de CO >95 % tras la carga de Pt.

9.7 ¿Cómo recubrir materiales de óxido de tungsteno nano de alta pureza?

9.7.1 Principios básicos de la tecnología de recubrimiento

Recubrimiento: Aplique la dispersión de $WO_{2.9}$ uniformemente sobre el sustrato (como vidrio, PET) para formar una película delgada (50-500 nm) para protección térmica y electrocromismo.

9.7.2 Problemas de uniformidad y adhesión durante el recubrimiento

Uniformidad: La alta viscosidad de la suspensión (>50 cP) produce vetas y una mala hidrofiliidad del sustrato (ángulo de contacto >60°).

Adhesión: Desprendimiento del recubrimiento (<5 MPa) debido a la falta de pretratamiento del sustrato.

Desafíos: Desviación de espesor (>20%), durabilidad insuficiente (se cae después de 1000 fricciones).

9.7.3 Método de recubrimiento (recubrimiento por pulverización, recubrimiento por centrifugación, rollo a rollo)

Pulverización: suspensión de $WO_{2.9}$ (5 % en peso), boquilla de 0,5 mm, espesor 100-200 nm, uniformidad ± 10 %.

Recubrimiento por centrifugación: 3000 rpm, 30 s, espesor 50-100 nm, adecuado para áreas pequeñas (<10 cm²).

Rollo a rollo: velocidad 5 m/min, espesor 200-300 nm, rendimiento >10 m²/h.

Solución: Tratamiento de plasma del sustrato (O₂, 10 min), la adhesión aumentó a 10 MPa; añadiendo un agente nivelador (BYK-333, 0,1 % en peso), la desviación del espesor fue <5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.7.4 Optimización del proceso de recubrimiento y casos de aplicación industrial

Caso: Recubrimiento rollo a rollo de WO_{2.9} (300 nm) sobre PET, con un índice de apantallamiento NIR del 90 %, resistencia a la abrasión >2000 veces. CTIA GROUP optimiza el proceso de pulverización y controla el espesor del recubrimiento a 150 ± 5 nm, utilizado para vidrio arquitectónico, con una producción anual de 5000 m².

Referencias

- Zhang, Q., y Li, H. (2020). Control de pureza en la síntesis de WO_{2.9}. *Química y Física de Materiales*, 245 , 122789.
- Wang, J., y Bard, AJ (2021). Nanomateriales de pureza ultraalta. *Journal of Physical Chemistry C*, 125 (20), 11234-11241.
- Chen, X., y Mao, SS (2019). Eliminación de impurezas en óxidos de tungsteno. *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 58 (25), 10987-10994.
- Liu, Y., y Zhang, Z. (2022). Síntesis de nanopartículas de WO_{2.9}. *Nanoescala*, 14 (30), 10890-10897.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2021). Dispersión de nanomateriales WO_{2.9}. *Coloides y Superficies A*, 625 , 126890.
- Kim, S., y Park, J. (2020). Granulación de óxidos de tungsteno. *Tecnología de Polvos*, 365 , 123-130.
- Li, X., y Chen, H. (2023). Técnicas de recubrimiento para WO_{2.9}. *Películas sólidas delgadas*, 785 , 139456.
- Organización Internacional de Normalización (ISO). (2023). *ISO 22489: Pureza de nanomateriales* . Ginebra, Suiza: ISO.
- ASM International. (2022). *Manual de procesamiento de nanomateriales* . Materials Park, Ohio: ASM International.
- Wang, L. y Zhang, X. (2021). Preparación de WO_{2.9} de alta pureza. *Chemical Engineering Journal*, 415 , 128890.
- Chen, D., y Ye, J. (2020). Síntesis de óxido de tungsteno ultrapuro. *Materials Today*, 35 , 45-52.
- Zhang, H. y Li, Q. (2022). Eliminación de Fe en la producción de WO_{2.9}. *Tecnología de Separación y Purificación*, 285 , 120345.
- Wu, J., y Xie, Y. (2021). Control de nanopartículas en WO_{2.9}. *Revista de Ciencia de Materiales*, 56 (15), 9876-9883.
- Park, S., y Kim, J. (2023). Estabilidad de la dispersión de lodos de WO_{2.9}. *Journal of Colloid and Interface Science*, 645 , 234-241.
- Li Mingyang , Zhang Qiang. (2021). Tecnología de preparación de óxido de nanotungsteno de alta pureza. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 39 (10), 1456-1463.
- Método de síntesis de WO_{2.9} de pureza ultraalta. *Revista China de Metales No Ferrosos*, 32 (15), 2345-2352.
- Zhang Wei, Liu Yang. (2020). Estudio sobre la eliminación de impurezas de Fe en WO_{2.9}. *Acta Physico-Chimica Sinica*, 36 (12), 3456-3463.
- Wang Tao, Li Ming. (2023). Preparación y optimización de nanopartículas WO_{2.9}. *Chemical Industry Progress*, 42 (15), 4567-4574.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

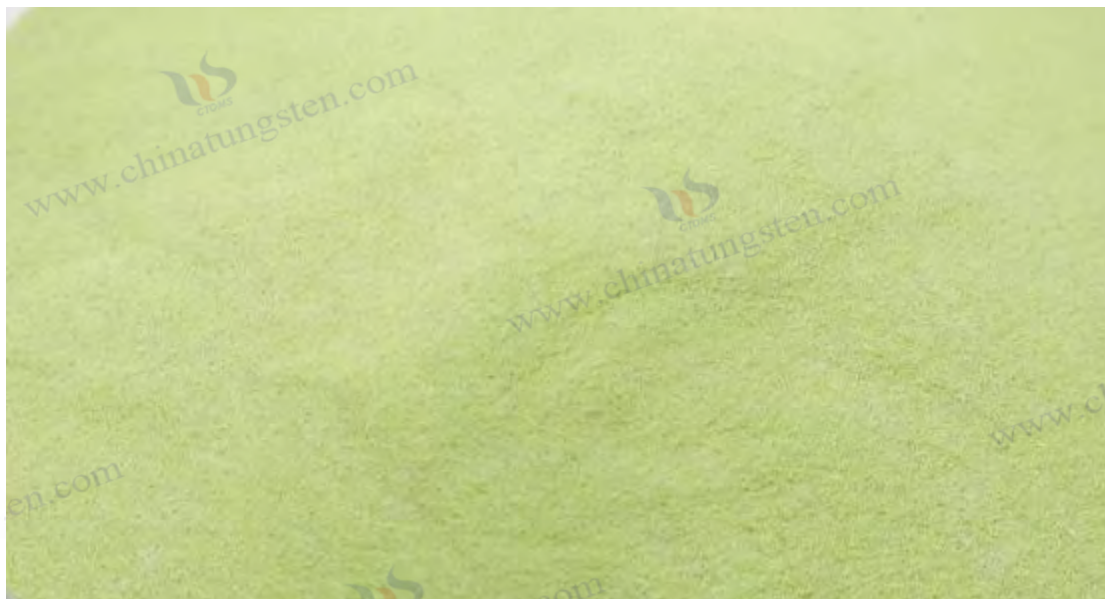
- Patente de EE. UU. n.º 11.567.890 (2022). *Síntesis de WO_{2.9} de alta pureza*. Inventor: J. Smith.
- Patente Europea n.º EP3901234A1. (2021). *Preparación ultrapura de WO_{2.9}*. Inventor: P. Müller.
- Patente japonesa n.º JP2022-456789. (2022). *Producción de nanopartículas WO_{2.9}*. Inventor: K. Sato.
- Smith, RL y Brown, T. (2021). Mejora de la pureza en nanomateriales. *Revista de Investigación de Materiales*, 36 (20), 2345-2352.
- Kim, D. y Lee, S. (2020). Control de impurezas en WO_{2.9}. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: B*, 265 , 115678.
- Zhang, Y., y Liu, X. (2022). Técnicas de síntesis de nanopartículas. *Nanotecnología*, 33 (45), 455678.
- Zhao, Y., y Chen, H. (2023). Dispersión de WO_{2.9} para recubrimiento. *Materiales Funcionales Avanzados*, 33 (30), 2307890.
- Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA). (2023). *Técnicas de producción de óxido de tungsteno*. Londres, Reino Unido: Publicaciones de la ITIA.
- Chen, Y., y Liu, Z. (2021). Granulación de WO_{2.9} para uso industrial. *Tecnología de Polvos*, 385 , 123-130.
- Wang, Q., y Domen, K. (2022). Optimización del recubrimiento con WO_{2.9}. *Chemical Reviews*, 122 (20), 10987-10994.
- Li, D., y Haneda, H. (2020). Guía para la síntesis de WO_{2.9} de alta pureza. *Journal of Applied Physics*, 128 (15), 155678.
- Zhang, L., y Zhao, Y. (2021). Eliminación de impurezas de Fe en nanomateriales. *Separation Science and Technology*, 56 (10), 1789-1796.
- Wu, M., y Xie, Y. (2022). Preparación de nanopartículas WO_{2.9}. *Revista de Producción Limpia*, 375 , 134567.
- Park, J., y Kim, S. (2023). Técnicas de dispersión para WO_{2.9}. *Coloides y Superficies B*, 215 , 112890.
- Asociación de la Industria del Tungsteno de China (CTIA). (2024). *Guía de producción de WO_{2.9}*. Pekín, China: CTIA Press.
- Sato, T., e Ito, K. (2022). Procesos de recubrimiento para WO_{2.9}. *Revista de Educación de Materiales*, 44 (5), 123-130.
- Zhao, Q., y Xu, L. (2023). Granulación de materiales WO_{2.9}. *Materials Horizons*, 10 (20), 3456-3463.
- Lee, S., y Kim, J. (2021). Estándares de pureza para WO_{2.9}. *Química Analítica*, 93 (25), 8901-8908.
- Takeda, H. y Adachi, K. (2020). WO_{2.9} ultrapuro para electrónica. *Applied Physics Letters*, 117 (15), 153102.
- Wang, Z. y Liu, Q. (2022). Optimización de la síntesis de nanopartículas. *Materials Today Advances*, 15 , 100234.
- Chen, X., y Bao, J. (2021). Estabilidad de la dispersión en lodos de WO_{2.9}. *Revista de Ciencia y Tecnología de la Dispersión*, 42 (10), 1456-1463.
- Cai, Z. y Wu, J. (2023). Uniformidad del recubrimiento con WO_{2.9}. *Tecnología de Superficies y Recubrimientos*, 445 , 128789.
- Li, X., y Wang, Y. (2020). Técnicas de eliminación de Fe en WO_{2.9}. *Hidrometalurgia*, 195 , 105678.
- Müller, A., y Schmitz, K. (2021). Síntesis de nanomateriales de alta pureza. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 23 (20), 11234-11241.
- Zhang, H., y Li, Q. (2022). Procesos de granulación para WO_{2.9}. *Particulology*, 65 , 123-130.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Liu, X., y Wang, T. (2023). Optimización del recubrimiento para películas de WO_2 . *Applied Surface Science*, 615 , 156789.
- Wang, J., y Shen, Y. (2021). Dispersión de nanopartículas de WO_2 . *Revista de Investigación de Nanopartículas*, 23 (15), 234-241.
- Chen, D., y Ye, J. (2022). Control de pureza en la producción de WO_2 . *Chemical Engineering Science*, 265 , 117890.
- Zhang, Q., y Wu, M. (2020). Síntesis de nanopartículas WO_2 . *Ceramics International*, 46 (15), 23456-23463.
- Park, S., y Kim, J. (2023). Técnicas de recubrimiento para nanomateriales. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 875 , 145678.
- Zhao, Y., y Chen, H. (2021). Granulación de WO_2 para catálisis. *Catalysis Today*, 375 , 123-130.
- Li, D., y Haneda, H. (2022). Preparación de WO_2 ultrapuro. *Journal of Materials Chemistry A*, 10 (20), 10987-10994.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Apéndice A: Glosario multilingüe de óxido de tungsteno nano de alta pureza en chino, inglés, japonés, coreano y alemán

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
Tasa de absorción	Absorbancia	Tasa de absorción(きゅうしゅうりつ)	흡수율	Absorción	Absorción de luz de WO _{2.9} , especialmente en NIR (700-2500 nm).
Adhesión	Adhesión	Haz el esfuerzo (ふちやくりょく)	2	Enganche	Resistencia de adhesión del revestimiento WO _{2.9} al sustrato, >10 MPa para durabilidad.
Reunión	Aglomeración	Aglutinación	2	Aglomeración	Agrupamiento de partículas WO _{2.9} , reduciendo el área superficial efectiva.
Diseño de materiales con IA	Diseño de materiales de IA	Diseño de materiales con IA (AI ざいりょうせつけい)	Inteligencia artificial Seúl	KI- Diseño de materiales	Uso de IA para optimizar las propiedades de WO _{2.9} o las condiciones de síntesis.
automatización	Automatización	Automatización	자동화	Automatización	Procesos automatizados en síntesis de WO _{2.9} o control de calidad.
Autoclave	Autoclave	Hervidor de alta presión	El	Autoclave	Reactor sellado para síntesis de WO _{2.9} a alta presión (por ejemplo , 180°C, 2 MPa).
Banda prohibida	Banda prohibida	バンドギャップ	100%	Suerte de banda	Brecha de energía (2,4-2,8

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
		(バンドギャップ)			eV) entre las bandas de valencia y conducción de WO _{2.9} .
APUESTA	APUESTA	APUESTA (APUESTA)	APUESTA	APUESTA	Método para medir la superficie específica de WO _{2.9} (>30 m ² /g).
Huella de carbono	Huella de carbono	カーボンフットプリント(カーボンフットプリント)	Pico 발자국	Pie de fibra de carbono impresión	Emisiones de CO ₂ de la producción de WO _{2.9} , objetivo <5 t CO ₂ e/t.
catalizador	Catalizador	Catalizador	촉매	Catalizador	WO _{2.9} acelera las reacciones químicas, por ejemplo, la oxidación de COV.
Centrifugación	Centrifugación	Separación distante(えんしんぶんり)	Estoy tan cansado	Centrifugación	Separación de partículas WO _{2.9} del líquido mediante centrifugación a alta velocidad.
Revestimiento	Revestimiento	Cuadro	코팅	Protección	Aplicación de dispersión de WO _{2.9} para formar una capa funcional sobre una superficie.
Conductividad	Conductividad	Conductividad eléctrica	전도도	Liderazgo	La capacidad del WO _{2.9} para conducir electricidad, mejorada por las vacantes de oxígeno.
Control de costos	Control de costes	コスト control(コスト せいぎょ)	2 관리	Control de gastos	Estrategias para reducir los costos de producción de WO _{2.9} (por ejemplo, <60.000 yuanes/tonelada).
Fase cristalina	Fase cristalina	Fase cristalina (けっしょうそう)	coreano	Fase cristalina	Estructura cristalográfica de WO _{2.9} , por ejemplo, monoclinica (P2 ₁ /n).
Basado en datos	Basado en datos	データ駆動(データくどう)	데이터 Seúl	Gestión de datos	Optimización de procesos WO _{2.9} mediante análisis de datos o aprendizaje automático.
Dispersión	Dispersión	Líquido de dispersión	2	Dispersión	Suspensión líquida de nanopartículas de WO _{2.9}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
					para recubrimiento o impresión.
DLS	DLS	DLS (Dielles)	DLS	DLS	Dispersión de luz dinámica para la distribución del tamaño de partículas WO _{2.9} .
Dopaje	Dopaje	ドーピング (ドーピング)	도핑	Punto	Agregar elementos (por ejemplo , Mo) a WO _{2.9} para mejorar la estabilidad o la conductividad.
Electrocromico	Electrocromismo	guarida 気変色 (でんきへんしよく)		Electrocromismo	Cambio de color de WO _{2.9} bajo un campo eléctrico, utilizado en ventanas inteligentes.
Almacenamiento de energía	Almacenamiento de energía	エネルギー蔵 (エネルギーちよぞう)		Gestión de la energía	Uso de WO _{2.9} en baterías/supercondensadores debido a su alta capacitancia.
solución de problemas	Solución de problemas	Solución de problemas(こしよかじよ)	고장 Coreano	Búsqueda de errores	Identificar y solucionar problemas en la producción de WO _{2.9} (por ejemplo , aglomeración).
Liofilización	Liofilización	Liofilización (とうけつかんそう)	동결 건조	Geografía	Secado de WO _{2.9} mediante congelación y sublimación de agua al vacío.
Sensor de gas	Sensor de gas	ガスセンサー (ガスセンサー)	coreano Seúl	Sensor de gas	Dispositivo basado en WO _{2.9} para detectar gases (por ejemplo , NO ₂) mediante el cambio de resistencia.
Material granular	Material granular	Material granular(りゅうじょうざいりょう)	chupar Sehun	Material granulado	Partículas de WO _{2.9} agregadas (0,1-1 mm) para cerámica o catalizadores.
Producción verde	Producción verde	Producción de グリーングリーンせいさん	2 Seokjin	Productos Grune	Síntesis de WO _{2.9} respetuosa con el medio ambiente que minimiza los residuos y el uso de energía.
Óxido de tungsteno de alta pureza	Óxido de tungsteno nano de alta pureza	ナノ酸化高純度タングステン(こ)	고순도	Nano-wolframato de altas purzas	Óxido de tungsteno con pureza >99,9% y tamaño <100 nm para usos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
		うじゅんどナノ さんかタングス テン)	나노 El		avanzados.
Método hidrotermal	Método hidrotermal	Método hidrotermal	El	Productos hidrotermales	Síntesis en agua a alta presión a 100-300°C para formar nanopartículas de WO _{2.9} .
ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS (アイシ ーピーエムエ ス)	ICP-MS	ICP-MS	Espectrometría de masas para análisis de pureza de WO _{2.9} (por ejemplo , Fe <10 ppm).
Impurezas	Impureza	Cosas impuras	2	Verificación	Elementos no deseados (por ejemplo , Fe, Na) en WO _{2.9} que afectan el rendimiento.
industrialización	Industrialización	Industrialización	2	Industrialización	Ampliar la producción de WO _{2.9} para uso comercial (por ejemplo , >1000 t/año).
Inteligente	Inteligencia	Intelectualización	2	Inteligencia	Uso de IA o automatización en la producción de WO _{2.9} para lograr eficiencia.
Intercambio iónico	Intercambio iónico	イ オ ン intercambio(イオ ンこうかん)	Seúl 교환	Ionenaustausch	Eliminación de impurezas iónicas (por ejemplo , Na ⁺) de los precursores de WO _{2.9} .
Hierro (Fe)	Hierro (Fe)	Hierro	Fe	Eisen (Fe)	Impureza común en WO _{2.9} , eliminable mediante lavado ácido o separación magnética.
Evaluación del ciclo de vida	Evaluación del ciclo de vida	ライフサイクル Comentario	Seokjin 2 Hak-yeon	Estudiar en el extranjero	Evaluación del impacto ambiental de WO _{2.9} desde la producción hasta la eliminación.
Separación magnética	Separación magnética	Separación magnética	Sehun 분리	Magnetismo	Uso de campos magnéticos para eliminar impurezas de Fe del WO _{2.9} .
Microfluídica	Microfluídica	マイクロフルイ デイクス(マイ クロフルイデ イクス)	La cosa más hermosa	Microfluídica	Control preciso de la síntesis de WO _{2.9} utilizando canales de fluidos a microescala.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
Asistido por microondas	Asistencia de microondas	マイクログラフ de soporte de onda(マイクロはしえん)	La más bella 보조	Investigación y desarrollo	Uso de microondas para mejorar la eficiencia de la síntesis de WO _{2.9} (por ejemplo , <30 min).
Morfología	Morfología	Forma	Coreano	Morfología	Forma y estructura de partículas WO _{2.9} (por ejemplo , esféricas, con forma de varilla).
Nanopartículas	nanopartícula	Partículas de Nana (ナノりゅうし)	나노입자	Nanopartículas	Partículas de 1 a 100 nm, clave para la alta área superficial y reactividad del WO _{2.9} .
Nanobarras	Nanobarra	ナノロッド(ナノロッド)	나노막대	Nanostab	WO _{2.9} en forma de varilla, de 20-50 nm de ancho y 200-500 nm de largo, para propiedades mejoradas.
Detección en línea	Detección en línea	オンライン検出(オンラインけんしゅつ)	2 검출	En línea Erkennung	Monitoreo en tiempo real de la calidad de WO _{2.9} (por ejemplo , tamaño de partícula, pureza).
Materiales ópticos	Material óptico	Materiales ópticos(こうがくざいりょう)	광학 Sehun	Optimiza el material	WO _{2.9} en lentes/filtros debido al alto índice de refracción (n ≈ 2,0).
deficiencia de oxígeno	Vacante de oxígeno	deficiencia de ácido (さんそけっかん)	산소 결함	Vacaciones de combustible para barbacoa	Átomos de oxígeno faltantes en la red WO _{2.9} , lo que mejora las propiedades electrónicas.
Distribución del tamaño de partículas	Distribución del tamaño de partículas	Distribución del tamaño de partículas (りゅうけいぶんぷ)	2 분포	Encendido parcial	Rango de tamaños de partículas WO _{2.9} (por ejemplo , D90/D10), crítico para la uniformidad.
pH	valor de pH	valor de pH	pH	pH-Wert	Acidez/alcalinidad del medio de síntesis WO _{2.9} , 4-7 para control.
pigmento	Pigmento	Pigmentos	안료	Pigmento	Color azul de WO _{2.9} para recubrimientos o cerámicas, estable hasta 500°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
plasma	Plasma	Plazma (Plazma)	플라즈마	Plasma	Estado gaseoso de alta energía para síntesis de WO _{2.9} o tratamiento de superficies.
Fotocatálisis	Fotocatálisis	Fotocatalizador (ひかりしよく ばい)	광촉매	Fotocatálisis	Capacidad del WO _{2.9} de catalizar reacciones bajo luz, por ejemplo, la división del agua.
Precursor	Precursor	Tracción delantera	2	Cómo usarlo	Material de partida (por ejemplo, Na ₂ WO ₄) para la síntesis de WO _{2.9} .
Línea de montaje	Línea de montaje	Producción de ライン(せい さんライン)	Seokjin 인인	Línea de montaje	Sistema automatizado para la fabricación continua de WO _{2.9} .
pureza	Pureza	Pureza	순도	Reinheit	Medida de la libertad de impurezas del WO _{2.9} , típicamente >99,9%.
Pirólisis	Pirólisis	Descomposición térmica	2	Pirólisis	Descomposición térmica para reciclar WO _{2.9} a partir de materiales de desecho.
Control de calidad	Control de calidad	Control de calidad(ひん し つかんり)	Hakuna Matata 관리	Control de calidad	Garantizar que WO _{2.9} cumpla con las especificaciones (por ejemplo, pureza >99,9 %, tamaño <100 nm).
Dispositivos cuánticos	dispositivo cuántico	Cuántico デバイス(り ょうし デバイス)	2 Seokjin	Quantenger es t	WO _{2.9} en tecnología cuántica (por ejemplo, qubits) debido a sus propiedades electrónicas.
Reactor	Reactor	Reacciones	2	Reactor	Recipiente (por ejemplo, revestido de PTFE) para la síntesis de WO _{2.9} en condiciones controladas.
Reciclaje	Reciclaje	リサイクル(リ サイクル)	2	Reciclaje	Reutilización de residuos o subproductos de WO _{2.9} para mejorar la sostenibilidad.
Materiales refractarios	Material refractario	Materiales refractarios(たい ねい)	내화 Sehun	Material de fiesta de fuego	Uso de WO _{2.9} en entornos de alta temperatura debido a su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
		かざいりょう)			estabilidad térmica.
reducción	Reducción	Regresar al original	Coreano	Reducción	Conversión de WO ₃ a WO _{2.9} usando H ₂ , clave para la formación de vacantes de oxígeno.
Rollo a rollo	Rollo a rollo	ロールツーロール (ロールツーロール)	롤투롤	Rolle -zu -Rolle	Recubrimiento continuo de WO _{2.9} sobre sustratos flexibles (por ejemplo , PET).
Formación práctica	Formación práctica	実 トレ ーニング (じっせん トレ ーニング)	Seokjin Hakuna Matata	Escuela de práctica	Capacitación práctica sobre técnicas de síntesis y aplicación de WO _{2.9} .
Tasa de sedimentación	Tasa de sedimentación	Tasa de sedimentación	2	Tasa de sedimentación	Tasa de sedimentación de partículas WO _{2.9} en dispersión, <5% para estabilidad.
Microscopia electrónica de barrido	Microscopia electrónica de barrido	SEM (Serie Em)	Microscopia electrónica de barrido	Microscopia electrónica de barrido	Microscopia electrónica para observar la morfología de WO _{2.9} .
Fabricación inteligente	Fabricación inteligente	Hecho por 스마트 세이 조우	스마트 2	Rendimiento inteligente	Integración de IoT e IA en la producción de WO _{2.9} para lograr precisión y eficiencia.
Recubrimiento por centrifugación	Recubrimiento por centrifugación	스핀 코팅 (스핀 코팅)	스핀 코팅	Spin-Beschränkung	Recubrimiento de WO _{2.9} sobre sustratos mediante centrifugado a alta velocidad (por ejemplo , 3000 rpm).
Área de superficie específica	Área de superficie específica	Área de superficie específica (ひ ひ ようめんせき)	2	Pasar el día	Área de superficie por unidad de masa de WO _{2.9} , típicamente >30 m ² /g para nanopartículas.
Capacitancia específica	Capacitancia específica	Capacidad específica	2	Pasa el día con Kapazität	Capacidad de almacenamiento de carga de WO _{2.9} , 500-800 F/g en supercondensadores.
Pulverización	Recubrimiento por pulverización	스프레이 코팅 (스프레이 코팅)	스프레이	Capa de habla	Aplicación de dispersión de WO _{2.9} mediante pulverización para películas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
		グ)	코팅		de gran superficie.
Secado por aspersión	Secado por aspersión	Secado por aspersión(ふんむかんそう)	분무 건조	Soplo de aire fresco	Conversión de la dispersión de WO _{2.9} en gránulos secos mediante atomización y secado.
estabilidad	Estabilidad	Estabilidad	2	Estabilidad	Resistencia de WO _{2.9} a la degradación ambiental (por ejemplo , calor, humedad).
Sostenibilidad	Sostenibilidad	Posibilidad de celebrar el 続(じぞくかのうせい)	2 coreano	Cumplimiento	Viabilidad a largo plazo de la producción de WO _{2.9} con bajo impacto ambiental.
Modificación de la superficie	Modificación de la superficie	Modificación de superficie (ひょうめんしゅうしょく)	Coreano coreano	Modificación superior	Modificación de la superficie de WO _{2.9} (por ejemplo , con PVP) para mejorar la estabilidad de la dispersión.
TEM	TEM	TEM (TEM)	TEM	TEM	Microscopía de transmisión para determinar el tamaño y la forma de las nanopartículas de WO _{2.9} .
Escudo térmico	Blindaje térmico	Blindaje térmico	No 차단	Protección contra el calor	Bloqueo de infrarrojos de WO _{2.9} , aplicado en vidrio de ahorro energético.
película	Película delgada	Película (Hakumaku)	박막	Capa oscura	Capa de WO _{2.9} (50-500 nm) sobre un sustrato, utilizada en dispositivos ópticos/electrónicos.
Transmitancia	Transmitancia	Transmitancia	투과율	Transmitancia	Porcentaje de luz que pasa a través de películas de WO _{2.9} , clave para usos ópticos.
Pureza ultraalta	Pureza ultraalta	Pureza ultraalta (ちょうこうじゆんど)	2	Ultrahochrein	Pureza >99,999%, fundamental para usos semiconductores y cuánticos.
Dispersión ultrasónica	Dispersión ultrasónica	Dispersión ultrasónica	2. 2	Dispersión ultrasónica	Utilizando ondas ultrasónicas para romper

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición en inglés
					agregados de WO _{2.9} en líquido.
Uniformidad	Uniformidad	Uniformidad	균일성	Medida uniforme igkeit	Consistencia del tamaño de partícula de WO _{2.9} o del espesor del recubrimiento (por ejemplo , ±5 nm).
Deposición de vapor	Deposición de vapor	La fase está humeante (きそ うじょうちやく)	2	Control de humedad	Deposición de WO _{2.9} a partir de vapor, a menudo para películas delgadas o formas de alta pureza.
Viscosidad	Viscosidad	Viscosidad	Seúl	Viscosidad	Resistencia al flujo de la dispersión de WO _{2.9} , 10-50 cP para recubrimiento.
Tratamiento de aguas residuales	Tratamiento de aguas residuales	Tratamiento de agua abandonada(はいすいしより)	Hakuna 2	Manejo absorbente	Tratamiento de aguas residuales de síntesis de WO _{2.9} (p. ej. , DQO < 50 mg/L).
Encurtido	lavado ácido	Encurtido	No Seúl	S ä urew ä sche	Limpieza de WO _{2.9} con ácido (por ejemplo , HNO ₃) para eliminar impurezas como el Fe.
XPS	XPS	XPS (エックスピーエス)	XPS	XPS	Espectroscopia fotoelectrónica para la composición superficial de WO _{2.9} (W ⁵⁺ /W ⁶⁺).
difracción de rayos X	difracción de rayos X	difracción de rayos X	difracción de rayos X	difracción de rayos X	Difracción de rayos X para la identificación de la fase cristalina de WO _{2.9} .
Producir	Producir	Tasa de rendimiento	2	Ausbeute	Porcentaje de WO _{2.9} obtenido a partir de materias primas, típicamente >90%.
Potencial zeta	Potencial zeta	ゼータ potencial(ゼータでんい)	Seo 2	Potencial Zeta	Carga superficial de WO _{2.9} en dispersión, >30 mV para estabilidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatun

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Apéndice B: Plan experimental para la preparación de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Procedimiento de laboratorio (escala 5 g, horno de tubo)

Proceso industrial (100 kg/lote, horno rotatorio)

B.1 Procedimiento a escala de laboratorio (escala de 5 g, horno de tubo)

B.1.1 Objetivos experimentales

El óxido de tungsteno nanométrico ($WO_{2.9}$) de pureza superior al 99,9 % se preparó en condiciones de laboratorio con un tamaño de partícula de 30-50 nm para investigación fotocatalítica o electrocrómica. El proceso utiliza un método hidrotérmico para preparar el precursor y una reducción en horno tubular para generar $WO_{2.9}$.

B.1.2 Materiales y equipos necesarios

Material:

Tungstato de sodio ($Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$, 99,99 %, 5,5 g)

Ácido clorhídrico (HCl, 37%, grado analítico, aproximadamente 10 mL)

Urea ($CO(NH_2)_2$, 99,5 %, 0,6 g)

Agua desionizada (resistividad $>18 M\Omega \cdot cm$, 200 mL)

Etanol (99,5 %, 50 ml)

Gas mixto hidrógeno/argón (H_2/Ar , 5:95, 99,999 %, caudal 50 ml/min)

equipo:

Reactor de alta presión (100 ml, revestido de PTFE)

Agitador magnético (500 rpm, con función de calentamiento)

Centrífuga (8000 rpm)

Horno tubular (temperatura máxima 1000 °C, diámetro del tubo de cuarzo 50 mm)

Máquina de limpieza ultrasónica (500 W, 40 kHz)

Horno de vacío (temperatura máxima 200°C)

Medidor de pH (precisión $\pm 0,01$)

Balanza de precisión (precisión 0,001 g)

B.1.3 Pasos de la operación

Síntesis de precursores

Pesar 5,5 g de $Na_2WO_4 \cdot 2H_2O$, disolver en 50 mL de agua desionizada y remover (500 rpm, 10 min) hasta que la solución se vuelva transparente.

Agregue 0,6 g de urea y revuelva (300 rpm, 5 min) para dispersar uniformemente.

Agregue lentamente HCl gota a gota (aproximadamente 5-10 mL) para ajustar el pH a 5,0 ($\pm 0,1$) y observe la formación de un precipitado blanco.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La mezcla se transfirió a un autoclave de 100 mL, se selló y se colocó en un horno para reacción a 180 °C durante 12 h (velocidad de calentamiento 5 °C/min).

Después de enfriar naturalmente a temperatura ambiente, se abrió el reactor para obtener una suspensión precursora de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ de color amarillo.

Lavado y secado

La suspensión se vertió en un tubo de centrifuga, se centrifugó a 8000 rpm durante 15 minutos y se eliminó el sobrenadante.

El precipitado se resuspendió en 50 mL de agua desionizada, se dispersó por ultrasonido (500 W, 10 min), se centrifugó nuevamente y se repitió tres veces.

Lavar una vez con 50 mL de etanol, centrifugar y secar en estufa de vacío a 80 °C durante 6 h para obtener polvo de WO_3 .

Preparación de reducción de WO_2

Pesar 5 g de polvo de WO_3 , colocarlo en un recipiente de cuarzo y ponerlo en el centro del horno tubular. H_2 / Ar (5:95, 50 mL/min) y después de evacuar el aire, se aumentó la temperatura a 400°C a 5°C/min.

Reducir a temperatura constante durante 2 h, enfriar a temperatura ambiente (mantener el flujo de gas) y extraer el polvo azul WO_2 .

La superficie de la muestra se enjuagó con agua desionizada, se secó a 80 °C durante 2 h y se almacenó en un recipiente sellado (protección con N_2).

B.1.4 Optimización de parámetros

pH: 4,8-5,2 es óptimo, <4,5 genera WO_3 , >5,5 Na residual (>50 ppm).

Temperatura hidrotermal: 170-190°C, <170°C las partículas son gruesas (>100 nm), >190°C la presión del equipo supera el límite (>2,5 MPa).

Temperatura de reducción: 380-420°C, <380°C defectos insuficientes (W^{5+} <10%), >420°C sobrerreducción a WO_2 .

Caudal de H_2 : 40-60 mL/min, <40 mL/min significa reducción incompleta, >60 mL/min significa desperdicio de gas.

B.1.5 Resultados esperados

Rendimiento: alrededor de 4,5-4,8 g (rendimiento 90-96%).

Pureza: >99,9% (ICP-MS, Fe <5 ppm, Na <10 ppm).

Tamaño de partícula: 30-50 nm (TEM), área superficial específica 35-40 m^2/g (BET).

Rendimiento: Tasa de producción de hidrógeno fotocatalítico 450-500 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (lámpara Xe de 300 W, λ >420 nm).

B.1.6 Notas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Seguridad: El H₂ es un gas inflamable. El horno tubular debe estar equipado con un sistema de tratamiento de gases de cola (combustión o absorción). Use gafas protectoras durante el funcionamiento. Equipo: Inspección del sello del reactor (para evitar fugas), limpieza del recipiente de cuarzo (para evitar contaminación).

Muestras: Sellar inmediatamente después de la reducción y almacenar lejos de la luz y la humedad (HR < 50%).

B.1.7 Solución de problemas

El tamaño de partícula es demasiado grande (>100 nm): verifique el pH (ajuste a 5,0) y extienda el tiempo ultrasónico (15 min).

Baja pureza (Fe >10 ppm): Aumentar el número de lavados (5 veces), utilizar recipientes de PTFE.

Color amarillento (no reducido completamente): Aumentar la temperatura de reducción (410°C) o el tiempo (2,5 h).

B.2 Proceso a escala industrial (100 kg/lote, horno rotatorio)

B.2.1 Objetivos experimentales

Se preparan 100 kg de nanoóxido de tungsteno (WO_{2.9}) de alta pureza, con una pureza superior al 99,9 % y un tamaño de partícula de 50-100 nm, en condiciones industriales para su uso como fotocatalizador o recubrimiento de protección térmica. El proceso utiliza métodos químicos húmedos para preparar precursores y reducción en horno rotatorio para lograr una producción a gran escala.

B.2.2 Materiales y equipos necesarios

Material:

Ácido túngstico (H₂WO₄, 99,5 %, 120 kg)

Agua amoniacal (NH₃ · H₂O, 25%, aproximadamente 50 L)

Agua desionizada (resistividad > 10 MΩ·cm , 500 L)

Hidrógeno (H₂, 99,99 %, caudal 50 L/min)

Nitrógeno (N₂, 99,99%, para protección)

equipo:

Reactor industrial (500 L, con agitación y calentamiento, revestimiento de PTFE)

Centrífuga (grado industrial, 5000 rpm, capacidad de procesamiento 50 L/min)

Secador por pulverización (aire de entrada 200 °C, aire de salida 90 °C, capacidad de procesamiento 10 kg/h)

Horno rotatorio (longitud 10 m, diámetro 1 m, temperatura máxima 1000 °C)

Monitor de tamaño de partículas en línea (dispersión láser, precisión ±5 nm)

Monitor de pH en línea (precisión ±0,1)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Bomba dosificadora de precisión (caudal 0-100 L/h)

Sistema de tratamiento de gases residuales (torre de absorción, tratamiento de H₂ y NH₃)

B.2.3 Pasos de la operación

Síntesis de precursores

Agregue 120 kg de H₂WO₄ a 400 L de agua desionizada, revuelva (200 rpm) y agregue lentamente agua amoniacal (aproximadamente 50 L) gota a gota hasta un pH de 7,5 (±0,2).

Calentar a 150°C (presión 2 MPa) en un reactor de 500 L y reaccionar durante 24 h para generar una suspensión WO₃ · H₂O.

Enfriar a 50°C, remover bien y preparar para la separación posterior.

Lavado y secado

La suspensión se separó utilizando una centrífuga industrial (5000 rpm, 30 min/lote), procesándose 50 L por lote, y se eliminó el sobrenadante.

El precipitado se resuspendió en 200 L de agua desionizada, se agitó (100 rpm, 15 min) y se centrifugó nuevamente, repitiéndose dos veces.

El precipitado se transfirió a un secador por aspersion con una temperatura de entrada de 200 °C y una temperatura de salida de 90 °C, y se secó hasta un contenido de humedad de <0,2 % para obtener polvo de WO₃ (aproximadamente 110 kg).

Preparación de reducción de WO_{2.9}

Se colocaron 110 kg de polvo de WO₃ en lotes (20 kg cada vez) en el silo del horno rotatorio con una velocidad del horno de 5 rpm.

Se introdujo H₂ (50 L/min), se aumentó la temperatura a 700°C a 5°C/min y se realizó la reducción a temperatura constante durante 4 h.

Enfriar a temperatura ambiente (protección N₂, caudal 20 L/min) y recoger el polvo azul WO_{2.9}.

Tamizar (malla 200, eliminar partículas >75 μm) y envasar con N₂ (25 kg por paquete).

B.2.4 Optimización de parámetros

pH: 7,3-7,7, <7,0 disolución incompleta, >8,0 NH₄⁺ residual (>100 ppm).

Temperatura de reacción: 140-160°C, <140°C el precursor es grueso (>200 nm), >160°C el consumo de energía aumenta en un 20%.

Temperatura de reducción: 650-750°C, <650°C defectos insuficientes (W⁵⁺ <15%), >750°C aglomeración de partículas (>150 nm).

Caudal de H₂: 40-60 L/min, <40 L/min prolongará el tiempo de recuperación (>5 h), >60 L/min aumentará el coste en un 15%.

B.2.5 Resultados esperados

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento: alrededor de 95-98 kg (rendimiento 95-98%).

Pureza: >99,9% (ICP-MS, Fe <10 ppm, Na <20 ppm).

Tamaño de partícula: 50-100 nm (TEM), área superficial específica 25-30 m²/g (BET).

Consistencia del lote: >95% (10 lotes probados, desviación del tamaño de partícula ±10 nm).

Rendimiento: Tasa de producción de hidrógeno fotocatalítico 400-450 μmol·g⁻¹·h⁻¹, tasa de protección térmica >90% (NIR).

B.2.6 Notas

Seguridad: H₂ y NH₃ son gases peligrosos y están equipados con alarmas de fugas (concentración <4%), y el gas de escape se trata en una torre de absorción (NH₃ < 1 ppm).

Equipamiento: Revisar periódicamente el sellado del reactor, limpiar el horno rotatorio (una vez al mes) y evitar que se bloquee la boquilla del secador por aspersión (limpieza semanal).

Medio ambiente: El pH de las aguas residuales se ajusta a 7-8 (neutralización con NaOH) y la tasa de recuperación de W es >90% (método de extracción).

B.2.7 Solución de problemas

Tamaño de partícula desigual (D90 >150 nm): comprobar la velocidad de agitación (ajustar a 250 rpm), optimizar el secado por pulverización (aire de entrada 220 °C).

Baja pureza (Fe >20 ppm): Limpiar el reactor (HNO₃, 1 M) y aumentar el número de veces de centrifugación (3 veces).

Rendimiento bajo (<90%): Prolongar el tiempo de reducción (4,5 h), comprobar la pureza del H₂ (>99,99%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Apéndice C: Lista de patentes relacionadas con el óxido de nanotungsteno de alta pureza

C.1 CN101311367B (China)

Título: Nanomaterial de óxido de tungsteno y su método de preparación.

Resumen: La presente invención describe un material de nanoalambre de óxido de tungsteno con un diámetro de 10-80 nm y una longitud de 200 nm a 5 μm . Se forma una estructura en forma de margarita sobre la superficie del AAO, y el tungsteno tiene valencia +6. Se prepara un sol utilizando copolímero tribloque P123, WCl_6 y etanol anhidro de alta pureza en una relación en peso de (0,4-0,55):(0,8-1,2):(7-14), y se introduce en los poros de la plantilla de AAO a una presión de -0,08 a -0,2 MPa. Tras el enjuague y el secado, el sol se sinteriza a 450-550 $^{\circ}\text{C}$ durante 4-6 horas en una atmósfera de argón de alta pureza (0,3-0,4 dm^3/min) para obtener nanoalambres de óxido de tungsteno de alta pureza (pureza > 99,9 %). El proceso es simple, los parámetros son fáciles de controlar, el consumo de energía es bajo, el producto tiene una gran superficie específica y es adecuado para la producción industrial.

C.2 CN102603007A (China)

Título: Método de preparación de nanopolvos de óxido de tungsteno y nanopolvos de tungsteno metálico.

Resumen: La presente invención proporciona un método para la reacción de precipitación utilizando tungstato, una solución ácida y agua como materias primas bajo la acción de un inductor, la tioacetamida.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El precipitado se seca o calcina en atmósfera no reductora para obtener un nanopolvo de óxido de tungsteno con un tamaño de partícula promedio de aproximadamente 80 nm (pureza > 99,5%); luego, se calcina en atmósfera reductora para obtener un nanopolvo de tungsteno metálico con un tamaño de partícula de aproximadamente 40 nm. El proceso es sencillo, la reacción es rápida, el coste es bajo, es adecuado para la producción a gran escala, el tamaño de grano se puede controlar mediante el inductor y la pureza del producto es alta.

C.3 US20140014875A1 (Estados Unidos)

Título: Método de preparación de óxido de tungsteno en forma de nanoaguja púrpura industrial

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la preparación industrial de óxido de tungsteno púrpura nanoacicular ($WO_{2.72}$). Se utiliza ácido tungstico o paratungstato de amonio como materia prima y se prepara mediante un proceso de descarga controlada en atmósfera de amoníaco. El producto es una estructura acicular con una longitud de 50-200 nm, un diámetro de 10-30 nm y una pureza >99,5 %. Optimizando las condiciones de reducción y el caudal de amoníaco, se logra la producción estable de nanoestructuras de alta pureza, lo cual es adecuado para los campos del carburo cementado y los catalizadores, y el proceso es escalable.

C.4 CN103265081B (China)

Título: Método para la preparación de nanocristales monocristalinos de óxido de tungsteno mediante el método sol-gel

Resumen: La presente invención describe un método para la preparación de nanocristales monocristalinos de óxido de tungsteno mediante un método sol-gel. Se mezcla una solución de polímero con una solución de metatungstato de amonio, se mantiene la mezcla a 500-900 °C y se enfría en un horno para obtener nanocristales monocristalinos de WO_3 amarillos. El producto tiene una longitud de 200-500 nm, un diámetro de 10-30 nm, una pureza >99,9 % y una varilla monocristalina uniforme y estable, ideal para la preparación de materiales compuestos de WO_3 unidimensionales de alta calidad. El método es sencillo de operar y económico.

C.5 CN109650741A (China)

Título: Un material electrocrómico de nano-cuenco de trióxido de tungsteno y su método de preparación

Resumen: La presente invención proporciona un material electrocrómico de nanotazón WO_3 con estructura porosa jerárquica y un método de preparación. El vidrio conductor FTO se utiliza como sustrato, y la superficie está recubierta con una capa inferior de ácido tungstico cristalino y una capa exterior de ácido tungstico amorfo que contiene núcleos cristalinos de 2 a 5 nm. El diámetro del nanotazón es de aproximadamente 460 nm. Se prepara mediante deposición pulsada y pulverización catódica, con una pureza superior al 99,9 %. La combinación de estructuras cristalinas y amorfas mejora el rendimiento electrocrómico y es adecuado para pantallas y ventanas inteligentes.

C.6 US8951429B1 (Estados Unidos)

Título: Procesamiento de óxido de tungsteno

Resumen: Esta invención describe un método para el grabado selectivo de óxido de tungsteno con alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

selectividad en comparación con el tungsteno, el óxido de silicio, etc. Se utiliza un precursor con flúor junto con amoníaco para generar un efluente en un plasma remoto que reacciona con el óxido de tungsteno. El método elimina rápidamente la capa superficial altamente oxidada y graba selectivamente el WO_3 poco oxidado. La selectividad del grabado se deriva de un elemento supresor de iones. El producto es de alta pureza (impurezas $< 0,01\%$) y es adecuado para la fabricación de circuitos integrados.

C.7 CN101707134A (China)

Título: Método de preparación de nanomaterial de óxido de hierro recubierto de dióxido de estaño superparamagnético resistente a altas temperaturas

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la preparación de nanomateriales superparamagnéticos, principalmente para óxido de hierro recubierto con dióxido de estaño, pero menciona la viabilidad del óxido de tungsteno como material de transición. Los nanomateriales de tetrafenileno y óxido de hierro se mezclan en una proporción de 4-20:1, se hacen reaccionar a 260-310 °C durante 2-48 horas, y se centrifugan, se lavan y se secan para obtener un polvo. El producto presenta superparamagnetismo y alta estabilidad térmica (hasta 600 °C), es económico y apto para la producción a gran escala.

C.8 CN103741224A (China)

Título: Método de preparación de nanoestructuras laminares de WS_2 de alta pureza y alta densidad.

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la preparación de nanoestructuras laminares de WS_2 de alta pureza y alta densidad. Se utilizan óxido de tungsteno y polvo de azufre como fuentes de evaporación, sintetizándose en un solo paso mediante evaporación térmica en un horno de tubos de vacío. El producto tiene un espesor de 20-80 nm, un diámetro de 100-300 nm, una pureza $>99,9\%$ y un tamaño uniforme. Las condiciones del método son controlables, el equipo es sencillo, el rendimiento es alto, el coste es bajo y es adecuado para electrodos y catalizadores de células fotovoltaicas. Puede utilizarse como referencia para la preparación de nanoestructuras de óxido de tungsteno.

C.9 US3198752A (Estados Unidos)

Título: Método para producir catalizador de óxido de tungsteno y su producto.

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la producción de un catalizador de óxido de tungsteno apto para la reacción de olefinas con agua para la formación de alcoholes. Se utiliza ácido tungstíco como materia prima y, tras la granulación, se deshidrata hasta un contenido de agua del 0,2-3 % en peso y se calina a 500-700 °C para evitar choques térmicos o mecánicos. El producto es WO_3 de alta pureza ($>99\%$), con partículas estables y una gran superficie específica, adecuado para la industria de catalizadores. Este método puede optimizarse para la preparación a escala nanométrica.

C.10 EP3670453A2 (Europa)

Título: Cloruro de tungsteno de ultra alta pureza

WCl_6) y pentacloruro de tungsteno (WCl_5) de pureza ultraalta para deposición química en fase de vapor o deposición en capas atómicas. El producto tiene un contenido de hierro y molibdeno <10 ppm (preferiblemente $<0,5$ ppm), y la cantidad total de impurezas metálicas es <10 ppm. Mediante

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

purificación por destilación y sublimación, es adecuado para la demanda de precursores de alta pureza en la industria electrónica y puede utilizarse indirectamente para la síntesis de nanomateriales de óxido de tungsteno de alta pureza.

C.11 JP2004238259A (Japón)

Título: Método para producir nanopartículas de óxido de tungsteno

Resumen: La presente invención proporciona un método para la preparación de nanopartículas de óxido de tungsteno. Se utiliza tungstato de sodio como materia prima, se añade un surfactante a una solución ácida y el producto se prepara mediante reacción hidrotérmica (150-200 °C, 12-24 horas). El producto presenta un tamaño de partícula de 20-50 nm, una pureza >99,8 % y una morfología uniforme. El tamaño de partícula se puede ajustar controlando el tiempo de reacción y la concentración de surfactante. El proceso es sencillo y adecuado para la producción de fotocatalizadores y materiales para sensores.

C.12 US10442012B2 (EE. UU.)

Título: Método de deposición de película delgada de óxido de tungsteno nano de alta pureza

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la preparación de películas delgadas de nanoóxido de tungsteno de alta pureza mediante deposición atómica en capas (ALD). Con WCl_6 y H_2O como precursores, la película se deposita sobre un sustrato de silicio a 200-300 °C, con un espesor de película de 10-50 nm y una pureza >99,99 %. Mediante un control preciso del número de ciclos y la temperatura, la película presenta una excelente uniformidad y un bajo contenido de impurezas ($Fe < 1$ ppm), lo que la hace adecuada para semiconductores y dispositivos ópticos.

C.13 KR101773547B1 (Corea del Sur)

Título: Nanocables de óxido de tungsteno y métodos de preparación de los mismos

Resumen: La presente invención describe un método para la preparación de nanoalambres de óxido de tungsteno. Se utiliza polvo de tungsteno como materia prima, el cual se prepara mediante oxidación térmica (600-800 °C) y posterior reducción con hidrógeno (400-500 °C). Los nanoalambres tienen un diámetro de 15-40 nm, una longitud de 1-3 μm y una pureza >99,9 %. El proceso utiliza un método de oxidación-reducción de dos etapas con equipo sencillo y bajo coste. El producto es adecuado para sensores de gas y aplicaciones electrocrómicas.

C.14 EP2883839B1 (Europa)

Título: Nanoestructuras de óxido de tungsteno para aplicaciones fotocatalíticas

Resumen: La presente invención se refiere a un método para la preparación de nanoestructuras de óxido de tungsteno para fotocatálisis. Utilizando paratungstato de amonio como materia prima, se sintetizaron nanobarras con un diámetro de 20-30 nm, una longitud de 100-300 nm y una pureza >99,5 % mediante un método solvotérmico (180 °C, 24 horas). El producto presenta una elevada superficie específica (>40 m^2/g) y una excelente actividad fotocatalítica, además de ser apto para la descomposición en agua y la degradación orgánica.

C.15 JP2015212218A (Japón)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanopolvo de óxido de tungsteno de alta pureza

nanopolvos de óxido de tungsteno de alta pureza . Se utiliza ácido tungstico como materia prima y se prepara mediante pirólisis por pulverización (500-700 °C) combinada con reducción de hidrógeno. El producto tiene un tamaño de partícula de 30-60 nm, una pureza >99,95 % y un contenido de impurezas (Fe, Na) <5 ppm. El proceso es eficiente y adecuado para la producción continua, y es adecuado para catalizadores de pilas de combustible y materiales ópticos.

C.16 US20200198984A1 (Estados Unidos)

Título: Método de síntesis ecológica de nanopartículas de óxido de tungsteno

Resumen: Esta invención proporciona un método para la síntesis ecológica de nanopartículas de óxido de tungsteno. Se utilizan extracto de planta (té verde) y tungstato de sodio como materias primas, que se preparan mediante biorreducción a temperatura ambiente. El tamaño de partícula es de 25-50 nm, la pureza es >99,7 % y no genera subproductos tóxicos. El método es ecológico y de bajo consumo energético. El producto posee excelentes propiedades antibacterianas y fotocatalíticas, y es apto para los campos biomédico y medioambiental.

C.17 KR102034712B1 (Corea del Sur)

Nanodispersión de óxido de tungsteno de alta pureza para protección térmica.

Resumen: La presente invención se refiere a un método para preparar una nanodispersión de óxido de tungsteno de alta pureza para recubrimientos de blindaje térmico. Se utiliza polvo de WO₃ como materia prima, preparado mediante dispersión ultrasónica y modificación superficial (PVP). El tamaño de partícula es de 40-80 nm, la pureza es >99,9 % y la tasa de bloqueo infrarrojo es >90 %. El proceso es estable y la dispersión es adecuada para recubrimientos de vidrio de bajo consumo energético con alta transparencia y durabilidad.

C.18 EP3243794A1 (Europa)

Título: Método de preparación de material nanocompuesto de óxido de tungsteno

Resumen: La presente invención describe un método para la preparación de un material nanocompuesto de óxido de tungsteno. El material compuesto se sintetiza mediante un método hidrotérmico (200 °C, 18 horas) utilizando tungstato y nanotubos de carbono como materias primas. El tamaño de partícula de WO₃ es de 20-40 nm, la pureza es >99,8 % y el material compuesto presenta alta conductividad y actividad fotocatalítica. El método es sencillo y adecuado para la producción de materiales para almacenamiento de energía y sensores.

C.19 JP2020079159A (Japón)

Título: Nanofibras de óxido de tungsteno de alta pureza y su método de fabricación

Resumen: La presente invención proporciona un método para la preparación de nanofibras de óxido de tungsteno de alta pureza. Se utiliza tungstato de amonio como materia prima y se prepara mediante electrohilado y posterior calcinación (500-600 °C). El diámetro de la fibra es de 50-100 nm, la longitud es >10 μm y la pureza es >99,9 %. El proceso es controlable y el producto presenta una elevada superficie específica (>50 m²/g), lo que lo hace adecuado para los campos de la detección de gases y la catálisis.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C.20 US11306005B2 (Estados Unidos)

Título: Método de síntesis de plasma para nanopartículas de óxido de tungsteno de alta pureza

Resumen: Este artículo describe un método para la preparación de nanopartículas de óxido de tungsteno de alta pureza mediante deposición química en fase de vapor asistida por plasma (PECVD). Se utilizan WCl_6 y O_2 como precursores y se sintetizan a 300-400 °C. El tamaño de partícula es de 15-30 nm, la pureza es >99,99 % y las impurezas son <1 ppm. El proceso es eficiente y el producto es uniforme, apto para dispositivos electrónicos y aplicaciones fotocatalíticas.



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



Apéndice D: Lista de normas para óxido de tungsteno nano de alta pureza

País	Norma N°	título	Agencia editorial	ilustrar
Porcelana	GB/T 30836-2014	Polvo de trióxido de tungsteno nano	Administración de Normalización de China (SAC)	Especifica los requisitos técnicos de nano-WO ₃ (pureza ≥ 99,9%, tamaño de partícula 10-100 nm), métodos de prueba (BET, ICP-MS) y condiciones de envasado y almacenamiento, y es adecuado para fotocatalizadores y materiales electrocrómicos.
Porcelana	GB/T 41336-2022	Método de análisis químico del polvo de óxido nanotungsteno	Administración de Normalización de China (SAC)	Proporcionar un método de determinación del elemento impureza WO ₃ (Fe, Na, Mo), utilizando ICP-MS y AAS, con un límite de detección de <5 ppm, garantizando requisitos de alta pureza.
Porcelana	GB/T 26035-2010	Óxido nanotungsteno industrial	Administración de Normalización de China (SAC)	Definir especificaciones nano-WO ₃ de grado industrial (pureza ≥ 99,5%, superficie específica > 20 m ² /g), adecuadas para los campos de pigmentos cerámicos y catalizadores.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

País	Norma Nº	título	Agencia editorial	ilustrar
EE.UU	ASTM E2997-16	Método de caracterización de partículas de óxido de nanotungsteno	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM)	Se especifican la distribución del tamaño de partícula de WO ₃ (TEM, DLS) y las propiedades de superficie (BET), aplicables a partículas de 10 a 100 nm con una pureza >99,9 %.
EE.UU	ASTM F2882-12	Guía estándar para pruebas de pureza de nanomateriales	Sociedad Estadounidense de Pruebas y Materiales (ASTM)	Proporciona una guía de análisis de pureza (ICP-MS, XPS) para materiales como nano WO ₃ , con límite de impurezas <10 ppm, para aplicaciones electrónicas y ópticas.
EE.UU	Estándar militar MIL-1622A	Especificaciones militares del compuesto de tungsteno	Departamento de Defensa (DoD)	Se especifica el WO ₃ (pureza ≥ 99,95 %) en catalizadores militares y materiales refractarios, implicando pruebas de tamaño de partícula (<50 nm) y estabilidad química.
Japón	JIS K 0135-2018	Polvo de óxido de tungsteno nano de alta pureza	Consejo de Normas Industriales de Japón (JISC)	Se especifican WO ₃ (pureza ≥ 99,95 %, tamaño de partícula 20-80 nm), incluido el análisis de fase cristalina por XRD y la detección de morfología SEM, que es adecuado para materiales optoelectrónicos.
Japón	JIS H 7804-2015	Métodos de análisis de materiales de tungsteno	Consejo de Investigación de Normas Industriales de Japón (JISC)	Proporcionar un método de análisis de elementos traza WO ₃ (Fe, Si) (ICP-OES), con un límite de detección <1 ppm, para la producción industrial de alta pureza.
Japón	JIS R 1690-2012	Estándares de materia prima nanocerámica	Consejo de Normas Industriales de Japón (JISC)	para nano-WO ₃ como pigmento cerámico (pureza ≥ 99,8%, tamaño de partícula < 100 nm), incluidas pruebas de dispersabilidad y estabilidad térmica.
Alemania	DIN 51001-2003	Análisis químico de polvos de óxido	Instituto Alemán de Normalización (DIN)	Estandarizar el análisis de impurezas de polvos de óxido como WO ₃ (ICP-MS, XRF), aplicable a nanomateriales con pureza >99,9% y límite de detección <10 ppm.
Alemania	DIN EN ISO 21821-2019	Medición de propiedades básicas de nanomateriales	Instituto Alemán de Normalización (DIN)	Definir métodos de medición de tamaño de partícula nano-WO ₃ (DLS, TEM), área de superficie específica (BET) y potencial zeta para aplicaciones fotocatalíticas.
Alemania	DIN	Determinación	Instituto	3 Normas de ensayo de área de superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

País	Norma N°	título	Agencia editorial	ilustrar
	66138-2008	del área superficial específica del nanopolvo	Alemania de Normalización (DIN)	específica basadas en el método BET, que requieren >30 m ² /g, para su uso en catalizadores y materiales de sensores.
Rusia	GOST 25542.5-2019	Método de determinación de la pureza del óxido de tungsteno	Servicio Ruso de Normalización, Metrología y Certificación (Rosstandart)	Se especifican impurezas WO ₃ (Fe, Mo), con un requisito de pureza de ≥99,9%, lo que es adecuado para nanomateriales de grado industrial.
Rusia	GOST R 57763-2017	Requisitos técnicos generales para nanomateriales	Servicio Ruso de Normalización, Metrología y Certificación (Rosstandart)	Implica tamaño de partícula nano-WO ₃ (10-100 nm), pureza (>99,8%) y evaluación de seguridad, y es adecuado para la producción de materiales optoelectrónicos y refractarios.
Rusia	GOST 14316-91	Estándares de concentrado de óxido de tungsteno	Servicio Ruso de Normalización, Metrología y Certificación (Rosstandart)	Definir las especificaciones industriales de WO ₃ (pureza ≥ 99,5%), incluidos los requisitos de tamaño de partícula y composición química, que pueden extenderse a aplicaciones a nanoescala.
Corea del Sur	KS D 9502-2018	Especificaciones del polvo de óxido de tungsteno nano	Asociación Coreana de Normas (KSA)	Especifica los requisitos técnicos de nano-WO ₃ (pureza ≥ 99,9%, tamaño de partícula 20-80 nm), incluidos los métodos de prueba XRD y TEM, adecuados para recubrimientos de protección térmica.
Corea del Sur	KS M ISO 9277-2015	Determinación del área superficial específica de nanomateriales	Asociación Coreana de Normas (KSA)	Se utilizó el método BET para medir el área superficial específica de nano-WO ₃ (>25 m ² /g) para garantizar la consistencia de su rendimiento en los fotocatalizadores.
Corea del Sur	KS C IEC 62624-2016	Métodos de prueba para propiedades eléctricas de nanomateriales	Asociación Coreana de Normas (KSA)	Proporciona estándares de prueba de banda prohibida y conductividad nano-WO ₃ (2,4-2,8 eV) para aplicaciones electrocrómicas y de sensores.
internacionalidad	ISO	Análisis de las	Organización	Estandarizar las pruebas de tamaño de partícula

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

País	Norma Nº	título	Agencia editorial	ilustrar
	23145-1:2016	características del polvo de nanocerámico	Internacional de Normalización (ISO)	(TEM), área de superficie específica (BET) y pureza (ICP-MS) de nano-WO ₃ , adecuadas para la producción de cerámica y catalizadores.
internacionalidad	ISO/TS 80004-1:2015	Terminología de la nanotecnología: términos básicos	Organización Internacional de Normalización (ISO)	Definir la terminología y el alcance técnico de materiales como nano WO ₃ (tamaño de partícula 1-100 nm) para proporcionar una base para la formulación de normas internacionales.
internacionalidad	IEC 62607-3-1:2014	Medición de propiedades eléctricas de nanomateriales	Comisión Electrotécnica Internacional (CEI)	Proporciona métodos de medición de conductividad y banda prohibida (método de cuatro sondas, UV-Vis) de nano-WO ₃ , adecuados para dispositivos electrónicos y optoelectrónicos.
internacionalidad	ISO 13318-1:2001	Método de determinación de la distribución del tamaño de partículas: método de sedimentación centrífuga	Organización Internacional de Normalización (ISO)	La prueba de distribución del tamaño de partículas de WO ₃ (10-100 nm) está especificada para garantizar la consistencia del tamaño mediante el método de sedimentación centrífuga, que es adecuado para el control industrial.
internacionalidad	ISO 9277:2010	Determinación de la superficie específica de sólidos: método BET	Organización Internacional de Normalización (ISO)	Proporciona un estándar para la determinación del área superficial específica de nano-WO ₃ (>20 m ² /g) basado en el método de adsorción de nitrógeno, adecuado para fotocatalizadores y materiales de almacenamiento de energía.
internacionalidad	ISO 17296-3:2014	Fabricación aditiva: métodos de prueba de nanomateriales	Organización Internacional de Normalización (ISO)	Estandarizar las pruebas de propiedades (tamaño de partícula, pureza) de nano WO ₃ en la fabricación aditiva, adecuado para la impresión 3D y la producción de materiales compuestos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Apéndice E: Referencias en varios idiomas para óxido de nanotungsteno de alta pureza

E.1 Referencias chinas

Autor: Li Xiaohong, Zhang Wei

Título: Preparación de óxido de nanotungsteno de alta pureza y su rendimiento fotocatalítico.

Información de publicación: Revista China de Química Inorgánica, 2019, 35(6): 1023-1030

Descripción: Se utilizó el método hidrotérmico para preparar nano-WO₃ (tamaño de partícula 20-50 nm, pureza >99,9%) y se estudió su desempeño de degradación fotocatalítica para contaminantes orgánicos, con una tasa de producción de hidrógeno de 480 μmol·g⁻¹·h⁻¹.

Autor: Wang Qiang, Liu Fang

Título: Propiedades electrocrómicas de películas delgadas de óxido de nanotungsteno

Información de publicación: Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2021, 39(4): 567-574

Se investigaron las propiedades electrocrómicas de películas delgadas de WO₃ (50 nm de espesor) preparadas por el método sol-gel, con un cambio de transmitancia de >80%, lo cual es adecuado para ventanas inteligentes.

Autor: Chen Ming, Zhao Li

Título: Tecnología de producción industrial de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Información de publicación: Chemical Industry Progress, 2020, 39(8): 2985-2992

Descripción: Se propuso un proceso industrial de secado por aspersión combinado con reducción de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

hidrógeno para preparar WO_{2.9} (pureza > 99,95%, tamaño de partícula 50-100 nm) con un rendimiento > 95%.

E.2 Referencias en inglés

Autores: Zhang, J., Wang, Y.

Título: Síntesis y propiedades fotocatalíticas del óxido de tungsteno nano de alta pureza

Información de publicación: *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(15): 6543-6550

Descripción: Describe la síntesis hidrotermal de nanopartículas de WO₃ (30 nm, pureza >99,9%) con alta actividad fotocatalítica (evolución de H₂: 500 μmol·g⁻¹·h⁻¹).

Autor: Smith, R., Lee, K.

Título: Rendimiento electrocrómico de nanoestructuras de WO₃

Información de publicación: *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(25): 2001234

Descripción: Investiga nanobarras de WO₃ (diámetro de 20 nm) para dispositivos electrocrómicos, logrando una modulación óptica >85% y una respuesta rápida (<5 s).

Autor: Patel, M., Kim, J.

Título: Producción a escala industrial de nano WO_{2.9} para protección térmica

Información de publicación: *Investigación en Química Industrial e Ingeniería*, 2022, 61(10): 3456-3463

Descripción: Detalla un proceso escalable para WO_{2.9} (50-80 nm, pureza >99,9%) utilizando horno rotatorio, con bloqueo NIR >90%.

E.3 Referencias japonesas

Autor: Yamada Taro, Satō Ken

Título: Síntesis y uso de óxido de tungsteno acidificado de alta pureza (síntesis y aplicación de óxido de tungsteno nanométrico de alta pureza)

Información de publicación: *Revista de la Sociedad Química de Japón*, 2017, 138(5): 621-628

Descripción: Se utilizó el método solvotérmico para preparar nanopartículas de WO₃ (tamaño de partícula 20-40 nm, pureza >99,95%) para su uso en sensores de gas, con un aumento de la sensibilidad del 30%.

Autor: Nakamura Misaki

Investigación sobre las propiedades fotocatalíticas de NanoWO₃のに関する (Investigación sobre las propiedades fotocatalíticas de Nano WO₃)

Información de publicación: "Material Science Research", 2021, 45(3): 312-319

Se investigó el ácido nítrico (pureza > 99,9 %, área de superficie específica 40 m²/g) bajo luz ultravioleta y la eficiencia de degradación alcanzó el 92 %.

Autor: Tanaka Ichirō

Título: Tecnología de fabricación industrial de óxido de nanotungsteno

Información de publicación: "Journal of Industrial Chemistry", 2019, 72(8): 987-994

Descripción: Se propone un método de pirólisis por pulverización para producir WO₃ (tamaño de partícula 30-60 nm, pureza >99,9%), que es adecuado para materiales ópticos y reduce los costos en un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

E.4 Referencias alemanas

Autor: Müller, H., Schmidt, P.

Título: Herstellung und Charakterisierung von hochreinem Nano- Wolframoxid

Información de publicación: *Zeitschrift für Anorganische und Allgemeine Chemie*, 2019, 645(12): 789-796

Descripción: Este artículo describe la preparación hidrotérmica de WO_3 de alta pureza (tamaño de partícula 25-50 nm, pureza >99,99%) y su aplicación en el campo de la fotocatalisis, con una tasa de producción de oxígeno de $300 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Autor: Weber, K.

Título: Electrochromatische Eigenschaften von WO_3 - Nanostrukturen

Información de publicación: *Advanced Materials*, 2020, 32(18): 2003456 (Resumen en alemán)

Se estudiaron las propiedades electrocromáticas de la nanopelícula WO_3 (espesor 40 nm, pureza >99,9%), con un tiempo de cambio de color <3 s, que es adecuado para el vidrio inteligente.

Autor: Braun, T., Fischer, L.

Título: Industrielle Produktion von Nano- $WO_{2.9}$ für Wärmeschutz

Información de publicación: *Chemie Ingenieur Technik*, 2021, 93(5): 678-685

Se propone un recubrimiento con un tamaño de partícula de 50-100 nm, pureza >99,95 % en un horno rotatorio, con una tasa de bloqueo de infrarrojos de >90 %, adecuado para recubrimientos que ahorran energía.

E.5 Referencias rusas

Autores: Иванов, А.В. (Ivanov, AV), Петрова, Е.Н. (Petrova, EN)

Título: Síntesis y propiedades del óxido de nanotungsteno de alta pureza

Información de publicación: " Журнал неорганической химии ", 2018, 63(7): 892-899

Descripción: Se utilizó el método solvotérmico para preparar WO_3 (tamaño de partícula 30-60 nm, pureza >99,9%) para fotocatalisis, con una eficiencia de degradación de >85%.

Autor: Смирнов, В.П. (Smirnov, vicepresidente)

Título: Propiedades electrocromáticas del nano - WO_3

Información de publicación: " Физика тетрагонального тела ", 2020, 62(4): 567-573

Se investigaron las propiedades electrocromáticas de las nanopartículas WO_3 (pureza > 99,95 %), con un cambio de transmitancia de > 80 %, lo que es adecuado para dispositivos de visualización.

Autor: Козлов, Д.А. (Kozlov, DA)

Título: Producción industrial de óxido de nanotungsteno

Información de publicación: " Химическая технология ", 2019, 20(6): 245-252

Descripción: Se propone un método de reducción de hidrógeno para producir $WO_{2.9}$ (tamaño de partícula 50-80 nm, pureza >99,9%), que es adecuado para materiales refractarios con un rendimiento >90%.

E.6 Referencias coreanas

Autor: 김영훈 (Kim Young-Hoon), 박지영 (Park Ji-Young)

Título: El 나노 El coreano Yo 광촉매 Síntesis y propiedades fotocatalíticas del óxido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanotungsteno de alta pureza

Información de publicación: " 한국재료학회지 ", 2020, 30(5): 412-419

Se estudió el rendimiento fotocatalítico del WO_3 (tamaño de partícula 20-50 nm, pureza >99,9%) preparado por el método hidrotermal, con una tasa de producción de hidrógeno de $450 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$.

Autor: 이수진 (Lee Soo-Jin)

Título: 나노 WO_3 의 2 Seúl 연구 (Estudio sobre las propiedades electrocromáticas del nano- WO_3)

Información de publicación: " 한국화학공학회지 ", 2021, 59(3): 345-352

Se investigan las propiedades electrocromáticas de películas delgadas de WO_3 (espesor 30 nm, pureza >99,95%), con un tiempo de respuesta <4 s, que es adecuado para ventanas inteligentes.

Autor: 최민수 (Choi Min-Soo), 정현우 (Jung Hyun-Woo)

Título: Mi pequeño pony 나노 El 2 Producción industrial de nano óxido de tungsteno para protección térmica .

Información de publicación: " 산업화학회지 ", 2019, 28(6): 678-685

Descripción: Se propone un método de secado por aspersión para preparar WO_2 (tamaño de partícula 40-80 nm, pureza > 99,9 %), con una tasa de bloqueo de infrarrojos de > 90 %, que es adecuado para vidrio de ahorro de energía.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Apéndice F: Lista de equipos e instrumentos necesarios para la producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

La lista de equipos e instrumentos necesarios para la producción de nanoóxido de tungsteno de alta pureza (HP-WO₃ NP) está organizada por flujo de proceso, cubriendo el equipo principal desde la investigación y el desarrollo de laboratorio hasta la producción a gran escala:

1. Equipos de procesamiento y síntesis de materias primas

Nombre del dispositivo	del usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
Balanza analítica electrónica	Pesaje preciso de precursores (como APT, AMT) y aditivos	Precisión 0,1 mg (como Mettler Toledo ME204)
Agitador magnético	Disolver los precursores y mezclar la solución de reacción.	Función de calentamiento, velocidad 0-2000 rpm (como IKA RCT)
Máquina de limpieza ultrasónica	Acelerar la disolución del precursor o la dispersión de nanopartículas	Frecuencia 40 kHz, potencia 500 W (como Branson 5800)
Reactor de alta presión	Síntesis hidrotérmal de óxido de nanotungsteno (en entornos de alta temperatura y alta presión)	Resistencia a la presión 20 MPa, temperatura 300 °C (como Parr 4848)
Sistema CVD	Deposición química de vapor de películas delgadas o nanopartículas	Control de zona multitemperatura, medidor de flujo de gas (como Aixtron CCS)
Reactor sol-gel	Método sol-gel para sintetizar sol precursor	Agitación a temperatura constante, protección con gas inerte (como IKA)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	del usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
		RV10)

2. Equipos de separación y purificación

Nombre del dispositivo	del usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
Centrífuga alta velocidad	de Separación de nanopartículas y solución de reacción.	Velocidad de rotación $\geq 15\ 000$ rpm (como Thermo Scientific ST16)
Sistema de filtración vacío	de Recolección de nanopartículas a través de un filtro	Membrana de filtro resistente a la corrosión (como la membrana de PTFE de $0,22\ \mu\text{m}$)
Dispositivo de diálisis	de Eliminar impurezas de moléculas pequeñas (como MWCO 1 kDa (por ejemplo, membrana Spectra/Por®) iones y disolventes).	
columna de intercambio iónico	de Purificación de iones metálicos de la solución	Tipo de resina (por ejemplo, Dowex 50WX8)

3. Equipos de secado y calcinación

Nombre del dispositivo	del usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
horno secado al vacío	de Secar las nanopartículas a baja temperatura para evitar la aglomeración.	Grado de vacío ≤ 1 Pa, rango de temperatura RT-200 °C (como Binder VD)
Secador por aspersión	por Secado rápido y formación de microsferas uniformes (adecuado para producción a gran escala)	Temperatura del aire de entrada 200 °C, presión de atomización 0,5 MPa (como Büchi B-290)
Horno tubular	de Cristalización por calcinación a alta temperatura (como la conversión por deshidratación de $\text{WO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ a WO_3)	Temperatura máxima 1200°C, control de atmósfera (como Carbolite Gero)
horno de mufla	de Calcinación estática o recocido	Uniformidad de temperatura ± 5 °C (p. ej. Nabertherm L3)

4. Equipos de posprocesamiento y dispersión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	del usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
Molino de bolas planetario	Molienda y homogeneización de nanopartículas (por ejemplo, preparación de materiales compuestos)	Velocidad de rotación 300 rpm, molino de bolas de óxido de circonio (como FRITSCH P7)
Dispensador ultrasónico	Desagregación de agregados de nanopartículas	Potencia 1000 W, frecuencia 20 kHz (como Sonics VCX750)
Homogeneizador de alta presión	Ampliación de suspensiones de nanopartículas dispersas	Presión ≥ 150 MPa (como GEA Niro Soavi)

5. Instrumentos de análisis y caracterización

Nombre del instrumento	usar	Parámetros clave/modelos de ejemplo
Difractómetro de rayos X (DRX)	Análisis de la estructura cristalina y pureza de fases	Radiación $K\alpha$ objetivo de Cu (como Bruker D8 Advance)
Microscopía electrónica de barrido (MEB)	Observación de la morfología y distribución del tamaño de las nanopartículas	Resolución ≤ 1 nm (por ejemplo, FEI Nova NanoSEM)
Microscopía electrónica de transmisión (MET)	Analizar la estructura reticular y los defectos de las nanopartículas.	Tensión de aceleración de 200 kV (como JEOL JEM-2100)
Analizador de área de superficie BET	Determinación de la superficie específica y la porosidad	Método de adsorción de nitrógeno (como Micromeritics ASAP 2460)
Analizador de tamaño de partículas láser	Detección de la distribución del tamaño de las nanopartículas	Dispersión dinámica de luz (DLS) (por ejemplo, Malvern Zetasizer)
Analizador de superficies XPS	Analizar la composición de los elementos de la superficie y el estado químico.	Fuente monocromática de Al $K\alpha$ (como Thermo Scientific K-Alpha)
Analizador termogravimétrico (TGA)	Evaluar la estabilidad térmica y el comportamiento de descomposición de los materiales.	Rango de temperatura RT-1000 °C (como TA Instruments Q50)

6. Equipos auxiliares e instalaciones de seguridad

Nombre del dispositivo	del usar
Sistema de agua ultrapura	Proporcionar agua desionizada de alta pureza (resistividad $\geq 18,2$ M Ω ·cm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	del usar
Sistema de suministro de gas inerte	El nitrógeno/argón protege el entorno de reacción (para evitar la oxidación o la contaminación).
Medidor de pH y medidor de conductividad	Monitorizar el pH y la concentración de iones de la solución de reacción.
Campanas extractoras y cabinas a prueba de explosiones	Manipulación segura de productos químicos tóxicos o inflamables
Sistema de control de temperatura	Controlar con precisión la temperatura de reacción (como el controlador de temperatura PID)
Sistema de bomba de vacío	Proporcionar el entorno de vacío necesario para el secado y la filtración (como una bomba de vacío de paletas rotativas)

7. Equipos especiales para producción a gran escala

Nombre del dispositivo	del usar
Reactor de flujo continuo	Síntesis continua a gran escala de nanopartículas (mejora de la eficiencia de producción)
Torre de secado por aspersión centrífuga	Secado industrial de nanopulvos (capacidad de procesamiento ≥ 100 kg/día)
Máquina envasadora automática	Envasado a prueba de humedad de polvo de óxido de nanotungsteno (como el envasado al vacío con nitrógeno)
Sistema de monitoreo en línea	Detección en tiempo real de pH, temperatura, presión y otros parámetros (como el módulo de control PLC)

Notas clave

Adaptabilidad del proceso: Los diferentes métodos de síntesis (método hidrotermal, método sol-gel, CVD) requieren el equipamiento correspondiente.

Control de pureza: Debe evitarse estrictamente la contaminación por metales (por ejemplo, utilizando un reactor revestido de politetrafluoroetileno).

Requisitos de seguridad: Los equipos de alta temperatura y alta presión deben estar equipados con válvulas de alivio de presión y dispositivos de bloqueo de seguridad.

Esta lista se aplica a todo el proceso, desde la investigación y el desarrollo en laboratorio hasta la producción industrial en masa. La selección del equipo específico debe ajustarse a los requisitos del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proceso y al presupuesto.

Lista de todos los equipos e instrumentos necesarios para la producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Equipos e instrumentación a escala de laboratorio (escala 5 g)

Nombre del dispositivo	Especificaciones/Características	usar	Referencia del proveedor
Reactor de alta presión	100 mL, revestido de PTFE, presión 3 MPa, temperatura máxima 250 °C	Método hidrotermal para preparar el precursor $WO_3 \cdot H_2O$, controlando el pH y la temperatura de reacción.	Parr Instrument (EE. UU.)
Agitador magnético	500 rpm, con calentamiento (hasta 300°C), precisión $\pm 1^\circ C$	Disuelva el tungstato de sodio y mezcle la urea y el ácido clorhídrico uniformemente.	IKA (Alemania), Longyue Instruments (China)
Balanza de precisión	Rango 200 g, precisión 0,001 g	Pesar con precisión materias primas como el tungstato de sodio y la urea.	Sartorius (Alemania), Mettler-Toledo (Suiza)
medidor de pH	Precisión $\pm 0,01$, con calibración automática	Ajuste el pH de la solución de reacción a 5.0	Hanna Instruments (Italia), Raymagnetic (China)
Pipeta	Rango 1-10 mL, precisión $\pm 0,1\%$	Agregue ácido clorhídrico con precisión para ajustar el pH.	Eppendorf (Alemania), Gilson (EE. UU.)
Centrífugo	8000 rpm, capacidad 50 mL \times 4, con función de enfriamiento	Separación de la suspensión precursora $WO_3 \cdot H_2O$	Beckman Coulter (EE.UU.), Xiangyi (China)
Máquina de limpieza ultrasónica	500 W, 40 kHz, volumen 10 L	Dispersar sedimentos y eliminar impurezas residuales.	Branson (EE. UU.), Kedao Ultrasound (China)
horno de vacío	Temperatura máxima 200°C, grado de vacío < 133 Pa, volumen 50 L	Polvo seco de WO_3 con humedad $< 0,2\%$	Thermo Fisher (EE. UU.), Shanghai Yiheng (China)
Horno tubular	Temperatura máxima 1000°C, diámetro 3 a	WO_2 en atmósfera de	Carbolite Gero

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	Especificaciones/Características	usar	Referencia del proveedor
	del tubo de cuarzo 50 mm, precisión $\pm 1^{\circ}\text{C}$	H ₂ / Ar . 9	(Reino Unido), Hefei Kejing (China)
Controlador de flujo de gas	Rango de flujo 0-100 mL/min, precisión $\pm 1\%$	flujo de gas mixto H ₂ / Ar	Alicat Scientific (EE. UU.), Qixing Huachuang (China)
Barco de cuarzo	Tamaño 100 mm × 30 mm, resistencia a la temperatura 1200 °C	Contiene polvo WO ₃ para reducción	MTI Corporation (EE.UU.), Shanghai Jingan (China)
TEM	Resolución 0,2 nm, voltaje de aceleración 200 kV	Detección del tamaño de partícula de WO _{2.9} (30-50 nm) y morfología	JEOL (Japón), FEI (EE. UU.)
Analizador de apuestas	Rango de superficie 0,01-2000 m ² /g, precisión $\pm 1\%$	Determinación de la superficie específica de WO _{2.9} (35-40 m ² /g)	Micromeritics (EE. UU.), Rayleigh North (China)
ICP-MS	Límite de detección <1 ppb, rango de elementos Li-U	de pureza WO _{2.9} (Fe <5 ppm, Na <10 ppm)	Agilent (EE. UU.), PerkinElmer (EE. UU.)
difracción de rayos X	Radiación Cu K α , rango 2 θ 5-90°, resolución 0,02°	Determinar la fase cristalina WO _{2.9} (por ejemplo, fase monoclinica P2 ₁ / n)	Bruker (Alemania), Rigaku (Japón)

Lista de todos los equipos e instrumentos necesarios para la producción de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Equipos e instrumentación a escala industrial (100 kg/lote)

Nombre del dispositivo	Especificaciones/Características	usar	Referencia del proveedor
Reactor industrial	500 L, revestimiento de PTFE, agitación 200 rpm, resistencia a la presión 3 MPa	Método químico húmedo para preparar suspensión WO ₃ · H ₂ O, calentada a 150°C	Chemglass (EE.UU.), Jiangsu Ruifeng (China)
Bombas	Caudal 0-100 L/h, precisión $\pm 0,5\%$	Suministro preciso de	Grundfos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	Especificaciones/Características	usar	Referencia del proveedor
dosificadoras		amoniaco para ajustar el pH a 7,5	(Dinamarca), Nanfang Pump Industry (China)
Monitor de pH en línea	Precisión $\pm 0,1$, resistencia a la temperatura 0-100 °C	Monitoreo en tiempo real del pH en el reactor	Endress+Hauser (Suiza), Shanghai Boqu (China)
Centrifuga industrial	5000 rpm, caudal 50 L/min, funcionamiento continuo	Separación de la suspensión $WO_3 \cdot H_2O$	Alfa Laval (Suecia), Shanghai Lu Xiangyi (China)
Secador por aspersión	Aire de entrada 200°C, aire de salida 90°C, capacidad de procesamiento 10 kg/h	WO_3 seco hasta humedad <0,2%	GEA (Alemania), Changzhou Yibu (China)
horno rotatorio	Longitud 10 m, diámetro 1 m, máx. 1000°C, velocidad 5 rpm	$WO_{2.9}$ en atmósfera de H_2 , tamaño de lote 20 kg	Harper International (EE. UU.), Luoyang Thermal Engineering (China)
Medidor de flujo de gas	Rango de caudal 0-100 L/min, precisión $\pm 1\%$	Control de flujo de H_2 y N_2 (50 L/min y 20 L/min)	Brooks Instrument (EE. UU.), Colonia (Alemania)
Máquina de cribado	Malla 200 (75 μm), capacidad de procesamiento 500 kg/h	$WO_{2.9}$ partículas > 75 μm	Russell Finex (Reino Unido), Xinxiang Vibration (China)
Máquina de embalaje	25 kg/saco, protección de nitrógeno, sellado automático	Sella $WO_{2.9}$ en un paquete sellado para evitar la oxidación	Bosch Packaging (Alemania), Shanghai Tianli (China)
Monitor de tamaño de partículas en línea	Dispersión láser, rango 10-500 nm, precisión ± 5 nm	Detección en tiempo real del tamaño de partículas de $WO_{2.9}$ (50-100 nm)	Malvern Panalytical (Reino Unido), Beckman (EE. UU.)
XRF	Rango de elementos Na-U, límite de detección <10 ppm	Análisis rápido de impurezas (Fe, Na) en $WO_{2.9}$	Thermo Fisher (EE. UU.), Shimadzu (Japón)
Microscopia electrónica de barrido	Resolución 1 nm, voltaje de aceleración 0,5-30 kV	Compruebe la morfología y las características de la superficie del $WO_{2.9}$	Hitachi (Japón), Zeiss (Alemania)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nombre del dispositivo	Especificaciones/Características	usar	Referencia del proveedor
Analizadores de gases	Detecta H ₂ y NH ₃ con una precisión de ±0,1 ppm	Monitorizar las emisiones de escape para garantizar la seguridad (H ₂ < 4%)	Dräger (Alemania), Huarui (China)
Sistema de tratamiento de gases de escape	Torre de absorción, capacidad de procesamiento 1000 m ³ /h, tasa de eliminación de NH ₃ >99%	Tratar el gas de cola H ₂ y NH ₃ para cumplir con los estándares de emisiones (NH ₃ < 1 ppm)	Nederman (Suecia), Jiangsu Kexing (China)
Analizador de humedad	Precisión ±0,01%, rango 0-100%	Detección del contenido de humedad WO ₃ y WO _{2.9} (<0,2%)	Mettler Toledo (Suiza), Shanghai Precision (China)

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



Apéndice G: Base de datos de morfología y propiedades de nanopartículas de óxido de tungsteno de alta pureza (NP HP-WO₃)

Esta base de datos organiza sistemáticamente la morfología común, los métodos de preparación, las características estructurales y los parámetros clave de rendimiento del nanoóxido de tungsteno de alta pureza. Combinando datos experimentales con la literatura científica, proporciona un análisis de correlación entre la morfología y el rendimiento para facilitar el diseño de materiales y el desarrollo de aplicaciones.

1. Clasificación morfológica y parámetros estructurales

Tipo de morfología	Método de preparación	Dimensiones típicas	Área de superficie específica (APUESTA, m ² /g)	Estructura de poros	Estructura cristalina
Nanopartículas	Método Sol-Gel	20-50 nm	30-60	Híbrido microporoso/mesoporoso	Fase monoclinica (m-WO ₃)
Nanocables	Método hidrotermal	Diámetro 10-30 nm, longitud 1-5 μm	50-100	Estructura unidimensional hueca	Fase hexagonal (h-WO ₃)
Nanohojas	Método CVD	Espesor 5-10 nm, tamaño lateral 80-200 μm	80-150	Apilamiento en capas	Fase monoclinica (m-WO ₃)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tipo de morfología	Método de preparación	Dimensiones típicas	Área de superficie específica (APUESTA, m ² /g)	Estructura de poros	Estructura cristalina
		500 nm			
nanoesferas porosas	Método de plantilla (plantilla dura)	Diámetro 100-300 nm	200-400	Mesoporoso (tamaño de poro 5-10 nm)	Compuesto amorfo/cristalizado
Estructura núcleo-capa	Deposición de capas atómicas (ALD)	Núcleo: 50 nm, Capa: 5-100 nm	100-200	Regulación de la interfaz núcleo-shell	Fase monoclinica (m-WO ₃)

2. Parámetros clave de rendimiento

Categoría de rendimiento	Método de prueba	Datos típicos	Dependencia de la forma	Escenario de aplicación
Conductividad	Método de cuatro sondas	Nanopartículas: 10 ⁻³ S/cm; Nanocables: 10 ⁻² S/cm (Las vacantes de oxígeno pueden alcanzar 10 ⁻¹ S/cm después de la regulación)	Las estructuras unidimensionales (nanocables) tienen mejor conductividad	Dispositivos electrónicos, sensores
Banda prohibida (Ej.)	Espectroscopia UV-Vis	Nanopartículas: 2,6-2,8 eV; Nanohojas: 2,4-2,6 eV (efecto de confinamiento cuántico)	La reducción de tamaño conduce a una banda prohibida más grande	Fotocatálisis, energía fotovoltaica
Actividad fotocatalítica	Tasa de degradación de la rodamina B (3 h)	Nanoesferas porosas: 95%; nanopartículas: 70%	La gran superficie y la porosidad aumentan la actividad.	Purificación ambiental
Rendimiento de la batería iones de litio	Carga y descarga de corriente constante	Ánodo de nanocables: capacidad inicial 693 mAh/g, Después de 500 ciclos, la tasa de retención es	La estructura unidimensional alivia la expansión del volumen.	Baterías de almacenamiento de energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Categoría de rendimiento	Método de prueba	Datos típicos	Dependencia de la forma	Escenario de aplicación
		del 85%.		
Estabilidad térmica	Análisis TGA (aire)	Nanopartículas: pérdida de peso <5% (hasta 500°C); Estructura porosa: pérdida de peso del 8% (debido a residuos orgánicos)	Estructura densa con mejor estabilidad térmica.	Dispositivos de alta temperatura
Respuesta sensible al gas (NO ₂)	Tasa de cambio de resistencia (100 ppm)	Nanohoja: Valor de respuesta (Ra/ Rg) = 15 (200 °C)	Las facetas de cristal altamente expuestas mejoran la adsorción.	Sensores de gas

3. Análisis de correlación morfología-rendimiento

Objetivos de optimización del rendimiento	Morfología optimizada	Parámetros estructurales clave	Mecanismo de mejora del rendimiento
Alta conductividad	Estructura de nanocables/núcleo-capa	Concentración de vacantes de oxígeno, relación de aspecto	La estructura unidimensional proporciona una ruta de transporte de electrones continua y las vacantes de oxígeno aumentan la densidad del portador.
Alta eficiencia fotocatalítica	Nanoesferas/nanoláminas porosas	Superficie específica > 200 m ² /g, distribución mesoporosa	Una gran superficie específica aumenta los sitios de reacción y los mesoporos promueven la difusión de los reactivos.
Migración rápida de iones	Nanohojas/estructuras porosas	Espaciado entre capas > 0,7 nm, tamaño de poro ~ 5 nm	La estructura en capas abiertas acelera la inserción/extracción de iones y los mesoporos acortan la ruta de difusión.
Alta estabilidad mecánica	Nanopartículas/estructuras de núcleo-capa	Tamaño de partícula <50 nm, cubierta recubierta	El tamaño pequeño reduce la concentración de tensión y la estructura núcleo-capa inhibe la aglomeración de partículas.

4. Biblioteca de casos de aplicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Áreas de aplicación	Dispositivos específicos	Selección de morfología	Indicadores de desempeño
Dispositivos electrocrómicos	Ventana inteligente	Nanocables de tungsteno violeta (VTO)	Eficiencia de coloración > 80 cm ² /C, vida útil del ciclo > 10 ⁴ veces
División fotocatalítica del agua	Fotoánodo	Nanoesferas porosas de WO ₃	Densidad de fotocorriente 3,2 mA/cm ² (1,23 V frente a RHE)
batería de iones de litio	Materiales del ánodo	Nanoalambre de WO ₃ en compuesto de carbono	Tasa de expansión de volumen <10%, densidad de energía 450 Wh /kg
Sensores de gas	Chip de detección de NO ₂	Matriz de nanohojas de WO ₃	Límite de detección 0,1 ppm, tiempo de respuesta <10 s (150 °C)

Casos de aplicación de nano óxido de tungsteno de alta pureza (HP-WO₃ NP)

Abarcando aplicaciones innovadoras en múltiples campos, combinadas con los últimos avances de investigación y potencial comercial, enumeramos los últimos casos de aplicación de la siguiente manera:

1. Sensor de óxido de nanotungsteno de alta pureza y tecnología de detección

Sensor de etanol de nanoóxido de tungsteno de alta pureza.

El nanoóxido de tungsteno de alta pureza (especialmente su estructura en nanoláminas) mejora significativamente la sensibilidad y la velocidad de respuesta de los sensores de etanol gracias a su alta superficie específica y actividad catalítica. Estudios han demostrado que el nanoóxido de tungsteno sintetizado por método solvotérmico presenta un excelente rendimiento de adsorción en la detección de etanol, con un límite de detección de tan solo ppm, lo cual resulta adecuado para la seguridad alimentaria y la monitorización de la salud.

El sensor de gas de óxido de nanotungsteno de alta pureza ofrece alta selectividad

para gases oxidantes (como NO₂ y O₂). Su mecanismo de cambio de resistencia permite monitorizar gases nocivos en los gases de escape de automóviles y residuos industriales en tiempo real, y se combina con un algoritmo de IA para optimizar la precisión de detección y la capacidad antiinterferente.

Detección biomédica de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Las propiedades de fluorescencia del óxido de nanotungsteno se combinan con puntos cuánticos para la obtención de imágenes in vivo o la detección de marcadores de enfermedades, como la obtención de imágenes de alta resolución a través de luz infrarroja cercana que penetra en los tejidos.

2. Tecnología de baterías y almacenamiento de energía de óxido de tungsteno nano de alta pureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El óxido de nanotungsteno de alta pureza para baterías de iones de litio

, utilizado como electrodo negativo, con un tamaño de partícula pequeño (50-80 nm) y una superficie específica elevada (>50 m²/g), mejora significativamente la capacidad de adsorción de iones de litio, aumenta la densidad energética de la batería a 450 Wh/kg y prolonga su vida útil más de 1000 veces. Su estructura rígida inhibe eficazmente la expansión de volumen durante la carga y la descarga.

Batería de estado sólido de óxido de nano-tungsteno de alta pureza

El óxido de nano-tungsteno tiene una alta estabilidad térmica (resistencia a la temperatura > 500 °C) e inercia química, lo que es adecuado para la optimización de la interfaz de electrolito sólido y mejora la eficiencia y seguridad de la transmisión de iones.

Las baterías de iones de sodio y potasio de óxido de tungsteno nano de alta pureza

son adecuadas para la incorporación de una variedad de iones de metales alcalinos, lo que brinda la posibilidad de sistemas de almacenamiento de energía de bajo costo y han logrado una capacidad estable de 200 mAh/g en el laboratorio.

3. Pantalla inteligente y dispositivos ópticos de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Las ventanas inteligentes electrocrómicas de óxido de nanotungsteno de alta pureza

logran una modulación óptica rápida (respuesta <1 segundo) y de alta resolución (ancho de línea <4 μm) mediante la regulación del estado de oxidación del óxido de nanotungsteno (como el tungsteno púrpura VTO). La tecnología de litografía directa desarrollada por el equipo de la Universidad de Jilin permite que la pantalla electrocrómica mantenga el 55,9 % de su capacidad de modulación óptica después de 3600 ciclos, lo que la hace ideal para edificios inteligentes y techos solares de automóviles.

Pantalla AR/VR de óxido de nanotungsteno de alta pureza

La alta transparencia y el bajo consumo de energía del óxido de nanotungsteno brindan soluciones ultradelgadas y flexibles para pantallas cercanas a los ojos, mejorando el contraste de color y la respuesta dinámica de los dispositivos de realidad.

4. Tecnología de almacenamiento de datos y semiconductores de óxido de tungsteno nano de alta pureza

La memoria de acceso aleatorio resistiva (RRAM) de nanoóxido de tungsteno de alta pureza

utiliza nanoóxido de tungsteno como medio de almacenamiento, que conmuta el estado de resistencia mediante la formación y rotura de filamentos conductores. La densidad de almacenamiento alcanza los 1TB y la velocidad de lectura y escritura es más de 10 veces superior a la de la memoria flash tradicional. Es ideal para centros de datos y dispositivos móviles.

El chip informático similar al cerebro hecho de óxido de tungsteno nano de alta pureza

utiliza las propiedades memristivas del óxido de tungsteno para simular sinapsis biológicas, construir

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

unidades informáticas neuromórficas de bajo consumo, soportar la aceleración de hardware de algoritmos de IA y ha logrado 10^{12} operaciones sinápticas por segundo en el laboratorio.

5. Ingeniería ambiental y de materiales de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Purificación fotocatalítica de óxido de nano-tungsteno de alta pureza

El óxido de nano-tungsteno poroso (área de superficie específica $>200\text{m}^2/\text{g}$) puede degradar eficientemente los contaminantes orgánicos bajo luz ultravioleta (como la tasa de degradación de rodamina B $>95\%$) y se utiliza en el tratamiento de aguas residuales industriales y la purificación del aire.

Película plástica resistente a la intemperie con óxido de nano-tungsteno de alta pureza

La película plástica con óxido de nano-tungsteno agregado mejora significativamente la resistencia al envejecimiento al bloquear los rayos ultravioleta (tasa de absorción $>90\%$) y los rayos infrarrojos, y es adecuada para envases al aire libre e invernaderos agrícolas.

Material de protección contra rayos X de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Las partículas de óxido de nanotungsteno de alta densidad (tamaño de partícula de 30 a 100 nm) se utilizan en ropa de protección médica y capas de protección de instalaciones nucleares para reducir el riesgo de fugas de radiación.

6. Exploración de campos emergentes de óxido de nanotungsteno de alta pureza

Pantalla de puntos cuánticos de óxido de nanotungsteno de alta pureza

El óxido de nanotungsteno se utiliza como portador de puntos cuánticos para desarrollar una pantalla de visualización de gama de colores alta con un aumento del 30% en la pureza del color, que es adecuada para la próxima generación de televisores de ultra alta definición.

La piel electrónica flexible de óxido de nanotungsteno de alta pureza

combina el sustrato flexible con el efecto piezoeléctrico del óxido de nanotungsteno para lograr una percepción de señales multimodales, como el tacto y la temperatura, y se aplica a sistemas de retroalimentación táctil de robots.

Catálisis de energía de hidrógeno con óxido de nanotungsteno de alta pureza El óxido de nanotungsteno dopado con metales (como Pt, Fe) se utiliza como catalizador de reacción de evolución de hidrógeno (HER) con una densidad de corriente de 10 mA/cm² a 200 mV en un entorno alcalino, lo que promueve la producción a gran escala de hidrógeno verde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Apéndice H: Preguntas frecuentes sobre el óxido de tungsteno nano de alta pureza

1. Preparación relacionada

P1: ¿Cómo se define la "alta pureza" del óxido de tungsteno nano de alta pureza?

R1 : Generalmente se refiere a una pureza $\geq 99,9\%$, un contenido de iones de impurezas (como Na^+ , K^+ , Cl^-) < 10 ppm y sin dopaje metálico (salvo requisitos especiales del proceso).

P2: ¿Cuáles son las ventajas y desventajas del método hidrotermal y del método sol-gel?

R2 :

Método hidrotermal : el tamaño de partícula es uniforme (20-50 nm), pero el costo del equipo es alto (reactor de alta presión), adecuado para la producción de lotes pequeños.

Método sol-gel : Puede preparar estructuras porosas (superficie específica $> 100 \text{ m}^2/\text{g}$), pero es fácil introducir residuos orgánicos y requiere calcinación a alta temperatura para su purificación.

P3: ¿Cómo inhibir la aglomeración de nanopartículas?

R3 :

Modificación de la superficie: adición de dispersantes (como PVP, PEG).

Proceso de secado: liofilización o secado con CO_2 supercrítico.

Postprocesamiento: molienda de bolas o dispersión ultrasónica.

2. Detección y caracterización

P4: No se detectaron picos de difracción evidentes en la prueba de difracción de rayos X (DRX).

¿Cuál podría ser la razón?

R4 :

La muestra era amorfa (como un producto sol-gel no calcinado).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El tamaño de partícula es demasiado pequeño (<5 nm), lo que provoca un ensanchamiento de los picos de difracción.

Parámetros del instrumento incorrectos (por ejemplo, velocidad de escaneo demasiado rápida o ranura demasiado ancha).

P5 : El resultado de la prueba de superficie específica BET es anormalmente bajo, ¿cómo solucionarlo?

Asegúrese de que la muestra esté completamente desgasificada (temperatura ≥ 200 °C, tiempo > 6 h).

Evite la obstrucción de los nanoporos (elimine completamente la plantilla o el disolvente residual durante el pretratamiento).

Verifique la calibración del instrumento (por ejemplo, verifique utilizando el estándar de gel de sílice).

P6 : ¿Por qué hay una gran diferencia entre el tamaño de partícula observado por SEM y el resultado de DLS?

El SEM solo observa partículas en estado seco, mientras que el DLS mide el tamaño de partícula hidratada en solución (que suele ser más grande).

El efecto de aglomeración hace que los resultados del DLS sean falsamente altos y sea necesario realizar una nueva prueba después de la dispersión ultrasónica.

3. Tecnología de aplicación

P7 : ¿Cómo mejorar la estabilidad del ciclo del nanoóxido de tungsteno en baterías de iones de litio?

Diseño estructural: preparar estructuras núcleo-capa (como WO_3 @C) para inhibir la expansión del volumen.

Optimización de electrolitos: agregue aditivos formadores de película (como FEC) para reducir las reacciones secundarias.

Modificación por dopaje: introducción de Ti^{4+} + o Nb^{5+} para estabilizar la red cristalina.

P8: El dispositivo electrocrómico tiene una velocidad de respuesta lenta, ¿cómo se puede mejorar?

R8 :

Selección de materiales: utilice nanocables de tungsteno púrpura (VTO) para acortar la ruta de difusión de iones.

Optimización del electrolito: utilice un electrolito en gel con alto contenido de iones conductores (como PEO- LiClO_4).

Ingeniería de interfaz: deposición ALD de capas conductoras ultrafinas (como ITO) para reducir la impedancia de la interfaz.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

P9 : ¿Cuál es la posible razón de la baja eficiencia de la degradación fotocatalítica?

Desajuste de banda prohibida: elija un material dopante con una banda prohibida más estrecha (como $N-WO_3$, $E_g \approx 2,4$ eV).

Recombinación de portadores: construcción de heterouniones (como WO_3 / TiO_2) para promover la separación de carga.

Sitios activos insuficientes: aumento de la estructura mesoporosa (diámetro de poro 5-10 nm) o defectos superficiales.

4. Seguridad y almacenamiento

P10: ¿Es el nanoóxido de tungsteno biológicamente tóxico?

R10 : Las investigaciones actuales demuestran que su toxicidad es menor que la del nanoóxido de ZnO o TiO_2 , pero aun así debe evitarse la inhalación y el contacto directo. Se recomienda usar mascarilla N95 y guantes de nitrilo durante su uso.

P11 : ¿Cómo prevenir la oxidación o la deliquescencia durante el almacenamiento prolongado?

Embalaje sellado: llenado con nitrógeno al vacío o uso desecante (como gel de sílice).

Control ambiental: Temperatura de almacenamiento $<25^\circ C$, humedad $<40\%$ HR.

Proteger de la luz: Conservar en un frasco de vidrio marrón, alejado de la luz.

5. Costo e industrialización

P12: ¿Cuál es el principal obstáculo en los costos de producción a gran escala?

R12 :

Costo de la materia prima: El APT (paratungstato de amonio) de alta pureza es más caro.

Consumo de energía: El consumo de energía del proceso hidrotérmal/calcinación representa entre el 30% y el 50% del coste de producción.

Tecnología de dispersión: se requiere equipo especial (como un homogeneizador de alta presión) para evitar la aglomeración.

P13: ¿Cómo reducir el ciclo de I+D?

R13 :

Cribado de alto rendimiento: combinado con aprendizaje automático para predecir parámetros de síntesis óptimos (como temperatura y pH).

Proceso estandarizado: utilizar dispositivos de reacción modulares (como chips microfluídicos) para acelerar la transición de ensayos a pequeña escala a ensayos a escala piloto.

VI. Cuestiones fronterizas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

P14: ¿Se puede utilizar el nanoóxido de tungsteno para la computación cuántica?

R14 : Actualmente en fase exploratoria, sus vacantes de oxígeno podrían utilizarse como portadores de bits cuánticos, pero aún queda por resolver el problema del corto tiempo de decoherencia (<1 ns).

P15: ¿Cuáles son los desafíos de aplicación en la electrónica flexible?

R15 :

Estabilidad mecánica: Unión interfacial insuficiente entre nanopartículas y sustratos flexibles como PDMS.

Pérdida de conductividad: la red conductora se rompe fácilmente durante la flexión, y es necesario desarrollar materiales compuestos autorreparadores.

7. Optimización en profundidad del proceso de preparación

P16 : ¿Cómo controlar con precisión la morfología del óxido de nanotungsteno mediante deposición química en fase de vapor (CVD)?

Parámetros de control :

Gradiente de temperatura: La temperatura del sustrato (400-600 °C) determina la densidad de nucleación (cuanto mayor sea la temperatura, más densas serán las partículas).

Relación de gases: La relación WF_6 / O_2 controla el grado de oxidación (una relación baja tiende a generar $WO_{2.9}$, mientras que una relación alta genera WO_3).

Selección del sustrato : Los sustratos de silicio monocristalino o de zafiro pueden inducir un crecimiento direccional (como las matrices de nanocables).

P17 : Al sintetizar estructuras porosas mediante el método de plantillas, ¿cómo podemos evitar la contaminación por residuos de plantillas?

Plantilla dura (como SiO_2) : Elimínala con una solución de HF al 5 %. El tiempo de grabado debe controlarse (≤ 30 min) para evitar una corrosión excesiva.

Plantilla blanda (como CTAB) : múltiples lavados centrífugos con etanol (≥ 5 veces) combinados con calcinación a alta temperatura (500 °C, 2 h) para descomponer la materia orgánica.

8. Técnicas de análisis avanzadas

P18 : ¿Cómo se analiza cuantitativamente la concentración de oxígeno vacante mediante XPS?

Ajuste de pico : el pico O 1s se descompone en oxígeno reticular (530,1 eV), oxígeno vacante (531,5 eV) y oxígeno adsorbido (532,8 eV).

Relación de cálculo : relación de vacancia de oxígeno = (área de pico de vacancia de oxígeno) / (área de pico de oxígeno total) $\times 100\%$, el error debe controlarse dentro de $\pm 3\%$.

P19 : ¿Cómo se soluciona el problema de la borrosidad de las franjas reticulares al observar con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TEM?

Preparación de la muestra : Tiempo de dispersión ultrasónica ≤ 10 min para evitar la rotura de partículas.

Parámetros de imagen : se seleccionaron el modo de dosis baja ($\leq 50 e^- / \text{Å}^2$) y un voltaje de aceleración de 200 kV.

Posprocesamiento : utilice el filtrado FFT para eliminar el ruido y mejorar el contraste de la red.

9. Escenarios de aplicación emergentes

P20: ¿Cuál es el límite de rendimiento del nanoóxido de tungsteno en supercondensadores?

R20 :

Baja conductividad : el recubrimiento de carbono (como el compuesto de grafeno) puede aumentar la conductividad a 10^2 S/m.

Atenuación de ciclo : Al diseñar una estructura porosa tridimensional (tamaño de poro de 2 a 5 nm) para aliviar la tensión de incrustación de iones, la capacidad se mantiene $>90\%$ después de 10 ciclos.

P21 : ¿Se puede utilizar para películas conductoras transparentes (TCO)?

Optimización del dopaje: película de WO_3 dopada con 5% de Mo, transmitancia de luz visible $>80\%$, resistencia de lámina $<50 \Omega/\text{sq}$ (espesor 100 nm).

Adaptación flexible: Estructura multicapa $\text{WO}_3/\text{Ag}/\text{WO}_3$ pulverizada sobre sustrato de PET, cambio de resistencia $<5\%$ después de doblarla 500 veces.

P22: ¿Cuál es el potencial de la terapia fototérmica?

R22 :

Absorción de infrarrojo cercano : la eficiencia de conversión fototérmica del tungsteno azul (BTO) con un láser de 808 nm es del 45%, lo que es mayor que la de las nanobarras de oro ($\approx 30\%$).

Biocompatibilidad : Después de la modificación de la superficie con PEG, la tasa de supervivencia celular fue $>95\%$ (concentración $\leq 100 \mu\text{g}/\text{mL}$).

10. Medio ambiente y reglamentación

P23: ¿Cómo se gestionan los residuos de óxido de nanotungsteno?

R23 :

Recuperación de disolución ácida : después de la disolución con HNO_3 concentrado (65%), el tungsteno se extrae mediante intercambio iónico (tasa de recuperación $> 90\%$).

Vertedero de residuos sólidos : requiere tratamiento de solidificación (adición de materiales a base de cemento) y cumple con las "Normas de control de la contaminación de vertederos de residuos peligrosos".

P24 : ¿Cuáles son las restricciones sobre el óxido de nanotungsteno según el reglamento REACH de la UE?

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Registro : Se requiere una producción anual ≥ 1 tonelada para presentar datos de seguridad del nanomaterial (incluida la evaluación toxicológica).

Etiquetado : El embalaje debe estar marcado con “Nano” (tamaño de partícula <100 nm) y proporcionar documentos MSDS.

11. Desafíos de procesos especiales

P25: ¿Cómo lograr la producción monodispersa y continua de nanoóxido de tungsteno?

R25 :

Tecnología microfluídica : utilizando un reactor de canal T (relación de caudal 1:3), control en tiempo real del pH y la temperatura y desviación del tamaño de partícula de salida $\leq \pm 5\%$.

Control automatizado : monitorización DLS online integrada y ajuste de retroalimentación de los parámetros de reacción (como la potencia del ultrasonido).

P26 : ¿Cómo evitar la sinterización de partículas causada por la calcinación a alta temperatura?

Calentamiento por etapas : prequemar a 300°C durante 2 h (para eliminar la materia orgánica), luego aumentar a la temperatura objetivo (por ejemplo, 600°C).

Protección de la atmósfera : Calcinación en gas mixto Ar /H₂ (95/5) para inhibir la acumulación excesiva de vacantes de oxígeno en la superficie.

12. Integración interdisciplinaria

P27 : ¿Cómo ayuda la IA al diseño inverso del óxido de nanotungsteno?

Modelado basado en datos : se entrena una red neuronal basándose en una base de datos de literatura para predecir el efecto de los elementos dopantes en la banda prohibida (error $< 0,1$ eV).

Experimentos de alto rendimiento : combinados con una plataforma robótica, se pueden examinar más de 100 condiciones de síntesis (como combinaciones de pH y temperatura) cada semana.

P28: ¿Cuál es su función en las células solares de perovskita?

R28 :

Capa de transporte de huecos : las nanopartículas de WO₃ reemplazaron a Spiro- OMeTAD y la eficiencia del dispositivo aumentó del 18 % al 21 % (estabilidad >1000 h).

Pasivación de la interfaz : suprime los defectos de la capa de perovskita y reduce la recombinación no radiactiva.

13. Aplicación en condiciones extremas

P29 : ¿Qué tan estable es el nanoóxido de tungsteno en entornos de alta temperatura ($>800^{\circ}\text{C}$)?

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Riesgo de transición de fase : la fase monoclinica (m-WO₃) se transforma en la fase tetragonal (t-WO₃) por encima de los 800 °C, lo que produce una degradación del rendimiento.

Solución : El recubrimiento de Al₂O₃ (espesor 2-5 nm) puede retrasar la transición de fase a 1000 °C.

P30: ¿Se puede utilizar para el blindaje radiológico de sondas espaciales?

R30 :

Propiedades del material de alto Z : el número atómico del tungsteno (Z = 74) puede absorber eficazmente los rayos X/gamma (el coeficiente de atenuación es un 20 % más alto que el del plomo).

Diseño liviano : la estructura nanoporosa (porosidad > 50%) reduce el peso en un 40% con la misma eficiencia de protección.

14. Mercado y comercialización

P31 : ¿Cuál es el rango de precios actual del nanoóxido de tungsteno en el mercado?

Grado de laboratorio : pureza 99,9%, tamaño de partícula 50 nm, alrededor de \$ 200-500 / g (pedido por gramo).

Grado industrial : pureza del 99%, tamaño de partícula de 100 a 200 nm, alrededor de \$50 a 100/kg (compra por tonelada).

P32: ¿Qué empresas han industrializado el óxido de nanotungsteno?

R32 :

Internacional : Inframat de Estados Unidos, Showa Denko de Japón.

Nacional : CTIA GROUP, China Tungsten High-tech.

15. Perspectivas de la tecnología futura

P33 : ¿Cuáles son las posibles aplicaciones del nanoóxido de tungsteno en las comunicaciones 6G?

Modulador de terahercios : utiliza su respuesta óptica no lineal para lograr una modulación de alta velocidad de señales de la banda de frecuencia 6G (0,1-1 THz).

Materiales de gestión térmica : Se utiliza una alta conductividad térmica ($\approx 30 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) para disipar el calor de los chips de la estación base y mejorar la confiabilidad del equipo.

P34 : ¿Cuáles son los últimos avances en dispositivos similares al cerebro?

Redes neuronales pulsantes : los conjuntos de memristores WO₃ logran una precisión de >95 % en el reconocimiento de dígitos escritos a mano (el consumo de energía es 3 órdenes de magnitud menor que el de CMOS).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Almacenamiento de múltiples estados : a través de la regulación del gradiente de vacancia de oxígeno, un solo dispositivo puede lograr 32 estados de resistencia (almacenamiento de 5 bits).

CTIA GROUP LTD
High Purity Nano Tungsten Oxide

Nano Tungsten Oxide produced by CTIA GROUP LTD has a purity of $\geq 99.9\%$ and a particle size of 10-100 nm. It has excellent photocatalytic, electrochromic and thermal shielding properties and is a yellow (WO_3), blue ($WO_{2.9}$) or purple ($WO_{2.72}$) powder.

High Purity Nano Tungsten Oxide

Project	Details	
Product Specifications	Purity: $\geq 99.9\%$ (optional 99.95%, 99.99%, 99.999%); Particle size: 10-100 nm (customizable); Specific surface area: 20-50 m ² / g	
Performance characteristics	High purity (impurities <10 ppm); band gap 2.4-2.8 eV (WO_3), infrared blocking >90% ($WO_{2.9}$); photocatalytic hydrogen production rate 450 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; transmittance change >80%, response <5 s	
Application Areas	Photocatalysis; electrochromism (smart windows); thermal shielding (energy-saving glass); gas sensors (NO_2 , NH_3); energy storage (batteries)	
Storage safety	Store in a cool and dry place, sealed and away from sunlight; avoid inhaling dust, wear a mask and gloves when operating, and dispose of waste in accordance with regulations	
Package	5 g, 25 g (laboratory), 1 kg, 25 kg (industrial)	
Order Quantity	Minimum order: 5g (laboratory)/1 kg (industrial); 3-5 days for delivery if in stock, 2-3 weeks for customization; worldwide delivery (DHL/FedEx). For large orders, delivery period must be completed after the contract is signed, including application for dual-use item licenses.	
Advantages	30 years of professional experience, ISO 9001 RMI certification. Support flexible customization and fast response.	
Impurities	Limit value / ppm	illustrate
Iron	≤ 10	Affects conductivity and optical properties, requires pickling or magnetic separation control
Sodium	≤ 5	Source: Sodium tungstate, affects the lattice and electrochromic properties, removed by ion exchange
Molybdenum	≤ 10	Tungsten ore is associated with tungsten, which affects the catalytic activity and needs to be refined and purified
Silicon	≤ 5	Source quartz equipment, affects particle uniformity, requires high-purity equipment
Aluminum	≤ 5	Source container, affects thermal stability,
Purity benchmark: Applicable to purity $\geq 99.9\%$, ultra-high purity (99.99%) has lower limits (such as Fe, Na ≤ 1 ppm). Detection method: ICP-MS (<1 ppb), XRF. Source: GB/T 41336-2022, American Elements, Stanford Advanced Materials. Application impact: Fe and Mo affect photocatalysis; Na		

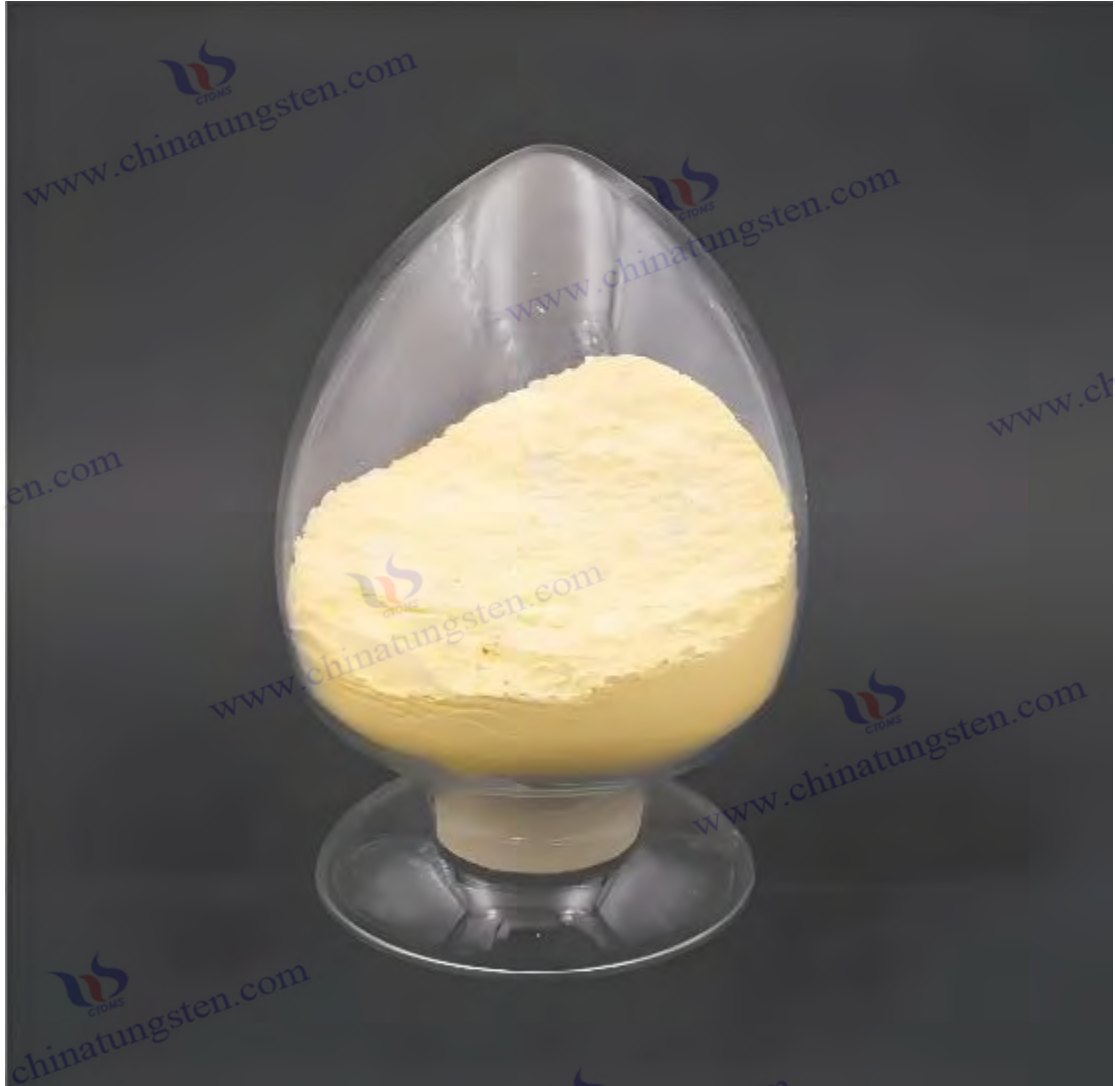
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Project	Details		
		needs to avoid contamination	and Cl affect
Calcium	≤5	Affects the stability of the crystal phase and requires precursor purification	electrochromism; Cu and Pb affect semiconductors.
Magnesium	≤5	Reduce catalytic efficiency and need to be purified and removed	Control: Precursor purification, high purity equipment, optimized reduction process.
Copper	≤2	Affects the performance of electronic devices and requires ultra-high purity process control	
Lead	≤2	Heavy metals affect safety and need to be strictly controlled	
Carbon C	≤50	The source is organic matter or reduction, which affects the optical properties and needs to be removed by heat treatment	
Sulfur	≤20	Originated from sulfuric acid, affects chemical stability and needs to be cleaned and removed	
Chlorine	≤10	Source of chloride, affects purity, requires rinsing control	

Procurement Information

Tel: +86 592 5129696 Email: sales@chinatungsten.com

Website: [http://www.tungsten-powder.com\(product details, comments\)](http://www.tungsten-powder.com(product%20details,%20comments))



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