

# ¿Qué es el óxido de tungsteno?

CTIA GRUPO LTD

**CTIA GRUPO LTD**

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

## COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

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

Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha establecido más de 200 sitios web profesionales multilingües de tungsteno y molibdeno que cubren 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 piezas de información, sirviendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita diariamente a cientos de miles de profesionales de la industria en todo el mundo. Con visitas acumuladas a su grupo de sitios web y cuenta oficial que alcanzan miles de millones de veces, se ha convertido en un centro de información global y autorizado reconocido para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras, que brinda noticias multilingües las 24 horas del día, los 7 días de la semana, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado.

Sobre la base de la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando la tecnología de IA, diseña y produce de forma colaborativa productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como el tamaño de partícula, la densidad, la dureza, la resistencia, las dimensiones y las tolerancias) con los clientes. Ofrece servicios integrados de proceso completo que van desde la apertura de moldes, la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de investigación y desarrollo, 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. Basándose en esta base, CTIA GROUP profundiza aún más 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, basándose en sus más de 30 años de experiencia en la industria, también han escrito y publicado análisis de conocimientos, 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 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. Adhiriéndose 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 la práctica de producción y las necesidades de los clientes del mercado, ganando elogios generalizados en la industria. Estos logros brindan un sólido apoyo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder mundial en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y servicios de información.



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## directorio

### Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Antecedentes
- 1.2 Objetivos de investigación e innovaciones
- 1.3 Situación de la investigación en el país y en el extranjero

### Capítulo 2 Información básica del óxido de tungsteno

- 2.1 Definición de óxido de tungsteno
- 2.2 La forma y distribución del óxido de tungsteno
- 2.2.1 Trióxido de tungsteno y óxido de tungsteno vacante de oxígeno/óxido de tungsteno defectuoso
- 2.3 Las características del trióxido de tungsteno están relacionadas con el contenido de oxígeno
  - 2.3.1 Relación entre la estructura del trióxido de tungsteno y el contenido de oxígeno
  - 2.3.2 Relación entre las propiedades del trióxido de wolframio y el contenido de oxígeno
  - 2.3.3 Preparación del trióxido de wolframio y control del contenido de oxígeno

### Capítulo 3 Clasificación del óxido de tungsteno

- 3.1 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la composición química
  - 3.1.1 Óxido de wolframio amarillo/trióxido de wolframio
  - 3.1.2 Óxido de tungsteno naranja
  - 3.1.3 Óxido de tungsteno azul
  - 3.1.4 Óxido de tungsteno púrpura
  - 3.1.5 Óxido de tungsteno blanco
  - 3.1.6 Dióxido de tungsteno/óxido de tungsteno marrón
- 3.2 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la estructura cristalina
  - 3.2.1 Óxido de tungsteno monoclinico
  - 3.2.2 Óxido de tungsteno ortorrómbico
  - 3.2.3 Óxido de tungsteno hexagonal
  - 3.2.4 Óxido cúbico de tungsteno cristalino
- 3.3 Clasificación del óxido de tungsteno según la forma física
  - 3.3.1 Nanopartículas de óxido de tungsteno
  - 3.3.2 Nanoláminas de óxido de tungsteno
  - 3.3.3 Nanohilos de óxido de tungsteno
  - 3.3.4 Nanovarillas de óxido de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.3.5 Nanoflores de óxido de tungsteno
- 3.3.6 Película de óxido de tungsteno
- 3.3.7 Bloques de óxido de tungsteno
- 3.4 Clasificación del óxido de tungsteno en función del tamaño de partícula
  - 3.4.1 Óxido de tungsteno de grano grueso
  - 3.4.2 Partículas ultrafinas de óxido de wolframio
  - 3.4.3 Micras de óxido de tungsteno
  - 3.4.4 Óxido de tungsteno submicrónico
  - 3.4.5 Nano óxido de tungsteno
  - 3.4.6 Óxido de tungsteno subnanométrico
- 3.5 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la pureza
  - 3.5.1 Óxido de tungsteno ordinario
  - 3.5.2 Óxido de tungsteno de alta pureza

## Capítulo 4 Estructura del óxido de tungsteno

- 4.1 Características de la estructura cristalina del óxido de tungsteno
  - 4.1.1 La unidad básica y la simetría de la estructura cristalina de óxido de tungsteno.
  - 4.1.2 Disposición atómica del óxido de tungsteno
  - 4.1.3 Defectos y vacantes en la estructura cristalina de óxido de tungsteno
- 4.2 Factores que influyen en la estructura cristalina del óxido de tungsteno
  - 4.2.1 Efecto de las condiciones de preparación sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio
    - 4.2.1.1 Efecto de la temperatura de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno
    - 4.2.1.2 Efecto de la presión de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno
    - 4.2.1.3 Efecto del tiempo de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio
    - 4.2.1.4 Efecto de la atmósfera de reacción sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio
    - 4.2.1.5 Efecto de la velocidad de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno
    - 4.2.1.6 Efecto de los precursores sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio
    - 4.2.1.7 Efecto del disolvente sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno
  - 4.2.2 Efecto de los estímulos externos sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno
    - 4.2.2.1 Efecto de la radiación óptica sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 4.2.2.2 Efecto del campo eléctrico sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio
- 4.2.2.3 Efecto del campo magnético sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio
- 4.3 La relación intrínseca entre la estructura cristalina y las propiedades del óxido de tungsteno
  - 4.3.1 Enlace de estructura electrónica de óxido de tungsteno
    - 4.3.1.1 Efecto de la estructura cristalina de óxido de tungsteno en el transporte de electrones
    - 4.3.1.2 Relación entre la estructura de la banda de óxido de wolframio y la estructura cristalina
  - 4.3.2 Enlace de nivel de transporte de iones de óxido de tungsteno
    - 4.3.2.1 Efecto de la estructura cristalina de óxido de tungsteno en la difusión de iones
    - 4.3.2.2 Efecto del proceso de intercalación/extracción de iones en la estabilidad estructural de los cristales de óxido de tungsteno
  - 4.3.3 Relación entre las propiedades superficiales del óxido de tungsteno
    - 4.3.3.1 Efecto de la estructura cristalina de óxido de wolframio en la adsorción superficial
    - 4.3.3.2 Relación entre la estructura cristalina del óxido de wolframio y el estado electrónico de la superficie

## Capítulo 5 Propiedades físicas y químicas del óxido de tungsteno

- 5.1 Apariencia y color del óxido de tungsteno
- 5.2 Densidad/gravedad específica del óxido de wolframio
- 5.3 Estabilidad térmica del óxido de tungsteno
  - 5.3.1 Punto de fusión del óxido de tungsteno
  - 5.3.2 Temperatura de descomposición del óxido de tungsteno
  - 5.3.3 Coeficiente de dilatación térmica del óxido de wolframio
- 5.4 Solubilidad del óxido de tungsteno
- 5.5 Dureza y resistencia mecánica del óxido de tungsteno
  - 5.5.1 Dureza de Mohs del óxido de tungsteno
  - 5.5.2 Resistencia a la compresión del óxido de wolframio
  - 5.5.3 Resistencia al cizallamiento del óxido de wolframio
- 5.6 Superficie específica del óxido de wolframio
- 5.7 Densidad aparente del óxido de tungsteno
- 5.8 Propiedades ópticas del óxido de tungsteno
  - 5.8.1 Absorción de luz y propiedades fotocatalíticas del óxido de wolframio
  - 5.8.2 Propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno
- 5.9 Propiedades eléctricas del óxido de tungsteno
  - 5.9.1 Propiedades semiconductoras del óxido de wolframio

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 5.9.2 Propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno
- 5.10 Propiedades térmicas del óxido de tungsteno
  - 5.10.1 Estabilidad térmica del óxido de wolframio
  - 5.10.2 Propiedades de expansión térmica del óxido de tungsteno
- 5.11 Sensibilidad al gas del óxido de tungsteno
- 5.12 Reacción redox del óxido de tungsteno
- 5.13 Reacción ácido-base del óxido de tungsteno
- 5.14 Propiedades catalíticas del óxido de tungsteno

## Capítulo 6 Método de preparación del óxido de tungsteno

- 6.1 Métodos tradicionales de preparación de óxido de tungsteno
  - 6.1.1 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de reacción en fase sólida a alta temperatura
  - 6.1.2 Método tradicional de preparación del método sol-gel de óxido de tungsteno/método de preparación sol-gel de óxido de tungsteno
  - 6.1.3 Método tradicional de preparación de óxido de tungsteno - método hidrotermal
  - 6.1.4 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno - método de tungstato de amonio
  - 6.1.5 Método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de descomposición del ácido clorhídrico del tungstato
  - 6.1.6 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de descomposición térmica de paratungstato de amonio
- 6.2 Nuevos métodos de preparación del óxido de tungsteno
  - 6.2.1 Un nuevo método de preparación para el óxido de tungsteno: método de deposición electroquímica
  - 6.2.2 Un nuevo método de preparación para el óxido de tungsteno: método de deposición de vapor
  - 6.2.3 Un nuevo método de preparación de óxido de tungsteno: método de molde biológico

## Capítulo VII Equipo de producción de óxido de tungsteno

- 7.1 El equipo principal para la producción de óxido de tungsteno.
  - 7.1.1 Equipos de manipulación de materias primas
    - 7.1.1.1 Equipos de trituración y molienda
    - 7.1.1.2 Equipos de cribado y clasificación
  - 7.1.2 Equipo de reacción
    - 7.1.2.1 Equipos de hidrólisis y acidólisis alcalina
    - 7.1.2.1 Equipos de hidrólisis y acidólisis alcalina
    - 7.1.2.2 Equipos de calcinación y descomposición térmica
  - 7.1.3 Equipos de separación y purificación
    - 7.1.3.1 Equipos de separación sólido-líquido

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.1.3.2 Equipos de cristalización y recristalización
- 7.2 Equipos auxiliares de producción de óxido de wolframio
  - 7.2.1 Equipos de manipulación de materiales
    - 7.2.1.1 Equipos mecánicos de transporte
    - 7.2.1.2 Equipos de transporte neumático
  - 7.2.2 Equipos de secado y refrigeración
    - 7.2.2.1 Equipos de secado
    - 7.2.2.2 Equipos de refrigeración
  - 7.2.3 Equipos de tratamiento de protección ambiental
    - 7.2.3.1 Equipos de tratamiento de gases residuales
    - 7.2.3.2 Equipos de tratamiento de aguas residuales

## Capítulo 8 Investigación sobre el principio de detección del óxido de tungsteno

- 8.1 Espectroscopía de detección de óxido de tungsteno
  - 8.1.1 Detección de óxido de tungsteno - Análisis de espectroscopía de fluorescencia de rayos X
  - 8.1.2 Detección de óxido de tungsteno - Espectroscopía Raman
- 8.2 Detección de óxido de tungsteno: análisis electroquímico
  - 8.2.1 Detección de óxido de tungsteno - voltamperometría
- 8.3 Otros métodos de detección de óxido de tungsteno
  - 8.3.1 Detección de óxido de tungsteno: análisis termogravimétrico

## Capítulo 9 Campos de aplicación del óxido de tungsteno

- 9.1 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo energético
  - 9.1.1 Aplicación de óxido de tungsteno en baterías de iones de litio
  - 9.1.2 Aplicación de óxido de tungsteno en supercondensadores
  - 9.1.3 Aplicación de óxido de tungsteno en la división fotocatalítica del agua para producir hidrógeno
- 9.2 Aplicación del óxido de tungsteno en el ámbito del medio ambiente
  - 9.2.1 Aplicación de óxido de tungsteno en la purificación del aire
  - 9.2.2 Aplicación de óxido de tungsteno en el tratamiento de aguas residuales
- 9.3 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de los materiales inteligentes
  - 9.3.1 Aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos electrocrómicos
  - 9.3.2 Aplicación de óxido de tungsteno en sensores de gas
- 9.4 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la información electrónica
  - 9.4.1 Aplicación de óxido de tungsteno en transistores de efecto de campo
  - 9.4.2 Aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos de memoria
- 9.5 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la fabricación de maquinaria

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.5.1 Aplicación de óxido de tungsteno en recubrimientos de herramientas
- 9.5.2 Aplicación de óxido de tungsteno en piezas resistentes al desgaste
- 9.6 Óxido de tungsteno en aplicaciones biomédicas
  - 9.6.1 Aplicación del óxido de tungsteno en biosensores
  - 9.6.2 Aplicación de óxido de tungsteno en la terapia fototérmica
- 9.7 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la visualización óptica
  - 9.7.1 Aplicación de óxido de tungsteno en pantallas
- 9.8 Aplicación de óxido de tungsteno en soporte catalítico
  - 9.8.1 Aplicación de óxido de tungsteno en catalizadores soportados
- 9.9 Aplicación de óxido de tungsteno en el campo de los tejidos ignífugos
  - 9.9.1 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en el ámbito industrial
  - 9.9.2 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en la vida diaria
  - 9.9.3 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en el ámbito del transporte público
- 9.10 Aplicación de óxido de tungsteno en películas agrícolas

## Capítulo 10 Seguridad y protección ambiental del óxido de tungsteno

- 10.1 Seguridad del óxido de tungsteno
- 10.2 Protección ambiental del óxido de tungsteno
- 10.3 Hoja de datos de seguridad (MSDS) para óxido de tungsteno

## Capítulo 11 Normas nacionales y extranjeras para el óxido de tungsteno

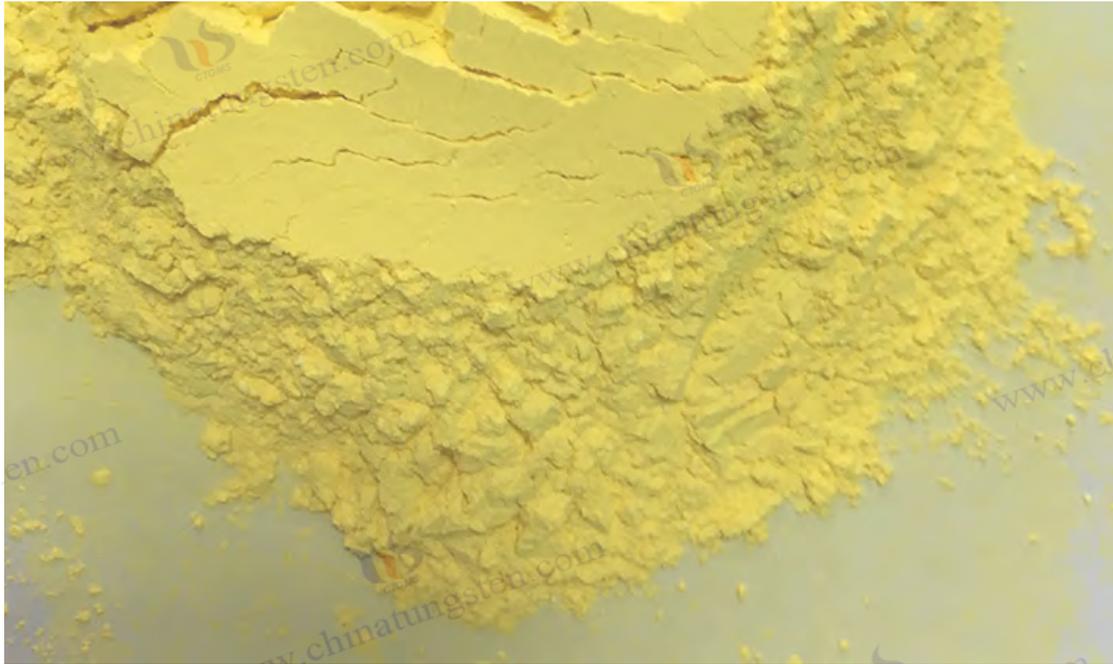
- 11.1 Normas nacionales chinas
- 11.2 Normas internacionales

## Capítulo 12 Datos y cifras sobre el óxido de tungsteno

- 12.1 ¿Cuáles son los principales hechos del óxido de tungsteno?
- 12.2 Todos los datos del óxido de tungsteno (propiedades fisicoquímicas, parámetros técnicos de producción y aplicación)

Apéndice: Glosario multilingüe de términos de óxido de tungsteno (chino, inglés, japonés, coreano)

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 1 Introducción

Como un importante óxido de metal de transición, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) se ha convertido en un punto de investigación en los campos de la ciencia de los materiales, la química y la ingeniería debido a sus propiedades fisicoquímicas únicas y su amplio potencial de aplicación.

### 1.1 Estudiar el fondo del óxido de tungsteno

La experiencia de investigación del óxido de tungsteno se deriva de su versatilidad en los sectores industrial, energético y ambiental y de la posición estratégica de los recursos de tungsteno en la economía mundial. El tungsteno es conocido por su alto punto de fusión ( $3422\text{ }^\circ\text{C}$ ), alta dureza y estabilidad química, y el óxido de tungsteno, como uno de los principales compuestos del tungsteno, no solo es un intermediario clave en la producción de metal de tungsteno y carburo cementado, sino que también muestra un gran potencial en el campo de la alta tecnología debido a sus propiedades semiconductoras (banda prohibida  $2.6\text{--}3.0\text{ eV}$ ) y propiedades ópticas.

### Antecedentes industriales y de recursos

El tungsteno es un importante representante de los metales raros, con reservas mundiales de alrededor de 3,3 millones de toneladas, de las cuales China

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

representa más del 60%, y es el mayor productor y exportador de tungsteno. Según Tungsten News, se espera que la demanda mundial de tungsteno alcance las 100.000 toneladas anuales en 2025, de las cuales la producción de óxido de tungsteno representa una parte importante. Tradicionalmente, el óxido de tungsteno se usa para fabricar cobre de tungsteno, alambre de tungsteno y otros productos tostando polvo de tungsteno o extrayendo wolframita y scheelita. Sin embargo, con la modernización de la tecnología industrial, su aplicación se ha extendido a los campos de las nuevas energías, la información electrónica y la protección del medio ambiente.

### Antecedentes científicos y técnicos

Las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno le dan una ventaja única en los campos de la fotocatalisis, el electrocromismo y los sensores. Tiene una banda prohibida moderada y puede absorber la luz visible para generar pares de electrones y huecos fotogenerados, que se utilizan para descomponer el hidrógeno acuático o degradar contaminantes. Además, sus propiedades electrocromáticas, que pueden cambiar de transparente a azul oscuro, lo convierten en un material ideal para ventanas y pantallas inteligentes. El auge de la nanotecnología ha avanzado aún más en la investigación del óxido de tungsteno, y a través de los avances en la tecnología del tungsteno, como la deposición hidrotermal y de vapor, las nanopartículas sintéticas exhiben una mayor área de superficie específica y actividad.

### Contexto ambiental y social

Con el énfasis mundial en el desarrollo sostenible, la aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la protección del medio ambiente ha atraído mucha atención. Por ejemplo, sus propiedades fotocatalíticas se pueden utilizar para el tratamiento de aguas residuales y la purificación del aire, mientras que las aplicaciones en tejidos resistentes al fuego aumentan la seguridad. Al mismo tiempo, la fluctuación de los precios del tungsteno (se espera que sea de 20-30 dólares/kg en 2025) refleja la escasez de oferta y demanda de recursos, lo que impulsa la investigación de procesos de producción eficientes y de bajo costo. Además, las aplicaciones biomédicas del óxido de tungsteno, como la terapia fototérmica, también abren nuevas oportunidades en el campo de la salud.

Por lo tanto, los antecedentes del estudio del óxido de tungsteno se basan en su interdisciplinaria multidisciplinaria, que está respaldada por la base industrial, impulsada por la innovación tecnológica e impulsada por las necesidades sociales. Estos antecedentes proporcionan una base sólida para un estudio en profundidad de sus propiedades y aplicaciones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 1.2 Investigación sobre el propósito y la innovación del óxido de tungsteno

El propósito de la investigación sobre el óxido de tungsteno es explorar sistemáticamente sus vías de optimización del rendimiento, expandir sus campos de aplicación y resolver los cuellos de botella técnicos existentes. Este estudio tiene como objetivo no solo profundizar en la comprensión de la estructura, morfología y función de los cristales, sino también mejorar su eficiencia y sostenibilidad en aplicaciones prácticas a través de medios innovadores.

**Objetivo:** Revelar la relación entre propiedades y estructura: Al analizar los efectos de la velocidad de reacción y las condiciones de síntesis en la estructura cristalina del óxido de tungsteno (como monoclinico y tetragonal), se aclaró el mecanismo regulador de sus propiedades físicas y químicas, y se aclararon las bases teóricas para la optimización del rendimiento. Ampliar las áreas de aplicación: Ampliar el óxido de tungsteno de los usos industriales tradicionales a nuevas energías (como baterías, supercondensadores), materiales inteligentes (como dispositivos electrocrómicos) y biomédicos (como biosensores) para satisfacer las necesidades de múltiples campos. Optimizar el proceso de producción: desarrollar métodos de síntesis de bajo coste y respetuosos con el medio ambiente (como el proceso verde que utiliza paratungstato de amonio) para mejorar la viabilidad industrial del óxido de tungsteno, reducir el consumo de energía y las emisiones de residuos. Resolver el cuello de botella técnico: En vista de su baja eficiencia fotocatalítica y poca estabilidad del ciclo, se propone mejorar el esquema para aumentar su competitividad en la aplicación práctica.

**Innovación:** La velocidad de reacción regula la estructura cristalina: Este estudio explora sistemáticamente la influencia de la velocidad de reacción en la forma y los defectos del cristal de óxido de tungsteno por primera vez, y propone una estrategia para la síntesis controlada de formas cristalinas específicas mediante el uso de análisis cinético y termodinámico. Por ejemplo, los cristales cúbicos altamente reactivos se generan por oxidación rápida para la fotocatalisis; Síntesis a baja velocidad de cristales monoclinicos para dispositivos con altos requisitos de estabilidad.

Materiales compuestos multifuncionales: Óxido de tungsteno compuesto de manera innovadora con plástico de tungsteno, cobre de tungsteno, etc., para desarrollar nuevos materiales flexibles y altamente conductores, adecuados para dispositivos electrónicos portátiles y telas ignífugas. Integración de nanotecnología: El óxido de tungsteno nano se prepara a partir de partículas de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno para optimizar su superficie específica ( $>200 \text{ m}^2/\text{g}$ ) y su eficiencia de conversión fototérmica ( $>50\%$ ), superando los límites de rendimiento de los materiales tradicionales.

Ruta de producción verde: Proponer un método hidrotermal a baja temperatura ( $<200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) combinado con el reciclaje de residuos (por ejemplo, oxidación con agujas de tungsteno) para reducir el consumo de energía (de  $2 \text{ kWh/kg}$  a  $1 \text{ kWh/kg}$ ) y lograr un vertido cero de aguas residuales. Estas innovaciones tienen como objetivo llenar los vacíos en la investigación existente, promover el óxido de tungsteno desde el laboratorio hasta la industrialización y proporcionar nuevas ideas para sus aplicaciones en múltiples campos.

### 1.3 Estado de la investigación del óxido de tungsteno en el país y en el extranjero

Se han logrado avances significativos en la investigación del óxido de tungsteno en el país y en el extranjero, pero existen diferencias en el enfoque y el nivel. La investigación extranjera se centra en teorías básicas y aplicaciones de alta tecnología, mientras que China tiene una ventaja en la producción industrial y la utilización de recursos. A continuación se presenta una revisión del estado de la investigación desde dos dimensiones en el país y en el extranjero.

#### Situación actual de la investigación nacional

Con sus abundantes recursos de tungsteno y su sólida base industrial, China se encuentra en una posición de liderazgo en la investigación del óxido de tungsteno. La investigación se centra en la optimización de los procesos de producción y la expansión de las aplicaciones tradicionales.

**Proceso de producción:** Tungsten ha desarrollado un método de tostado de alta eficiencia ( $800 \text{ }^\circ\text{C}$ , rendimiento  $>95\%$ ) y un método químico húmedo (pureza  $>99,9\%$ ) para la producción a gran escala de tungsteno amarillo y tungsteno azul. En los últimos años, el tungsteno ha informado de la síntesis hidrotermal de óxido de nano-tungsteno ( $180 \text{ }^\circ\text{C}$ , 24 horas) con un tamaño de partícula de  $10\text{-}100 \text{ nm}$ , que se aplica a la fotocatalisis.

**Campo de aplicación:** Carburo de tungsteno: la investigación nacional se centra en la preparación de polvo de tungsteno mediante la reducción de óxido de tungsteno, que se utiliza para herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste con una dureza de  $2000 \text{ HV}$ . Nueva energía: La Universidad de Tsinghua y otras instituciones han explorado su aplicación en baterías de iones de litio,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con una capacidad teórica de 693 mAh/g y un ciclo de vida de > 500 veces.  
Fotocatálisis: La Academia China de Ciencias ha desarrollado compuestos de óxido de tungsteno/TiO<sub>2</sub> con una eficiencia de producción de hidrógeno de 400 μmol/h • g.

**Desventajas:** La mayor parte de la investigación nacional se centra en la producción industrial, la teoría básica (como la relación entre la estructura cristalina y el rendimiento) es débil y la investigación sobre la aplicación a nanoescala y la tecnología de protección del medio ambiente comenzó tarde.

### Situación actual de la investigación en el extranjero

La investigación extranjera se centra en los Estados Unidos, Japón y Europa, centrándose en la exploración teórica y la aplicación de alta tecnología del óxido de tungsteno, especialmente en el campo de la nanotecnología y los materiales inteligentes.

**Investigación básica:** El Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) reveló la relación entre la banda prohibida de óxido de tungsteno y la forma cristalina mediante el cálculo de DFT, y demostró que la banda prohibida del cristal cúbico (2,6 eV) es menor que la del cristal monoclinico (2,8 eV), lo que guía la optimización fotocatalítica. Japón: La Universidad de Tokio ha estudiado las propiedades de detección de gases de los nanocables de óxido de tungsteno con límites de detección hasta el nivel de ppb para su uso en sensores.

**Aplicaciones:** Electrocrómico: Institutos de investigación europeos han desarrollado películas delgadas de óxido de tungsteno (deposición CVD) con un ciclo de vida de >10<sup>4</sup> veces para ventanas inteligentes. Biomédica: La Universidad de Stanford utiliza el efecto fototérmico del óxido de nano-tungsteno (eficiencia > 40%) para tratar tumores. Catálisis: El Instituto Max Planck en Alemania informó de un catalizador de óxido de tungsteno/Pt con una tasa de conversión de hidrogenación del >95%.

**Ventajas y desventajas:** La investigación extranjera es líder en profundidad teórica y aplicación de alto nivel, pero limitada por la escasez de recursos, la escala de producción es pequeña y el costo es alto (alrededor de 30 dólares estadounidenses / kg).

**Comparación en el país y en el extranjero:** enfoque de la investigación: sesgo nacional hacia la producción industrial y las aplicaciones tradicionales, enfoque extranjero en la investigación básica y los campos de alta tecnología.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nivel técnico: los países extranjeros están más avanzados en nanotecnología y optimización del rendimiento, y los países nacionales son superiores en producción y control de costos. Tendencia de desarrollo: Ambas partes se están desarrollando hacia la síntesis verde y las aplicaciones multifuncionales, como el reciclaje de chatarra doméstica (reutilización de calentadores de tungsteno) y la electrónica flexible extranjera.

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 2 Información básica del óxido de tungsteno

### 2.1 Definición de óxido de tungsteno

Óxido de tungsteno El óxido de tungsteno es una clase de compuestos compuestos de tungsteno (W) y oxígeno (O), que pertenece a la categoría de óxidos de metales de transición. El tungsteno es un metal con un alto punto de fusión y alta densidad, que generalmente se usa como: wolframita (wolframita) o scheelita La forma (scheelita) se encuentra en la naturaleza, mientras que el óxido de tungsteno es un producto intermedio importante extraído de estos minerales a través de fundición y procesamiento químico. Es químicamente estable y tiene una variedad de estados de oxidación, el más común de los cuales es el trióxido de tungsteno +6-valente ( $WO_3$ ), que a menudo se conoce como óxido de tungsteno amarillo.

Desde un punto de vista químico, la definición de óxido de tungsteno no se limita a  $WO_3$ , sino que también incluye una gama de compuestos no enteros, como  $WO_{2.9}$ 、 $WO_{2.72}$ , etc., el contenido de oxígeno de estos óxidos varía ligeramente, formando una rica variación en estructura y propiedades. Su color varía de amarillo, azul a púrpura, que está estrechamente relacionado con el estado de oxidación y la estructura cristalina del tungsteno. En la industria, el óxido de tungsteno es una materia prima clave para la producción de metal de tungsteno, polvo de tungsteno, alambre de tungsteno y otros productos de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, y también es un precursor importante de los productos químicos de tungsteno (como el tungstato).

Las propiedades físicas del óxido de tungsteno también son bastante impresionantes: suele tener un punto de fusión superior a 1470 ° C, una densidad de unos 7,16 g/cm<sup>3</sup>, una alta dureza y resistencia a la corrosión. Estas propiedades lo hacen estable en entornos de alta temperatura o condiciones adversas. Desde la perspectiva de la aplicación, el óxido de tungsteno no solo es un material básico para la industria, sino que también se usa ampliamente en fotocátalisis, sensores y vidrio inteligente debido a sus propiedades semiconductoras. Se puede decir que el óxido de tungsteno no solo es el objeto de investigación central de la investigación científica de tungsteno, sino también la piedra angular del desarrollo de la tecnología de tungsteno.

En general, el óxido de tungsteno es un compuesto versátil cuya definición abarca no solo su composición química, sino también su forma de presencia en la naturaleza, su papel en el proceso de producción y su amplia gama de potencial de aplicación. Es un puente entre los minerales y los productos de tungsteno de alto valor agregado, y es una parte indispensable de la tecnología moderna.

## 2.2 La forma y distribución del óxido de tungsteno

Como miembro importante de la familia del tungsteno, el óxido de tungsteno existe en una variedad de formas, que pueden incorporarse indirectamente en forma de minerales en la naturaleza, y también se pueden presentar en diferentes formas a través de la síntesis artificial. En la naturaleza, el tungsteno existe principalmente en forma de wolframita y scheelita, de los cuales la wolframita es tungstato de hierro-manganeso y la scheelita es tungstato de calcio. Estos minerales se someten a beneficios, lixiviación, calcinación y otros procesos antes de convertirse en óxido de tungsteno. China es el mayor país de minerales de tungsteno, representando más del 60% de las reservas mundiales.

En la preparación artificial, el óxido de tungsteno existe en una variedad de formas químicas y físicas. El más común es el trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), que es óxido de tungsteno amarillo en forma de polvo amarillo brillante. Además, hay óxido de tungsteno azul y óxido de tungsteno púrpura, que varían en color debido a que el contenido de oxígeno es ligeramente inferior al WO<sub>3</sub>. Estos óxidos no enteros generalmente se preparan bajo una atmósfera reductora y se usan ampliamente en la producción de polvo de tungsteno y metal de tungsteno. Además, el óxido de tungsteno también puede existir en forma de nanopartículas,

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

películas delgadas, etc., especialmente en la tecnología de tungsteno y la investigación académica de tungsteno, el óxido de tungsteno a nanoescala ha atraído mucha atención debido a su alta área superficial específica.

Desde el punto de vista de la distribución, la producción industrial de óxido de tungsteno se concentra principalmente en áreas ricas en recursos de tungsteno, como China, Rusia y Canadá. Los productos de CTIA GROUP LTD cubren muchos campos, desde óxido de tungsteno hasta alambre de tungsteno, tungsteno, cobre, etc. En el laboratorio, el óxido de tungsteno se prepara mediante calcinación de paratungstato de amonio (APT) o metatungstato de amonio (AMT), que tiene una fuerte morfología controlable.

### 2.3 Trióxido de tungsteno y óxido de tungsteno vacante de oxígeno/óxido de tungsteno defectuoso

El trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ) es la forma más estable de la familia del óxido de tungsteno y generalmente se encuentra en forma de óxido de tungsteno amarillo. Sin embargo, cuando aparecen vacantes de oxígeno en su estructura, se forman las llamadas vacantes de oxígeno de óxido de tungsteno u óxido de tungsteno en estado defectuoso, como el óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura. Estos óxidos defectuosos exhiben propiedades muy diferentes al trióxido de tungsteno debido al contenido reducido de oxígeno.

等级: A1		WO <sub>3</sub> 含量(%min): 99.90										
密度: 2.4-3.0g/cm <sup>3</sup>		费氏粒度: 12-20um										
杂质(%max)												
元素	Al	As	Bi	Ca	Cd	Cr	Co	Cu	Fe	K	Mg	Mn
MAX	0.0005	0.0010	0.0001	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0003	0.0010	0.0010	0.0007	0.0010
元素	Mo	Na	Ni	P	Pb	S	Sb	Si	Sn	Ti	V	/
MAX	0.0020	0.0010	0.0007	0.0007	0.0010	0.0007	0.0005	0.0010	0.0002	0.0010	0.0010	/

Lista de composición química de óxido de tungsteno amarillo

La estructura cristalina del trióxido de tungsteno suele ser un sistema cristalino monoclinico, y el átomo de tungsteno está rodeado por 6 átomos de oxígeno para formar un octaedro  $WO_6$  que están conectados en una red tridimensional por coangular o colateralidad. Cuando se producen vacantes de oxígeno, parte de la unidad  $WO_6$  pierde átomos de oxígeno y la red cristalina se distorsiona, lo que resulta en un cambio de color y rendimiento. Por ejemplo, las vacantes de oxígeno del óxido de tungsteno azul reducen la banda prohibida y mejoran la absorción de luz, mientras que el óxido de tungsteno púrpura tiene

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un color púrpura distintivo debido al menor contenido de oxígeno. Estos óxidos defectuosos se utilizan a menudo como intermedios en la producción de polvo de tungsteno en la industria debido a su fuerte reducibilidad.

En las aplicaciones, las vacantes de oxígeno confieren una mayor conductividad y actividad catalítica al óxido de tungsteno defectuoso. Por ejemplo, los estudios de conocimiento de tungsteno han demostrado que el óxido de tungsteno sin oxígeno sobresale en la división fotocatalítica del agua o la detección de gases, mientras que el trióxido de tungsteno es más adecuado para dispositivos inteligentes y electrocrómicos debido a su estabilidad. La diferencia entre los dos se deriva de la profunda influencia de las vacantes de oxígeno en la estructura electrónica, que también es un tema candente en la investigación del tungsteno.

En términos de preparación, el trióxido de tungsteno generalmente se prepara mediante calcinación a alta temperatura de paratungstato de amonio, mientras que el óxido de tungsteno defectuoso debe procesarse en una atmósfera reductora como el hidrógeno. Esta diferencia en las condiciones de preparación determina directamente el número de vacantes de oxígeno, lo que a su vez afecta el uso del producto final.

### 2.3.1 Relación entre la estructura del trióxido de tungsteno y el contenido de oxígeno

La estructura cristalina del trioxido de tungsteno es la base de su función, y el contenido de oxígeno afecta directamente la estabilidad y la diversidad de la estructura al cambiar la simetría de la red y el estado del defecto. A continuación se analiza la relación desde tres perspectivas: forma cristalina, defecto y morfología.

#### La relación entre la forma cristalina y el contenido de oxígeno

Las formas cristalinas del trióxido de tungsteno incluyen monoclinico, ortorrómbico, tetragonal y cúbico, y su formación está estrechamente relacionada con el contenido de oxígeno. En la relación estequiométrica ideal ( $W: O = 1: 3$ ), el cristal monoclinico es una fase estable a temperatura ambiente, y los parámetros de la red son  $a = 7.306 \text{ \AA}$ ,  $b = 7.540 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.692 \text{ \AA}$  y  $\beta = 90.91^\circ$ . Cuando el contenido de oxígeno se reduce  $WO_{2.98}$  o  $WO_{2.72}$ , la estructura cristalina se transforma por el aumento de las vacantes de oxígeno. Por ejemplo:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alto contenido de oxígeno ( $WO_3$ ):** Los átomos de oxígeno ocupan completamente la posición de red, formando una red octaédrica regular de  $WO_6$ , que tiende a ser monoclinica u ortorrroma.
- **Bajo contenido de oxígeno ( $WO_{3-x}$ ):** Las vacantes de oxígeno alteran la simetría reticular, lo que resulta en el dominio de fases metaestables como cristales tetragonales o cúbicos. Los estudios han demostrado que los niveles de oxígeno se reducen a  $WO_{2.72}$ , la proporción de cristales cúbicos aumentó significativamente y el espaciado del plano de los cristales ( $d_{100}$ ) cambió de 0,38 nm a 0,39 nm.

La investigación sobre el tungsteno ha confirmado mediante difracción de rayos X (XRD) que un pequeño cambio en el contenido de oxígeno ( $\pm 0,1$ ) puede desencadenar una transición en forma de cristal. Por ejemplo, el trióxido de tungsteno preparado en una atmósfera reductora muestra picos característicos tetragonales, mientras que los cristales monoclinicos dominan en condiciones de oxidación.

#### Defectos de red y contenido de oxígeno

El contenido de oxígeno afecta directamente la densidad del defecto del trióxido de tungsteno. Las vacantes de oxígeno, como principal tipo de defecto, cambian el estado de oxidación del tungsteno ( $W^{6+}$  a  $W^{5+}$  o  $W^{4+}$ ), lo que a su vez afecta la estabilidad de la red:

- **Suficiente oxígeno:** no hay defectos evidentes en la red cristalina, el octaedro  $WO_6$  está dispuesto de forma ordenada y el cristal es amarillo (tungsteno amarillo).
- **Agotamiento de oxígeno:** Las vacantes de oxígeno introducen tensiones locales que hacen que la red se distorsione y forme óxido de tungsteno azul ( $W_{20}O_{58}$ ). Pantalla de resonancia paramagnética electrónica (EPR),  $WO_2$  La concentración de vacantes de oxígeno en  $\rho$  puede alcanzar los  $10^{18} \text{cm}^{-3}$ , que es significativamente mayor que la de  $WO_3$  ( $<10^{16} \text{cm}^{-3}$ ).

El análisis de microscopía electrónica de transmisión (TEM) mostró que el límite de los granos de trióxido de tungsteno con muchas vacantes de oxígeno era borroso, y el espaciado entre los planos de cristal fluctuaba mucho ( $\pm 0,02$  nm), lo que refleja el desorden de la estructura.

#### Micromorfología y contenido de oxígeno

El contenido de oxígeno también afecta la topografía del trióxido de tungsteno. La microscopía electrónica de barrido (SEM) reveló:

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Alto contenido de oxígeno:** Los granos son grandes (20–50  $\mu\text{m}$ ), escamas o varillas regulares, debido a un crecimiento suficiente de cristales.
- **Bajo contenido de oxígeno:** Los granos son pequeños (1–5  $\mu\text{m}$ ) y de forma poliedro irregular, y la propagación del grano está limitada por la pérdida de oxígeno. Por ejemplo, las partículas de trióxido de tungsteno producidas por la oxidación del polvo de tungsteno a baja presión de oxígeno son solo 1/5 del tamaño de la alta presión de oxígeno.

### 2.3.2 La relación entre las propiedades del trióxido de tungsteno y el contenido de oxígeno

Las propiedades fisicoquímicas del trióxido de tungsteno, como las propiedades ópticas, eléctricas y catalíticas, están estrechamente relacionadas con su contenido de oxígeno. Los cambios en el contenido de oxígeno alteran significativamente su rendimiento funcional al afectar su estructura electrónica y estados defectuosos.

#### Propiedades ópticas

El contenido de oxígeno afecta directamente la banda prohibida y el color del trióxido de tungsteno:

- **Alto contenido de oxígeno ( $\text{WO}_3$ ):** La banda prohibida es de 2,8–3,0 eV, que es de color amarillo claro, porque la transición electrónica se produce principalmente entre los orbitales  $02p$  y  $W5d$ . El espectro UV-Vis muestra que el borde de absorción está entre 400 y 450 nm.
- **Bajo contenido de oxígeno ( $\text{WO}_{3-x}$ ):** Las vacantes de oxígeno introducen niveles de energía defectuosos, la banda prohibida se reduce a 2,4–2,6 eV y el color cambia a azul o azul-negro. Por ejemplo,  $\text{WO}_2$ , El borde de absorción es rojo a 500 nm, y la absorción del infrarrojo cercano mejora (> tasa de blindaje de 700 nm aumenta en un 50%).

Este cambio óptico hace que exhiba diferenciación en aplicaciones electrocrómicas y fototérmicas. El trióxido de tungsteno con alto contenido de oxígeno tiene un gran cambio en la transmitancia de luz (80%  $\rightarrow$  10%), lo que es adecuado para ventanas inteligentes; El tungsteno azul con bajo contenido de oxígeno se utiliza para el aislamiento de películas agrícolas debido a la fuerte absorción de infrarrojos.

#### Propiedades eléctricas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El contenido de oxígeno regula la conductividad del trióxido de tungsteno y las propiedades de los semiconductores:

- **Alto contenido de oxígeno:** Oxygen-enough  $WO_3$  es un semiconductor de tipo n con baja concentración de portadores ( $10^{15}-10^{16}cm^{-3}$ ) y alta resistividad ( $10^3-10^4 \Omega \cdot cm$ ), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de aislamiento o alta resistencia.
- **Bajo contenido de oxígeno:** La vacante de oxígeno aumenta la concentración de electrones libres ( $10^{18}-10^{19}cm^{-3}$ ) y la resistividad disminuye a  $10^{-1}-10^1 \Omega \cdot cm$ . Por ejemplo,  $WO_{2.9}$  La conductividad de  $\rho$  es 2 órdenes de magnitud mayor que la de  $WO_3$  debido a la contribución de  $W^{5+}$ . Esta característica lo hace más ventajoso en electrodos de batería (por ejemplo, baterías de iones de litio, capacidad de 693 mAh/g) y sensores.

### Rendimiento catalítico

El contenido de oxígeno afecta significativamente las actividades fotocatalíticas y catalíticas químicas del trióxido de tungsteno:

- **Fotocatálisis:** El trióxido de tungsteno con muchas vacantes de oxígeno tiene una alta eficiencia de separación debido a su estrecha banda prohibida y muchos estados defectuosos. Por ejemplo, la tasa de producción de hidrógeno fotocatalítico de  $WO_{2.9}$  es mayor que la de  $WO_3$  ( $300 \mu mol/h \cdot g$ ) que la de  $WO_3$  ( $300 \mu mol/h \cdot g$ )
- **Catálisis química:** Las vacantes de oxígeno se utilizan como sitios activos para mejorar la acidez de la superficie. Por ejemplo, la tasa de conversión de  $WO_2$  en las reacciones de hidrogenación (>90%) es mejor que la de  $WO_3$  (80%) debido al aumento de la densidad de su sitio ácido de Lewis.

### Estabilidad térmica

El trióxido de tungsteno con alto contenido de oxígeno tiene una mejor estabilidad térmica y una temperatura de descomposición de hasta  $1700^\circ C$ , mientras que el  $WO$  deficiente en oxígeno se reduce fácilmente a  $WO_2$  o  $W$  por encima de  $1000^\circ C$ . Esta diferencia afecta a su idoneidad en entornos de alta temperatura como los tejidos resistentes al fuego.

### 2.3.3 Preparación del trióxido de wolframio y control del contenido de oxígeno

El método de preparación del trióxido de tungsteno determina su contenido de oxígeno, y el control preciso del contenido de oxígeno es clave para lograr

estructuras y propiedades específicas. A continuación se analizan los procesos comunes de preparación y el mecanismo de regulación del contenido de oxígeno.

#### Método de tostado

- **Proceso:** Preparado tostando metal de tungsteno o polvo de tungsteno bajo una atmósfera de oxígeno (500–800 ° C).
- **Control del contenido de oxígeno:**
  - **Alto contenido de oxígeno:** presión parcial de oxígeno > 0,2 atm, temperatura 600 ° C, tiempo de reacción 2 horas, se genera WO<sub>3</sub>, pureza > 99,9%.
  - **Bajo contenido de oxígeno:** Presión parcial de oxígeno <0.05atm, o agregue un agente reductor (como H<sub>2</sub>) para generar WO<sub>2,9</sub> o tungsteno azul (W<sub>20</sub>O<sub>58</sub>). Por ejemplo, las empresas de tungsteno preparan tungsteno azul en una **atmósfera mixta de N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>** (relación O<sub>2</sub> del 10%) con un índice de oxígeno de 2,72–2,9.
- **Características:** Simple y eficiente, adecuado para la producción industrial, pero la precisión del contenido de oxígeno está limitada por el control de la atmósfera.

#### Método hidrotermal

- **Proceso:** Se utiliza tungstato de sodio o ácido tungstico como precursor y se sintetiza en solución acuosa (150–250 ° C, 12–48 horas).
- **Control del contenido de oxígeno:**
  - **Alto contenido de oxígeno:** Se añade oxidante (como H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), pH >7 para asegurar la formación de WO<sub>3</sub>, y la forma cristalina es monoclinica.
  - **Bajo contenido de oxígeno:** ajuste el pH <5, o agregue un agente reductor (como etanol) para generar WO<sub>3-x</sub> con abundantes vacantes de oxígeno, y la forma cristalina está sesgada hacia los cristales cúbicos. Por ejemplo, la tecnología de tungsteno informa que el contenido de oxígeno se controla a 180 ° C, etanol/agua (1:1).<sub>85</sub>-WO<sub>3</sub>.
- **Características:** Tamaño de partícula controlable (10–100 nm), adecuado para nano trióxido de tungsteno, pero bajo rendimiento.

#### Deposición de vapor (CVD)

- **Proceso:** El filamento de tungsteno o WF<sub>6</sub> se utiliza como materia prima y se deposita bajo una atmósfera de oxígeno (400–700 ° C).
- **Control del contenido de oxígeno:**
  - **Alto contenido de oxígeno:** El caudal de oxígeno > de 100 sccm, lo que da como resultado una densa película de WO<sub>3</sub>.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Bajo contenido de oxígeno:** Reduce el flujo de oxígeno (<20 sccm) o introduce H<sub>2</sub> para generar WO<sub>3-x</sub>. Por ejemplo, una película delgada depositada por una aguja de tungsteno a baja presión de oxígeno es de color negro azulado con un contenido de oxígeno de WO<sub>2.92</sub>.
- **Características:** Adecuado para la preparación de películas, buena uniformidad del contenido de oxígeno, pero alto costo.

#### Detección y validación del contenido de oxígeno

- **Análisis químico:** determinación gravimétrica del contenido de oxígeno, como la reducción de WO<sub>3</sub> a W después del pesaje.
- **Análisis espectral:** se utilizó XPS para detectar la relación W<sup>5+</sup>/W<sup>6+</sup>, y EPR para medir la concentración de vacantes de oxígeno.
- **Caracterización estructural:** XRD y TEM confirman el cambio en la forma cristalina.



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

### Capítulo 3 Clasificación del óxido de tungsteno

#### 3.1 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la composición química

El óxido de tungsteno es una clase de compuestos compuestos de tungsteno (W) y oxígeno (O), y su composición química determina su tipo y propiedades. Dependiendo del estado de oxidación y el contenido de oxígeno del tungsteno, el óxido de tungsteno se puede clasificar en una variedad de tipos, que incluyen trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) y una variedad de compuestos no enteros. Estos compuestos varían en color, estructura y aplicación, lo que refleja la diversidad de la química del tungsteno. A continuación se analiza la clasificación basada en la composición química.

En la naturaleza, el tungsteno se encuentra principalmente en forma de wolframita y scheelita, que se convierte en óxido de tungsteno después de la refinación. Industrialmente, el óxido de tungsteno es un intermediario importante en la producción de productos de tungsteno como el metal de tungsteno, el polvo de tungsteno y el alambre de tungsteno. Su composición química no solo afecta sus propiedades físicas, sino que también determina su potencial de aplicación en la tecnología del tungsteno y la investigación del tungsteno. Por ejemplo, un pequeño cambio en el contenido de oxígeno puede hacer que el color cambie de amarillo a azul o morado, un fenómeno que está estrechamente relacionado con el estado de oxidación y la estructura electrónica del tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Además, el método de preparación del óxido de tungsteno también afectará su composición química. Por ejemplo, mediante la calcinación de paratungstato de amonio (APT) en diferentes atmósferas, se pueden obtener óxidos con diferente contenido de oxígeno. Esta flexibilidad permite que el óxido de tungsteno sea ampliamente adaptable en la industria y la investigación. A continuación se describen en detalle algunos de los principales tipos de composición química.

### 3.1.1 Óxido de wolframio amarillo/trióxido de wolframio

El óxido de tungsteno amarillo, también conocido como trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), es la forma más común y estable de la familia del óxido de tungsteno. Su composición química de tungsteno se encuentra en el estado de oxidación +6 y el contenido de oxígeno alcanza el máximo teórico, por lo que tiene un color amarillo vivo. Este color se deriva de su banda prohibida de energía (alrededor de 2,5-2,8 eV), que le permite absorber la luz ultravioleta y la luz parcialmente visible.

La preparación del óxido de tungsteno amarillo generalmente se obtiene por calcinación de paratungstato de amonio o ácido tungstico a alta temperatura en el aire. Sus propiedades físicas incluyen un alto punto de fusión (1473 ° C), alta densidad (7,16 g/cm<sup>3</sup>) y buena estabilidad química, lo que le permite permanecer estructuralmente intacto en entornos hostiles. En términos de estructura cristalina, el trióxido de tungsteno está dominado por un sistema cristalino monoclinico, y los átomos de tungsteno están rodeados por 6 átomos de oxígeno para formar el octaedro  $WO_6$ , lo que le da excelentes propiedades eléctricas y ópticas.

En términos de aplicación, el óxido de tungsteno amarillo se usa ampliamente en vidrio inteligente debido a sus propiedades electrocrómicas, que pueden cambiar de amarillo a azul o gris bajo la acción de un campo eléctrico. Además, es un material importante para los fotocatalizadores, que se pueden utilizar para descomponer contaminantes orgánicos. El óxido de tungsteno amarillo es único en su combinación de estabilidad y versatilidad. Ya sea que se trate de un intermedio de los productos químicos de tungsteno o una aplicación directa en el campo de la alta tecnología, ha demostrado un valor insustituible.

### 3.1.2 Óxido de tungsteno naranja

El óxido de tungsteno naranja es una forma menos mencionada de óxido de tungsteno y, a menudo, se considera una variante del trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ) en condiciones de preparación específicas. Tiene la misma composición

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

química que el óxido de tungsteno amarillo, pero con un color naranja, que puede estar relacionado con el tamaño del grano, las vacantes de oxígeno o las trazas de impurezas.

La preparación de óxido de tungsteno naranja generalmente ocurre en condiciones de transición, como cuando se calcina paratungstato de amonio, la temperatura se controla entre 400–500 ° C, o en un entorno donde el suministro de oxígeno es insuficiente. Su estructura cristalina todavía está dominada por sistemas cristalinos monoclinicos, pero los defectos superficiales o las diferencias en la morfología de las partículas pueden causar cambios en la dispersión de la luz, lo que resulta en un color naranja. Los estudios han demostrado (con referencia a Tungsten Academic) que este cambio de color no altera significativamente sus propiedades químicas, pero puede afectar sus propiedades de absorción óptica.

En términos de aplicación, el óxido de tungsteno naranja es similar al óxido de tungsteno amarillo, que se puede utilizar en fotocatalisis, sensores y otros campos. Sin embargo, debido a sus condiciones de preparación inestables, rara vez se produce por separado en la industria y, por lo general, existe como un estado intermedio de trióxido de tungsteno. Su posición en el mercado del tungsteno no es tan significativa como la de otros tipos, pero aún tiene valor para ser explorado en estudios experimentales específicos.

La particularidad del óxido de tungsteno naranja radica en su transitoriedad, que proporciona pistas importantes para el estudio de la relación entre la estructura y las propiedades del óxido de tungsteno.

### 3.1.3 Óxido de tungsteno azul

El óxido de tungsteno azul es un óxido de tungsteno entero con un contenido de oxígeno ligeramente inferior al del trióxido de tungsteno. Su color azul se debe a la presencia de vacantes de oxígeno que alteran la estructura electrónica, reduciendo la banda prohibida de energía y ampliando el rango de absorción de luz en la región visible.

El óxido de tungsteno azul generalmente se prepara calentando paratungstato de amonio o trióxido de tungsteno bajo una atmósfera reductora como el hidrógeno. Su estructura cristalina es similar a la  $WO_3$ , pero las vacantes de oxígeno causan distorsiones locales, aumentando la conductividad y la actividad catalítica. En términos de propiedades físicas, es más fácil de reducir que el óxido de tungsteno amarillo y, a menudo, se usa como intermediario en la producción de polvo de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En aplicaciones, el óxido de tungsteno azul se utiliza en sensores de gas y materiales fototérmicos debido a su alta actividad. Tiene una alta sensibilidad al  $\text{NO}_2$  y otros gases, y tiene un gran potencial en el campo de la protección del medio ambiente. Además, también se puede utilizar como materia prima para productos químicos de tungsteno y procesarse posteriormente en materiales compuestos como el cobre de tungsteno.

El encanto del óxido de tungsteno azul radica en sus propiedades de estado defectuoso, lo que lo hace único en el campo de los materiales funcionales.

#### 3.1.4 Óxido de tungsteno púrpura

El óxido de tungsteno púrpura es un óxido de tungsteno con un menor contenido de oxígeno, y su color púrpura se debe a una mayor concentración de vacantes de oxígeno. Su composición química está entre  $\text{WO}_3$  y  $\text{WO}_2$ , y el estado de oxidación del tungsteno está parcialmente por debajo de +6.

En preparación, el óxido de tungsteno púrpura debe generarse en condiciones reductoras más fuertes, como el tratamiento a alta temperatura del trióxido de tungsteno en hidrógeno. Su estructura cristalina es compleja y la vacante de oxígeno causa una grave distorsión de la red cristalina, pero aún conserva cierta estabilidad. Es más fácil de reducir que el óxido de tungsteno azul y es la materia prima preferida para la producción de polvo de tungsteno de alta pureza.

En términos de aplicación, el óxido de tungsteno púrpura se usa a menudo en la investigación de tungsteno para estudiar el efecto de la vacante de oxígeno en el rendimiento. También tiene potencial en el campo de la fotocátalisis y la electroquímica debido a su mayor reducción de la banda prohibida y a su mayor fotorreactividad.

El color y las propiedades únicos del óxido de tungsteno púrpura lo convierten en una "escuela de personalidad" en la familia del óxido de tungsteno.

#### 3.1.5 Óxido de tungsteno blanco

El óxido de tungsteno blanco no es un tipo de óxido de tungsteno en el sentido tradicional, sino una variante del trióxido de tungsteno bajo ciertas condiciones, a menudo asociadas con nano o alta pureza. Su composición química sigue siendo  $\text{WO}_3$ , pero debido a los granos extremadamente pequeños o a los efectos de la superficie, la luz dispersa se realiza y parece blanca.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En preparación, el óxido de tungsteno blanco se puede preparar mediante la descomposición a baja temperatura del metatungstato de amonio o la preparación solvotérmica. Su estructura cristalina es consistente con la del óxido de tungsteno amarillo, pero su tamaño a nanoescala hace que sus propiedades ópticas cambien. Físicamente, conserva la alta estabilidad de  $WO_3$ , pero es superior en términos de superficie específica y actividad.

En aplicaciones, el óxido de tungsteno blanco se utiliza en fotocatalizadores y nanorecubrimientos debido a su alta actividad. Rara vez se menciona por separado en el mercado del tungsteno, pero tiene potencial como material de alto valor agregado. La particularidad del óxido de tungsteno blanco radica en sus propiedades nano, lo que abre una nueva dirección para las aplicaciones del óxido de tungsteno.

### 3.1.6 Dióxido de tungsteno/óxido de tungsteno marrón

El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ), también conocido como óxido de tungsteno marrón, es óxido de tungsteno en el estado de oxidación +4 del tungsteno. Tiene el contenido de oxígeno más bajo, tiene un color marrón oscuro y tiene una diferencia significativa en la naturaleza con respecto al  $WO_3$ .

En preparación, el dióxido de tungsteno es producido por trióxido de tungsteno en fuertes condiciones de reducción (como el hidrógeno a alta temperatura). Su estructura cristalina es un sistema cristalino monoclinico, pero la unidad  $WO_4$  está conectada de manera diferente a  $WO_6$ , lo que resulta en una mayor conductividad eléctrica. Físicamente, todavía tiene un punto de fusión de hasta  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pero su estabilidad química es menor que la del  $WO_3$ .

En aplicaciones, el dióxido de tungsteno se usa a menudo como intermediario en la producción de metal de tungsteno, y también se usa en materiales de electrodos debido a sus propiedades eléctricas (consulte la investigación sobre tungsteno). Su papel en los productos químicos de tungsteno es fundamental pero indispensable. El dióxido de tungsteno, con su bajo estado de oxidación y propiedades únicas, enriquece la clasificación del óxido de tungsteno.

## 3.2 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la estructura cristalina

La estructura cristalina del óxido de tungsteno es un factor clave para determinar sus propiedades y, de acuerdo con las diferentes formas de cristal, se puede dividir en varios tipos, como monoclinico, ortogonal, hexagonal y

cúbico. La formación de estas formas cristalinas está estrechamente relacionada con la temperatura, la presión y el proceso de preparación, y cada estructura le da al óxido de tungsteno sus propiedades físicas y químicas únicas. Las características de estos polimorfos y sus aplicaciones se discuten en detalle a continuación.

### 3.2.1 Óxido de tungsteno monoclinico

La forma cristalina monoclinica es la forma principal de trióxido de tungsteno (es decir, óxido de tungsteno amarillo) a temperatura ambiente. La estructura de esta forma cristalina consiste en octaedros  $WO_6$ , que están conectados por conexiones coangulares para formar una red tridimensional asimétrica. Debido a la asimetría de su red cristalina, el óxido de tungsteno monoclinico exhibe una alta estabilidad y excelentes propiedades, lo que lo convierte en la forma más común en aplicaciones prácticas.

El óxido de tungsteno monoclinico suele tener una banda prohibida entre 2,5 y 2,8 eV y buenas propiedades ópticas y eléctricas. Su estabilidad lo hace brillar en el campo del vidrio inteligente, permitiendo cambios de color reversibles a través de efectos electrocromicos. Además, en el campo de la fotocatalisis, el óxido de tungsteno monoclinico se usa a menudo como catalizador para la descomposición de contaminantes orgánicos debido a su capacidad de absorción de luz ultravioleta y algo de luz visible. En la industria, también es la materia prima principal para la preparación de polvo de tungsteno por calcinación de paratungstato de amonio.

La aplicación de óxido de tungsteno monoclinico es la "fuerza principal" de la familia de óxidos de tungsteno debido a su perfecto equilibrio entre estructura y rendimiento.

### 3.2.2 Óxido de tungsteno ortorrómbico

El óxido de tungsteno ortorrómbico es una estructura cristalina formada a temperaturas más altas (por ejemplo, 300-500 ° C). En comparación con la forma cristalina monoclinica, la disposición del octaedro  $WO_6$  es más simétrica y la simetría de la red cristalina mejora. Este cambio estructural permite que la forma ortorrómbica exhiba ventajas únicas en ciertas propiedades, especialmente en el campo de la fotocatalisis.

El óxido de tungsteno ortorrómbico tiene una estructura más abierta y sitios más activos en la superficie, lo que le permite adsorber y descomponer contaminantes de manera más eficiente en reacciones fotocatalíticas (ver

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tungsten Academic). Su preparación se suele conseguir mediante la transformación de fase del trióxido de tungsteno a una temperatura específica, o mediante el control de las condiciones de descomposición del ácido tungstico. Es ligeramente menos estable que el monoclinico, pero funciona bien en aplicaciones específicas. Aunque la forma cristalina ortorrómbica, como forma de transición del óxido de tungsteno, no se usa tan ampliamente en la industria como la forma cristalina monoclinica, su potencial aún debe explorarse más a fondo, especialmente en el desarrollo de catalizadores de alto rendimiento.

### 3.2.3 Óxido de tungsteno hexagonal

El óxido de tungsteno hexagonal es una estructura cristalina obtenida mediante un método de preparación especial (por ejemplo, método hidrotermal), y su morfología suele ser en forma de nanovarillas o nanotubos. El octaedro  $WO_6$  de esta forma cristalina está dispuesto de manera hexagonal simétrica para formar una estructura de canal abierto, que es ideal para la intercalación y el transporte de iones.

La estructura única del óxido de tungsteno hexagonal le da ventajas significativas en el campo de las baterías y los sensores. Por ejemplo, en las baterías de iones de litio, sus canales abiertos aumentan la tasa de difusión de iones y, por lo tanto, mejoran el rendimiento de ciclo de la batería (consulte Tungsten Research). En los sensores de gas, las nanoestructuras hexagonales aumentan el área de superficie específica y exhiben una mayor sensibilidad a las moléculas de gas.

Además, también se puede preparar mediante síntesis hidrotermal de metatungstato de amonio, y el proceso es altamente controlable. El óxido de tungsteno hexagonal, con su alta actividad y morfología especial, proporciona una amplia posibilidad para la aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la nanotecnología.

### 3.2.4 Óxido cúbico de tungsteno cristalino

El óxido cúbico de tungsteno es una estructura cristalina formada en condiciones de alta temperatura (por ejemplo, por encima de  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), y su disposición octaédrica  $WO_6$  logra la simetría más alta, presentando una red simétrica cúbica. La simetría de esta estructura le da perfección teórica, pero en la práctica es menos común debido a la inestabilidad termodinámica.

La preparación de óxido de tungsteno cristalino cúbico a menudo requiere condiciones extremas, como el procesamiento de trióxido de tungsteno a altas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas y presiones. Sus propiedades eléctricas y de banda prohibida difieren de las de los cristales monoclinicos, pero están limitadas por una estabilidad insuficiente en aplicaciones prácticas. En este estudio, la forma cristalina cúbica se usa más para explorar la ley de transformación de fase y las propiedades teóricas del óxido de tungsteno, y proporcionar apoyo de datos para comprender la relación entre la estructura cristalina y las propiedades.

Con su alta simetría y rareza, el óxido de tungsteno cúbico demuestra la diversidad de estructuras cristalinas de óxido de tungsteno y, aunque sus escenarios de aplicación son limitados, sigue siendo un objeto importante en la investigación académica.

### 3.3 Clasificación del óxido de tungsteno según la forma física

La forma física del óxido de tungsteno es una realización importante de su diversidad de aplicaciones, y se puede dividir en varios tipos, como nanopartículas, nanoláminas, nanocables, nanovarillas, nanoflores, películas delgadas y a granel según el tamaño de partícula, la morfología y la estructura. Estas diferencias en la morfología no solo afectan sus propiedades físicas y químicas, sino que también determinan directamente su uso específico en la tecnología del tungsteno y la investigación del tungsteno. A continuación se discutirán en detalle las características, los métodos de preparación y los escenarios de aplicación de cada forma física.

#### 3.3.1 Nanopartículas de óxido de tungsteno

Las nanopartículas de óxido de tungsteno se refieren a partículas esféricas o casi esféricas con un tamaño de partícula de 1 a 100 nanómetros, generalmente dominadas por trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo). Debido a su pequeño tamaño, el área de superficie específica aumenta significativamente, exhibiendo propiedades muy diferentes a las de los materiales a granel. La preparación de nanopartículas generalmente se logra mediante precipitación química o calcinación a baja temperatura de paratungstato de amonio, que es simple y controlable.

Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno de nanopartículas se ven mejoradas por efectos cuánticos, y su banda prohibida puede cambiar ligeramente, y se usa comúnmente en campos fotocatalíticos, como la división del agua o la degradación de contaminantes orgánicos. Desde el punto de vista eléctrico, su alta superficie específica lo hace excelente en los sensores de gas, lo que le permite responder rápidamente a gases como el  $\text{NO}_2$  o el  $\text{H}_2\text{S}$ .

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Además, también se puede utilizar como: Polvo de tungstenoPrecursores para la preparación Tungstenor.

En aplicaciones prácticas, las nanopartículas de óxido de tungsteno a menudo se dopan en materiales compuestos, como el cobre de tungsteno o el caucho de tungsteno, debido a su uniformidad y dispersión, para mejorar su rendimiento. Sus propiedades nano lo han convertido en una fuente de interés en el mercado del tungsteno, especialmente en el segmento de gama alta impulsado por la nanotecnología. Las nanopartículas de óxido de tungsteno se han convertido en la forma estrella de la investigación de nanomateriales debido a su alta actividad y fácil procesamiento.

### 3.3.2 Nanoláminas de óxido de tungsteno

Las nanoláminas de óxido de tungsteno son estructuras bidimensionales con espesores nanométricos y dimensiones transversales de hasta micras. Esta forma de lámina generalmente se prepara por solvoterma o exfoliación, por ejemplo, cultivada a partir de una solución de ácido tungstálico. La estructura cristalina de las nanoláminas es en su mayoría monoclinica u ortorrómbica en forma de cristal, con una gran superficie expuesta.

La ventaja del óxido de tungsteno en nanoláminas radica en sus propiedades bidimensionales y abundantes sitios tensioactivos, que son muy adecuados para las reacciones catalíticas. Los estudios han demostrado (consulte el tungsteno académico) que es más eficiente que los materiales a granel en la degradación fotocatalítica de tintes o la fotólisis del agua a hidrógeno. Además, su estructura laminar le da potencial en el campo del almacenamiento de energía electroquímica, como los electrodos de las baterías de litio, para proporcionar más sitios de intercalación de iones.

En aplicaciones, las nanoláminas de óxido de tungsteno también se pueden utilizar para fabricar dispositivos electrónicos flexibles debido a su flexibilidad mecánica y propiedades eléctricas. También se puede combinar con otros materiales, como el óxido de molibdeno, para crear sensores de alto rendimiento. Las nanoláminas de óxido de tungsteno, con sus propiedades bidimensionales y su alta actividad, aportan nuevas ideas para el desarrollo de materiales funcionales.

### 3.3.3 Nanohilos de óxido de tungsteno

Los nanohilos de óxido de tungsteno son estructuras unidimensionales con diámetros en el rango nanométrico y longitudes de varias micras o incluso más.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sus métodos de preparación incluyen el método de deposición de vapor y el método hidrotermal, y el tungstato de amonio se usa a menudo como materia prima, y se cultiva una estructura lineal alargada controlando las condiciones de reacción. El polimorfo es mayoritariamente monoclinico o hexagonal, dependiendo del entorno de síntesis.

El óxido de tungsteno de nanocables sobresale en dispositivos electrónicos debido a su alta relación de aspecto y conductividad unidireccional. Por ejemplo, se puede utilizar como material de canal para transistores de efecto de campo o para la detección de alta sensibilidad en sensores de gas (véase Tungsten Research). Su estructura unidimensional también contribuye a la eficiencia de la fotocátalisis debido a la trayectoria más corta de los portadores fotogenerados a lo largo de la línea.

En aplicaciones industriales, los nanocables de óxido de tungsteno pueden procesarse posteriormente para convertirlos en precursores a nanoescala de filamentos de tungsteno o para el desarrollo de productos químicos de tungsteno. Su morfología también lo convierte en un uso potencial en pantallas flexibles y nanocompuestos, como la combinación con plástico de tungsteno para mejorar las propiedades mecánicas. Los nanocables de óxido de tungsteno se han convertido en un miembro importante de la nanotecnología debido a sus propiedades unidimensionales y excelentes propiedades.

### 3.3.4 Nanovarillas de óxido de tungsteno

Las nanovarillas de óxido de tungsteno son similares a los nanocables en el sentido de que también son estructuras unidimensionales, pero su longitud es más corta y la relación de aspecto suele ser inferior a 10. Su preparación utiliza principalmente el método hidrotermal o solvotérmico, utilizando tungstato de sodio o trióxido de tungsteno como materias primas, y controlando la morfología ajustando el valor del pH y la temperatura. La forma cristalina es principalmente hexagonal o monoclinica.

El óxido de nanovarilla de tungsteno se caracteriza por su unidimensionalidad y alta estabilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de intercalación de iones. En el campo de las baterías, su estructura en forma de varilla es capaz de mejorar el rendimiento de ciclo de los materiales de los electrodos. Además, también se comporta bien en fotocátalisis debido a su moderada superficie y fácil dispersión.

En términos de aplicación, las nanovarillas de óxido de tungsteno se pueden utilizar para preparar catalizadores basados en tungstato o como componentes a

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

nanoescala de calentadores de tungsteno. También se puede combinar con cobre de tungsteno para mejorar la conductividad térmica. Industrialmente, CTIA GROUP LTD ha mostrado un gran interés en su potencial en el campo de las nuevas energías. Las nanovarillas de óxido de tungsteno, con su modesto tamaño y versatilidad, se han convertido en una opción práctica entre los materiales unidimensionales.

### 3.3.5 Nanoflores de óxido de tungsteno

Las nanoflores de óxido de tungsteno son una estructura jerárquica tridimensional ensamblada en formas similares a flores mediante nanoláminas o nanovarillas, generalmente preparadas por métodos hidrotermales o de autoensamblaje. Su materia prima puede ser ácido tungstico o metatungstato de amonio, que se forma controlando el tiempo de reacción y los aditivos. La forma cristalina es mayoritariamente monoclinica o hexagonal.

La característica más importante del óxido de tungsteno de nanoflor es su área de superficie específica ultra alta y su estructura porosa, lo que hace que tenga ventajas significativas en el campo de la catálisis. Por ejemplo, exhibe una actividad extremadamente alta en la descomposición fotocatalítica de contaminantes o en la producción electrocatalítica de hidrógeno (ver Tungsten Academic). Además, su estructura en forma de flor mejora la capacidad de adsorción de gas, lo que lo hace adecuado para sensores altamente sensibles.

En aplicaciones prácticas, las nanoflores de óxido de tungsteno se pueden utilizar para el tratamiento ambiental, como la purificación del aire, o como aditivos funcionales para productos químicos de tungsteno. Su hermosa forma y uso práctico han atraído gradualmente la atención en el mercado del tungsteno. Con su estructura compleja y alto rendimiento, las nanoflores de óxido de tungsteno se han convertido en "obras de arte" entre los nanomateriales.

### 3.3.6 Película de óxido de tungsteno

Las películas delgadas de óxido de tungsteno son formas macroscópicas bidimensionales que varían en espesor desde nanómetros hasta micrómetros y generalmente se preparan mediante métodos de pulverización catódica, deposición química de vapor (CVD) o sol-gel. Su composición química está dominada por trióxido de tungsteno, y la forma cristalina es en su mayoría monoclinica u ortogonal.

Las propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno de película delgada son sus fortalezas principales, que se pueden usar en vidrio inteligente y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dispositivos de visualización para controlar el cambio de color a través de campos eléctricos. Además, tiene una amplia gama de aplicaciones en dispositivos optoelectrónicos, como como capa de transporte de electrones para células solares. La alta planitud y estabilidad de la película la hacen adecuada para la integración a gran escala.

Industrialmente, las películas de óxido de tungsteno se utilizan a menudo para el recubrimiento de la superficie de productos de tungsteno, o se combinan con cobre de tungsteno para preparar materiales compuestos. Las películas de óxido de tungsteno son materiales clave en la tecnología de películas delgadas debido a su planitud y funcionalidad.

### 3.3.7 Bloques de óxido de tungsteno

Los bloques de óxido de tungsteno se refieren a la forma sólida de tamaño macroscópico, que generalmente se prepara mediante sinterización a alta temperatura después del prensado y moldeo de polvo. Su composición química es principalmente trióxido de tungsteno, y la forma cristalina es principalmente monoclinica. Los materiales a granel tienen grandes tamaños de partícula y carecen de efectos nano.

El óxido de tungsteno a granel se caracteriza por su alta densidad y alta estabilidad, y a menudo se utiliza como materia prima para la producción de tungsteno metálico o ferrotungsteno. Puede mantener la integridad estructural en un entorno de alta temperatura y es adecuado para la preparación de materiales refractarios o materiales de protección contra la radiación. Además, la forma del bloque es fácil de transportar y almacenar.

En la industria, los bloques de óxido de tungsteno son las materias primas básicas para la producción de polvo de tungsteno y alambre de tungsteno, y son ampliamente utilizados en el mercado del tungsteno. Aunque su actividad no es tan buena como la de la forma nano, sigue siendo insustituible en el campo tradicional. Con su solidez y practicidad, los bloques de óxido de tungsteno han establecido su posición de base en la industria.

### 3.4 Clasificación del óxido de tungsteno en función del tamaño de partícula

El tamaño de partícula del óxido de tungsteno es un determinante importante de sus propiedades físicas y escenarios de aplicación. Dependiendo del tamaño de las partículas, se pueden dividir en varios tipos, como gruesas, ultrafinas, micras y submicrónicas. Estas diferencias de tamaño no solo afectan su área de superficie específica y reactividad, sino que también están directamente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relacionadas con su uso específico en la tecnología de tungsteno, la investigación de tungsteno y la producción industrial. La clasificación del óxido de tungsteno en función del tamaño de partícula y sus características se discutirá en detalle a continuación.

#### 3.4.1 Óxido de tungsteno de grano grueso

El óxido de tungsteno de grano grueso generalmente se refiere a la forma de tamaño de partícula en decenas de micras o incluso más grande, principalmente trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo). Estas partículas se obtienen generalmente por calcinación de paratungstato de amonio (APT) a altas temperaturas (por ejemplo, por encima de 800 ° C) durante mucho tiempo, o por sinterización directa de wolframita y scheelita. Debido al gran tamaño de las partículas, su área superficial específica es relativamente baja y la actividad superficial es débil.

Las propiedades físicas del óxido de tungsteno de grano grueso incluyen alta densidad (alrededor de 7,16 g/cm<sup>3</sup>) y una excelente estabilidad térmica, con un alto punto de fusión de 1473 ° C, lo que le permite mantener la integridad estructural a altas temperaturas. Esta propiedad lo convierte en una materia prima ideal para la producción de metal de tungsteno, polvo de tungsteno y alambre de tungsteno. En la industria, la forma de grano grueso es conveniente para el almacenamiento y el transporte, y a menudo se usa en la preparación de aleaciones como ferro-tungsteno o tungsteno-cobre. Además, se puede utilizar como sustrato para materiales refractarios o de protección contra la radiación en las industrias metalúrgica y nuclear. Sin embargo, debido al mayor tamaño de partícula, el óxido de tungsteno de grano grueso es menos reactivo, lo que lo hace inadecuado para aplicaciones que requieren una alta actividad superficial, como la fotocátalisis o los sensores. Su estructura cristalina es en su mayoría monoclinica y estable, pero está siendo reemplazada gradualmente por partículas más finas en los campos impulsados por la nanotecnología. A pesar de esto, su posición en la producción de productos tradicionales de tungsteno sigue siendo inquebrantable. El óxido de tungsteno de grano grueso se ha convertido en un "veterano" en aplicaciones industriales debido a su solidez y economía.

#### 3.4.2 Partículas ultrafinas de óxido de wolframio

El óxido de tungsteno de partículas ultrafinas se refiere a partículas en el rango de 1 a 100 nanómetros de tamaño, generalmente en forma de trióxido de tungsteno u óxido de tungsteno azul. Las partículas de este tamaño se preparan por precipitación química, solvoterma o descomposición a baja temperatura de metatungstato de amonio. Debido al tamaño extremadamente pequeño de las

partículas, su área de superficie específica aumenta sustancialmente, exhibiendo efectos nano significativos.

Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno de partículas ultrafinas se ven mejoradas por el efecto de tamaño cuántico, y la banda prohibida de energía puede expandirse ligeramente, lo que es adecuado para aplicaciones fotocatalíticas, como la descomposición de contaminantes orgánicos o la producción de hidrógeno por fotólisis del agua. Eléctricamente, su alta superficie específica lo hace excelente en sensores de gas, con alta sensibilidad y rápida respuesta a gases como el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{H}_2\text{S}$ . Además, también se puede utilizar como materia prima para productos químicos de tungsteno en la preparación de tungstato o ácido tungstálico. En las aplicaciones, las partículas ultrafinas de óxido de tungsteno a menudo se dopan en materiales compuestos como el plástico de tungsteno o el caucho de tungsteno para mejorar el rendimiento. El óxido de tungsteno de partículas ultrafinas se ha convertido en una "nueva estrella" en el campo de los materiales funcionales debido a su alta actividad y propiedades nano.

### 3.4.3 Micras de óxido de tungsteno

El óxido de tungsteno de tamaño micrométrico se refiere a la forma de tamaño de partícula entre 1 y 10 micras, generalmente dominada por trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) u óxido de tungsteno púrpura. Las partículas se obtienen por calcinación de paratungstato de amonio a una temperatura media (500-700 ° C) o por molienda mecánica a partir de partículas gruesas. Su área de superficie específica está entre partículas gruesas y ultrafinas, y tiene una cierta actividad superficial.

El óxido de tungsteno de micras tiene propiedades físicas estables y moderadamente activas, con un punto de fusión y una densidad comparables a las partículas gruesas, pero las partículas más pequeñas facilitan su dispersión durante el procesamiento. Se usa comúnmente en la producción de polvo de tungsteno y metal de tungsteno, y también se puede usar como materia prima para calentadores de tungsteno o agujas de tungsteno. En el campo de la fotocátalisis, las partículas de tamaño micrométrico no son tan activas como las nanopartículas, pero aún se pueden usar en algunos escenarios de baja demanda.

En términos de aplicación, el óxido de tungsteno de micras ocupa una posición importante en el mercado del tungsteno, ya que es adecuado para la producción a gran escala debido a su equilibrio entre costo y rendimiento. También se puede combinar con cobre de tungsteno para su uso en materiales conductores o como

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precursor para la preparación de tungstato de sodio. Su estructura cristalina es en su mayoría un sistema cristalino monoclinico, y la morfología de las partículas es relativamente regular.

El óxido de tungsteno de micras se ha convertido en la "columna vertebral" de la industria y la investigación científica debido a su tamaño moderado y practicidad.

#### 3.4.4 Óxido de tungsteno submicrónico

El óxido de tungsteno submicrónico se refiere a la forma de tamaño de partícula entre 100 nanómetros y 1 micra, generalmente dominada por trióxido de tungsteno u óxido de tungsteno azul. Las partículas se preparan en condiciones controladas de calcinación de paratungstato de amonio (por ejemplo, 500-600 ° C, calentamiento corto) o química húmeda. Su área superficial específica es mayor que la de las micras pero menor que la de las partículas ultrafinas, lo que le da lo mejor de ambos mundos.

El óxido de tungsteno submicrónico tiene mejores propiedades ópticas y eléctricas que las partículas gruesas, lo que lo hace adecuado para fotocatalizadores y sensores electroquímicos. Por ejemplo, exhibe una alta sensibilidad para la detección de CO o COV (compuestos orgánicos volátiles) (ver Tungsten Research). En el sector de las baterías, las partículas submicrónicas proporcionan un canal de transporte de iones modesto y son adecuadas como aditivos para materiales de electrodos. Además, es una excelente materia prima para la producción de polvo esférico de tungsteno.

En aplicaciones industriales, el óxido de tungsteno submicrónico se usa a menudo en el procesamiento fino de productos de tungsteno, como el intermedio del alambre de tungsteno o la base para la preparación de granos de tungsteno. También se puede combinar con plástico de tungsteno para mejorar la homogeneidad del material compuesto. La estructura cristalina es principalmente monoclinica u ortogonal, y la morfología de las partículas es diversa. El óxido de tungsteno submicrónico, con su tamaño de transición y versatilidad, se ha convertido en un "puente" entre las aplicaciones nano y micro.

#### 3.4.5 Nano óxido de tungsteno

El nanoóxido de tungsteno se refiere al óxido de tungsteno con un tamaño de partícula en el rango de 1 a 100 nanómetros, generalmente en forma de trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura. Las partículas en este rango de tamaño exhiben propiedades

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

completamente diferentes a las de los materiales tradicionales debido a sus efectos nano, lo que se ha convertido en un tema candente en el campo de la investigación y la tecnología del tungsteno.

Existen varios métodos de preparación para el óxido de nano-tungsteno, incluida la precipitación química, la descomposición hidrotermal y a baja temperatura del paratungstato de amonio. Por ejemplo, controlando el pH y la temperatura de reacción de una solución de ácido tungstálico, se pueden generar nanopartículas homogéneas. Debido al tamaño de partícula extremadamente pequeño, su área de superficie específica aumenta significativamente, a menudo alcanzando decenas a cientos de metros cuadrados por gramo, y esta alta área de superficie le da una excelente actividad superficial. En términos de estructura cristalina, el óxido de nano-tungsteno es principalmente monoclinico o hexagonal, dependiendo de las condiciones de preparación.

En términos de rendimiento, las propiedades ópticas del óxido de nanotungsteno son particularmente prominentes. La banda prohibida puede estar ligeramente agrandada (2.5-3.0 eV) debido a los efectos del tamaño cuántico, lo que la hace excelente en el campo de la fotocatalisis, como la fotólisis del agua para producir hidrógeno o la degradación de contaminantes orgánicos. Desde el punto de vista eléctrico, su alta superficie específica y sus defectos, como las vacantes de oxígeno, mejoran su conductividad y sus capacidades de transporte de iones, lo que lo hace ideal para sensores de gas y materiales de electrodos de baterías de litio. Además, el nano óxido de tungsteno tiene buena dispersabilidad y se puede utilizar como aditivo para productos químicos de tungsteno en la preparación de tungstato o materiales compuestos.

En aplicaciones, el óxido de nanotungsteno es ampliamente utilizado en campos de alta tecnología. Por ejemplo, se puede mezclar con plástico de tungsteno o caucho de tungsteno para mejorar el rendimiento del material; También se puede utilizar como precursor del polvo de tungsteno para la producción de alambre de tungsteno o aguja de tungsteno. Con su pequeño tamaño, alta actividad y versatilidad, el nanoóxido de tungsteno se ha convertido en la combinación perfecta de nanotecnología e industria tradicional, y es el "representante de vanguardia" de la familia del óxido de tungsteno.

#### 3.4.6 Óxido de tungsteno subnanométrico

El óxido de tungsteno subnanométrico se refiere al óxido de tungsteno con un tamaño de partícula de menos de 1 nanómetro, generalmente en forma agrupada o molecular. Los materiales en este rango de tamaño son cercanos a la escala atómica, con propiedades más cercanas a las de las moléculas que a las de los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales sólidos convencionales. Debido a su tamaño extremadamente pequeño, la investigación y aplicación del óxido de tungsteno subnanométrico aún se encuentra en la etapa exploratoria, pero es de gran importancia en la investigación científica del tungsteno. La preparación de óxido de tungsteno subnanométrico requiere técnicas de alta precisión como la deposición de vapor (CVD), la epitaxia de haz molecular o la química de soluciones. La materia prima puede ser metatungstato de amonio o tungstato de sodio, y las subnanopartículas se generan mediante condiciones de reacción controladas con precisión, como concentraciones ultrabajas y enfriamiento rápido. Debido al tamaño de partícula extremadamente pequeño, la estructura cristalina es a menudo incompleta, y puede ser amorfa o parcialmente ordenada, con un área de superficie específica que alcanza el límite teórico y una proporción muy alta de átomos de superficie.

En términos de rendimiento, las propiedades ópticas y eléctricas del óxido de tungsteno subnanométrico se ven afectadas por importantes efectos de confinamiento cuántico. Su banda prohibida puede expandirse aún más, exhibiendo fuertes propiedades de fluorescencia, lo que lo convierte en una aplicación potencial en dispositivos optoelectrónicos como los LED (ver Tungsten Academic). En el campo de la catálisis, la actividad superficial ultra alta del óxido de tungsteno subnano lo hace extremadamente selectivo para reacciones de una sola molécula, como en la oxidación de CO o la síntesis orgánica. Además, la alta capacidad de ajuste de su estructura electrónica también lo ha convertido en una fuente de interés en sensores electroquímicos.

En términos de aplicación, el óxido de tungsteno subnanométrico se utiliza actualmente principalmente en la investigación de laboratorio, debido a su alto costo de preparación y poca estabilidad, la aplicación industrial no está madura. Sin embargo, se puede utilizar como una unidad funcional de productos químicos de tungsteno, compuesto con tungsteno, cobre o plástico de tungsteno, para explorar las posibilidades de nuevos materiales. En el futuro, con el avance de la tecnología de preparación, se espera que el óxido de tungsteno subnanométrico deje su huella en el campo de la nanomedicina (por ejemplo, la administración de fármacos) o la computación cuántica. El óxido de tungsteno subnanométrico se ha convertido en la "estrella del futuro" en la clasificación del óxido de tungsteno debido a su tamaño extremo y propiedades únicas, que representan la dirección de vanguardia de la ciencia de los materiales.

### 3.5 Clasificación del óxido de tungsteno en función de la pureza

La pureza del óxido de tungsteno es un indicador importante de su rendimiento y aplicación, y se puede dividir en dos categorías: óxido de tungsteno ordinario

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y óxido de tungsteno de alta pureza según el diferente contenido de impurezas. Las diferencias en la pureza tienen un impacto directo en su aplicabilidad en la industria y la investigación, que se discutirá en detalle a continuación.

### 3.5.1 Óxido de tungsteno ordinario

El óxido de tungsteno ordinario se refiere al óxido de tungsteno con baja pureza (generalmente entre el 95% y el 99%), principalmente en forma de trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) u óxido de tungsteno azul. Las impurezas incluyen elementos como hierro, molibdeno, sodio, etc., y generalmente se derivan del proceso de refinación de wolframita o scheelita, o residuos que no se eliminan por completo durante la calcinación del paratungstato de amonio.

El proceso de preparación del óxido de tungsteno ordinario es relativamente simple, por ejemplo, se prepara mediante calcinación directa de ácido tungstico o un método de reducción extensivo. Sus propiedades físicas son similares a las de la versión de alta pureza, con un punto de fusión de aproximadamente 1473 ° C y una densidad de 7,16 g/cm<sup>3</sup>, pero debido a la presencia de impurezas, su color puede estar ligeramente desviado (como amarillo grisáceo o opaco) y la estructura cristalina es principalmente un sistema cristalino monoclinico. Debido a la influencia de las impurezas, sus propiedades eléctricas y ópticas son ligeramente inferiores a las de los productos de alta pureza, pero sigue siendo práctico en escenarios menos exigentes.

En las aplicaciones, el óxido de tungsteno ordinario se utiliza principalmente en la producción industrial, por ejemplo, como materia prima para polvo de tungsteno, tungsteno metálico o ferrotungsteno. También se puede utilizar en la preparación de productos de gama baja como el tungstato para materiales refractarios o productos químicos de tungsteno. Es barato y adecuado para la producción a gran escala, pero su rendimiento en campos de alta precisión como la fotocatalisis o la electrónica es limitado.

El óxido de tungsteno ordinario se ha convertido en un "jugador básico" en el campo industrial debido a su economía y amplia aplicabilidad.

### 3.5.2 Óxido de tungsteno de alta pureza

El óxido de tungsteno de alta pureza se refiere al óxido de tungsteno con una pureza del 99,9% o superior, generalmente dominado por trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo). Tiene un contenido de impurezas muy bajo (<0,1%) y se produce mediante un proceso de purificación de varios pasos, por ejemplo,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a partir de metatungstato de amonio o tungstato de sodio por intercambio iónico, múltiples lavados y calcinación a alta temperatura.

Las propiedades físicas del óxido de tungsteno de alta pureza son extremadamente excelentes, el color es puro, la estructura cristalina es regular y la mayoría de ellos son sistemas cristalinos monoclinicos. Sus propiedades ópticas son estables y la banda prohibida de energía es precisa y controlable, lo que es adecuado para dispositivos optoelectrónicos y fotocatalizadores. Eléctricamente, la reducción de impurezas da como resultado una mejor conductividad y transporte de iones, y se usa comúnmente en sensores de alto rendimiento y materiales de baterías. Además, su alta pureza garantiza la estabilidad química y es adecuado para entornos hostiles. En aplicaciones, el óxido de tungsteno de alta pureza es la materia prima principal para los productos de tungsteno de alta gama, como en la producción de alambre de tungsteno, agujas de tungsteno o calentadores de tungsteno. También es ampliamente utilizado en vidrio inteligente, dispositivos electrocrómicos y nanorecubrimientos.

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

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

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD 黄色钨氧化物

## Capítulo 4 Estructura del óxido de tungsteno

### 4.1 Características de la estructura cristalina del óxido de tungsteno

La estructura cristalina del óxido de tungsteno es la base de sus propiedades físicas y químicas, lo que determina directamente su rendimiento en la tecnología de tungsteno, la investigación del tungsteno y las aplicaciones industriales. Dependiendo de las condiciones de preparación y la temperatura ambiente, el óxido de tungsteno puede exhibir una variedad de formas cristalinas, incluidas monoclinicas, ortogonales, hexagonales y cúbicas. Estas formas cristalinas se caracterizan por la disposición de los átomos de tungsteno y oxígeno y sus propiedades de enlace químico. La siguiente sección discutirá las características de la estructura cristalina del óxido de tungsteno en términos de unidades básicas, simetría, disposición atómica, defectos y vacantes.

El óxido de tungsteno generalmente está representado por trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), y su estructura cristalina está formada por la combinación de átomos de tungsteno y átomos de oxígeno en proporciones y formas específicas.

En la naturaleza, el tungsteno existe en forma de wolframita o scheelita, que se refina y se convierte en óxido de tungsteno. Su estructura cristalina no solo afecta sus propiedades ópticas (como las propiedades electrocromáticas),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sino que también determina sus propiedades eléctricas y catalíticas, lo que lo hace ampliamente utilizado en campos como el vidrio inteligente, los fotocatalizadores y los sensores.

#### 4.1.1 La unidad básica y la simetría de la estructura cristalina de óxido de tungsteno.

La unidad básica de la estructura cristalina de óxido de tungsteno es el octaedro  $WO_6$ , es decir, un átomo de tungsteno está rodeado por seis átomos de oxígeno para formar una estructura de coordinación octaédrica. Estos elementos están conectados por coangulación, colado o coplanaridad para formar una red cristalina tridimensional. La presencia de octaedro  $WO_6$  es fundamental para la estabilidad estructural del óxido de tungsteno y la base de su polimorfismo.

En la forma cristalina monoclinica de trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), el octaedro  $WO_6$  está conectado por una conexión coangular para formar un marco tridimensional asimétrico, que tiene baja simetría y pertenece al sistema cristalino monoclinico. Esta asimetría hace que las formas cristalinas monoclinicas sean más estables a temperatura ambiente y se utiliza a menudo en la producción industrial (por ejemplo, polvo de tungsteno y preparación de tungsteno) y materiales funcionales (por ejemplo, vidrio inteligente). A medida que aumenta la temperatura, por ejemplo, a 300–500 ° C, el óxido de tungsteno se puede transformar en una forma cristalina ortorrómbica, la simetría de la unidad  $WO_6$  mejora y la disposición de la red cristalina es más regular, lo que pertenece al sistema cristalino ortorrómbico.

El óxido de tungsteno hexagonal se prepara por método hidrotermal (por ejemplo, metatungstato de amonio como materia prima), y el octaedro  $WO_6$  se dispone simétricamente en simetría hexagonal para formar una estructura de canal abierto, que tiene alta simetría y es adecuada para aplicaciones de incrustación de iones (como materiales de baterías). A temperaturas más altas (por ejemplo, por encima de 900 ° C), el óxido de tungsteno puede transformarse en una forma de cristal cúbico, y la simetría de la unidad  $WO_6$  alcanza el máximo, que pertenece al sistema de cristal cúbico, pero debido a la inestabilidad termodinámica, la aplicación práctica es menor (consulte Tungsten Academic).

El cambio de simetría afecta directamente a las propiedades del óxido de tungsteno. Por ejemplo, la forma monoclinica con baja simetría tiene una fuerte capacidad electrocrómica, mientras que la forma hexagonal con alta simetría tiene más ventajas en catálisis debido a su estructura abierta. Industrialmente, el óxido de tungsteno producido por calcinación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

paratungstato de amonio es principalmente en forma de cristal monoclinico, que es el más adecuado para la producción a gran escala de productos de tungsteno debido a su estabilidad. Como unidad básica, el octaedro  $WO_6$  dota al óxido de tungsteno de una rica diversidad estructural a través de diferentes métodos de conexión y simetría.

La unidad básica y la simetría de la estructura cristalina de óxido de tungsteno son la clave para comprender su versatilidad y sentar las bases para su aplicación en diferentes campos.

#### 4.1.2 Disposición atómica del óxido de tungsteno

La disposición atómica del óxido de tungsteno es la realización de su estructura cristalina, que determina directamente sus parámetros de red y características de rendimiento. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, su disposición atómica se basa en la distribución espacial del octaedro  $WO_6$ , y las posiciones relativas de los átomos de tungsteno y oxígeno en diferentes formas de cristal son diferentes.

En el óxido de tungsteno monoclinico, el átomo de tungsteno se encuentra en el centro del octaedro y seis átomos de oxígeno se distribuyen a su alrededor, formando una unidad  $WO_6$  ligeramente distorsionada. Estos elementos están conectados por un co-ángulo y están dispuestos en las tres direcciones de la red a, b y c, pero debido a la baja simetría del sistema monoclinico, el ángulo de la red (ángulo  $\beta$ ) no es de  $90^\circ$ , lo que resulta en una asimetría de la disposición atómica. Esta disposición permite que la forma monoclinica sea estable a temperatura ambiente, con parámetros de red típicamente  $a \approx 7,3 \text{ \AA}$ ,  $b \approx 7,5 \text{ \AA}$ ,  $c \approx 7,7 \text{ \AA}$ . Esta estructura es adecuada para aplicaciones eléctricas y ópticas, como el cambio de color en vidrio inteligente.

La disposición atómica de la forma cristalina ortorrómbica es más regular, la distorsión del octaedro  $WO_6$  se reduce, las posiciones de los átomos de tungsteno y oxígeno son más simétricas y los parámetros de la red tienden a ser ortogonales ( $a \neq b \neq c$ , pero el ángulo está cerca de  $90^\circ$ ). Esta disposición se forma a altas temperaturas, aumentando el sitio activo superficial, lo que la hace excelente en fotocátalisis. El óxido de tungsteno hexagonal está dispuesto en simetría hexagonal, la unidad  $WO_6$  forma una estructura similar a un canal alrededor del eje central, los átomos de tungsteno y los átomos de oxígeno se distribuyen a lo largo del eje de simetría hexagonal, y el eje c es más largo en los parámetros de la red. Esta disposición se encuentra comúnmente en la morfología de nanovarillas o nanotubos y es adecuada para el transporte de iones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La forma de cristal cúbico del óxido de tungsteno tiene la simetría más alta, el octaedro  $WO_6$  está dispuesto equidistantemente en tres direcciones, las posiciones de los átomos de tungsteno y oxígeno son perfectamente simétricas y el parámetro de red  $a = b = c$ . Este arreglo se forma a altas temperaturas, pero debido a la inestabilidad, solo se usa para investigación teórica. En la industria, la disposición atómica del óxido de tungsteno es principalmente en forma de cristal monoclinico, como a través de la descomposición de ácido tungstico o la calcinación de paratungstato de amonio, y su disposición atómica regular garantiza la calidad de la producción de metal de tungsteno.

La disposición atómica del óxido de tungsteno cambia por la conexión y la simetría de las unidades  $WO_6$ , formando una estructura cristalina diversa, que afecta directamente su potencial de aplicación en productos de tungsteno.

#### 4.1.3 Defectos y vacantes en la estructura cristalina de óxido de tungsteno

Los defectos y vacantes en la estructura cristalina del óxido de tungsteno son reguladores importantes de sus propiedades, especialmente en el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) y sus compuestos inertes (como el óxido de tungsteno azul, el óxido de tungsteno púrpura). Los defectos incluyen principalmente vacantes de oxígeno, vacantes de tungsteno y átomos de impurezas, siendo las vacantes de oxígeno el tipo más común e influyente.

Las vacantes de oxígeno se refieren a la ausencia de átomos de oxígeno en el octaedro  $WO_6$ , lo que resulta en una disminución en el número de coordinación de los átomos de tungsteno y una distorsión local de la red cristalina. En el trióxido de tungsteno, el contenido de vacante de oxígeno es bajo, la estructura está relativamente intacta y es amarilla. Y cuando la vacante de oxígeno aumenta, como en el óxido de tungsteno azul o el óxido de tungsteno púrpura, el átomo de oxígeno en la estructura cristalina se reduce, el estado de oxidación del tungsteno se reduce parcialmente y el color y las propiedades cambian. La presencia de vacantes de oxígeno mejora la absorción de luz al cambiar la estructura electrónica, reduciendo la banda prohibida de energía (de 2,5-2,8 eV a un nivel inferior).

La introducción de defectos suele estar relacionada con las condiciones de preparación. Por ejemplo, durante la calcinación del paratungstato de amonio, si las vacantes de oxígeno aumentan significativamente cuando se opera en una atmósfera reductora como el hidrógeno, se forma óxido de tungsteno azul o púrpura. Debido a su alta conductividad y actividad catalítica, estos estados defectuosos del óxido de tungsteno se usan comúnmente en sensores de gas y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales fototérmicos. Además, los defectos de impurezas, como los iones de sodio dopados con tungstato de sodio, también pueden afectar la estructura cristalina, lo que puede hacer que la red cristalina se expanda o contraiga, cambiando su estabilidad.

En las aplicaciones, las vacantes de oxígeno tienen un doble efecto sobre las propiedades del óxido de tungsteno. Por un lado, mejora las propiedades eléctricas y catalíticas, lo que facilita la reducción en la preparación de productos químicos de tungsteno como el tungstato. Por otro lado, demasiadas vacantes pueden reducir la estabilidad de la estructura y afectar su rendimiento en ambientes de alta temperatura. Los defectos y vacantes en la estructura cristalina del óxido de tungsteno son medios importantes de funcionalización, que brindan flexibilidad para su aplicación en múltiples campos.

#### 4.2 Factores que influyen en la estructura cristalina del óxido de tungsteno

La estructura cristalina del óxido de tungsteno es clave para sus propiedades y está sujeta a una variedad de factores externos. Estos factores incluyen las condiciones de preparación (por ejemplo, temperatura, presión y tiempo), las características de la materia prima y las condiciones ambientales. Al manipular estos factores, es posible lograr un control preciso de la estructura cristalina del óxido de tungsteno, optimizando así su rendimiento en la tecnología de tungsteno, la investigación del tungsteno y las aplicaciones industriales. Los efectos específicos de las condiciones de preparación en la estructura cristalina del óxido de tungsteno se discuten en detalle a continuación.

##### 4.2.1 Efecto de las condiciones de preparación sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio

Las condiciones de preparación son uno de los factores más importantes que afectan la estructura cristalina del óxido de tungsteno, incluida la temperatura de reacción, la presión, el tiempo, la atmósfera y la selección de materias primas. Estas condiciones determinan la forma cristalina (por ejemplo, monoclinico, ortogonal, hexagonal o cúbico), el tamaño de grano y la distribución defectuosa del óxido de tungsteno. Tomando el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) como ejemplo, su estructura cristalina generalmente está formada por descomposición o calcinación de paratungstato de amonio o ácido tungstico en condiciones específicas, y los diferentes parámetros de preparación conducen a diferentes características estructurales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la producción industrial, la optimización de las condiciones de preparación está directamente relacionada con la calidad y el uso del óxido de tungsteno. Por ejemplo, mediante el control de las condiciones de calcinación, es posible generar óxido de tungsteno adecuado para la producción de polvo de tungsteno o filamento de tungsteno, o materiales funcionales adecuados para fotocatalizadores y vidrio inteligente. En el laboratorio, el método hidrotermal, el método solvotérmico y otras técnicas de preparación brindan más posibilidades para el control de la estructura cristalina del óxido de tungsteno a nanoescala. A continuación se analizará la influencia de la temperatura, la presión y el tiempo de reacción en la estructura cristalina del óxido de tungsteno.

#### 4.2.1.1 Efecto de la temperatura de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno

La temperatura de reacción es uno de los parámetros más críticos que afectan la estructura cristalina del óxido de tungsteno, que no solo determina la transformación de la forma cristalina, sino que también afecta el tamaño del grano y la formación de defectos. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno, su estructura cristalina cambia significativamente a diferentes temperaturas.

En el rango de baja temperatura desde la temperatura ambiente hasta aproximadamente 330 ° C, el óxido de tungsteno está dominado por la forma cristalina monoclinica, que es la forma estable del óxido de tungsteno amarillo. El octaedro  $WO_6$  se conecta en el mismo ángulo para formar una red tridimensional asimétrica con parámetros de red estables, adecuada para aplicaciones electrocrómicas. Cuando la temperatura sube a 300–500 ° C, el óxido de tungsteno comienza a transformarse en una forma de cristal ortorrómbico, la simetría de la unidad  $WO_6$  mejora y la disposición de la red es más regular. Esta estructura exhibe una mayor actividad en fotocatalisis debido a su apertura que aumenta el sitio de superficie. Calentando aún más hasta 700–900 ° C, el óxido de tungsteno se puede convertir en formas de cristal hexagonal, especialmente en condiciones hidrotermales, para formar nanovarillas o estructuras tubulares, adecuadas para aplicaciones de intercalación de iones.

A temperaturas más altas (por ejemplo, por encima de 900 ° C), el óxido de tungsteno puede formar formas de cristal cúbico, y la simetría del octaedro  $WO_6$  es máxima, pero solo es común en estudios teóricos debido a la inestabilidad termodinámica. Además, la temperatura afecta el crecimiento del grano. Los granos de óxido de tungsteno preparados a bajas temperaturas (por ejemplo, 400–

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

600 ° C) son más pequeños, por ejemplo, nanopartículas formadas por calcinación de paratungstato de amonio; La alta temperatura (por ejemplo, por encima de 800 ° C) promueve el crecimiento de granos, formando partículas gruesas o del tamaño de una micra de óxido de tungsteno, que es adecuado para la producción de metal de tungsteno.

La temperatura también afecta el contenido de vacantes de oxígeno. Cuando se trata con óxido de tungsteno a altas temperaturas en una atmósfera reductora (por ejemplo, hidrógeno), las vacantes de oxígeno aumentan, lo que puede resultar en la formación de óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura, la estructura cristalina se distorsiona. La temperatura de reacción tiene un profundo efecto en la estructura cristalina del óxido de tungsteno al regular la forma del cristal, el tamaño del grano y los defectos, y es la variable central en el proceso de preparación.

#### 4.2.1.2 Efecto de la presión de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno

La presión de reacción es otro factor importante que afecta la estructura cristalina del óxido de tungsteno, especialmente en procesos de preparación a alta presión como la calcinación hidrotermal o a alta presión. La presión afecta el proceso de nucleación y crecimiento de los cristales al cambiar el equilibrio termodinámico del sistema de reacción, regulando así sus características estructurales.

En condiciones de presión normal (como la calcinación de paratungstato de amonio en el aire), el óxido de tungsteno se forma principalmente en forma de cristal monoclinico, y la disposición del octaedro  $WO_6$  está dominada por la temperatura y la atmósfera, y la presión se ve menos afectada. Sin embargo, en entornos de alta presión, como la síntesis hidrotermal de nanoóxido de tungsteno, la presión cambia significativamente la estructura cristalina. Utilizando tungstato de sodio como materia prima, el óxido de tungsteno tiende a formar formas cristalinas hexagonales en reactores de alta presión (presiones de hasta varios megapascuales). Las celdas  $WO_6$  de esta forma cristalina están dispuestas a lo largo del eje hexagonal para formar una estructura de canal abierto con un eje c largo en los parámetros de la red, lo que las hace adecuadas para aplicaciones de baterías y sensores.

La alta presión también puede afectar el tamaño y la morfología del grano. En condiciones hidrotermales de alta presión, la tasa de nucleación del óxido de tungsteno se acelera, el crecimiento del grano se restringe y a menudo se forman formas como nanovaras, nanohojas o nanoflores, en lugar de grandes

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructuras de partículas. Además, la alta presión puede inhibir la volatilización de los átomos de oxígeno, reducir la formación de vacantes de oxígeno y hacer que la estructura cristalina del óxido de tungsteno sea más regular. Por ejemplo, el trióxido de tungsteno preparado a alta presión tiene mayor cristalinidad y pureza que los productos a presión atmosférica, lo que lo hace adecuado para la producción de productos químicos de tungsteno de alta precisión.

A presiones extremadamente altas (por ejemplo, multi-megapascales, condiciones de la corteza simuladas en laboratorio), el óxido de tungsteno puede formar cristales cúbicos, ya que la alta presión obliga a las células  $WO_6$  a estar más alineadas y simétricas para aumentar. Sin embargo, esta condición es difícil de lograr en la industria y se utiliza principalmente para la investigación teórica. Industrialmente, la regulación de la presión del óxido de tungsteno se concentra principalmente en procesos hidrotermales o de deposición de vapor para optimizar la estructura de los productos de tungsteno a nanoescala. Al influir en la selección de la forma cristalina, la morfología del grano y la distribución de defectos, la presión de reacción proporciona una dimensión adicional para la regulación de la estructura cristalina del óxido de tungsteno, especialmente en la preparación de nanomateriales.

#### 4.2.1.3 Efecto del tiempo de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio

El tiempo de reacción es un parámetro importante en la preparación de óxido de tungsteno, que afecta directamente la cristalinidad, el tamaño de grano y la transición de fase de la estructura cristalina. En diferentes métodos de preparación, el tiempo juega un papel clave en la evolución estructural del óxido de tungsteno.

En el proceso de calcinación de paratungstato de amonio para preparar óxido de tungsteno, el tiempo de reacción es corto (por ejemplo, 1-2 horas) y generalmente se genera trióxido de tungsteno monoclinico con baja cristalinidad, con granos más pequeños (escala nano a submicrónica) y muchos defectos superficiales. Esta estructura es adecuada para aplicaciones que requieren una alta actividad, como fotocatalizadores o sensores. Con la prolongación del tiempo de reacción (por ejemplo, 4-6 horas), los granos crecen gradualmente, la cristalinidad aumenta, la estructura cristalina se vuelve más regular y las vacantes de oxígeno disminuyen. Este óxido de tungsteno de alta cristalinidad es más adecuado para la producción de polvo de tungsteno o metal de tungsteno debido a su mejor estabilidad.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la preparación hidrotermal del óxido de tungsteno, el tiempo de reacción también es crucial. Por ejemplo, con ácido tungstico como materia prima, una reacción a corto plazo (2-4 horas) puede generar nanopartículas amorfas o de baja cristalinidad, y extendidas a 12-24 horas, se forman nanovarillas cristalinas hexagonales o nanoflores, con una disposición ordenada de la red y una estructura de canal obvia. Esta dependencia del tiempo refleja el proceso dinámico de los cristales desde la nucleación hasta el crecimiento. Los tiempos de reacción excesivamente largos (más de 48 horas) pueden provocar una agregación excesiva de granos, la pérdida del control de la morfología y un deterioro del rendimiento.

El tiempo de reacción también afecta a la transición de fase. En la calcinación a alta temperatura, solo se pueden formar formas monoclinicas durante un corto período de tiempo, mientras que el calentamiento prolongado (combinado con altas temperaturas) puede inducir una transición a formas cristalinas ortogonales o hexagonales. Además, en una atmósfera reductora (por ejemplo, en hidrógeno), una reacción a largo plazo aumenta las vacantes de oxígeno y forma óxido de tungsteno azul o púrpura, que distorsiona la estructura cristalina, lo que lo hace adecuado para usos específicos de los productos químicos de tungsteno.

En la industria, Xiamen Tungsten y otras empresas equilibran la cristalinidad y la actividad del óxido de tungsteno optimizando el tiempo de reacción para satisfacer las necesidades de diferentes productos de tungsteno. El tiempo de reacción se ha convertido en un medio importante para regular la estructura cristalina del óxido de tungsteno mediante el control del crecimiento del cristal y la evolución de defectos.

#### 4.2.1.4 Efecto de la atmósfera de reacción sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio

La atmósfera de reacción es un parámetro importante en la preparación de óxido de tungsteno, que afecta directamente su estructura cristalina, estado de oxidación y distribución de defectos. Diferentes atmósferas (por ejemplo, oxidante, reductora o inerte) cambian la forma en que se combinan los átomos de tungsteno y oxígeno, regulando así la forma cristalina y las propiedades del óxido de tungsteno. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno, su estructura cristalina cambia significativamente en diferentes atmósferas.

En una atmósfera oxidante (como el aire o el oxígeno puro), el óxido de tungsteno generalmente se prepara utilizando paratungstato de amonio o ácido tungstico como materias primas, y el trióxido de tungsteno monoclinico se

genera por calcinación. En tales condiciones, el oxígeno es abundante, la estructura del octaedro  $WO_6$  está intacta, las vacantes de oxígeno son muy pocas y la disposición de la red cristalina es regular, mostrando un color amarillo brillante. Esta estructura cristalina es muy estable y adecuada para la producción de vidrio inteligente y fotocatalizadores. Cuanto mayor sea la concentración de oxígeno, mejor será la cristalinidad, y los granos también pueden ser un poco más grandes, lo que es adecuado para la preparación de polvo de tungsteno o filamento de tungsteno.

En atmósferas reductoras como el hidrógeno o mezclas de hidrógeno y nitrógeno, el contenido de oxígeno del óxido de tungsteno disminuye, formando compuestos no enteros. Por ejemplo, en una atmósfera de hidrógeno de 500–700 ° C, el trióxido de tungsteno se puede convertir en óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura. En estas estructuras, las vacantes de oxígeno aumentan, el octaedro  $WO_6$  se distorsiona, la simetría de la red se reduce y la banda prohibida de energía se estrecha. Este estado defectuoso del óxido de tungsteno tiene una mayor conductividad eléctrica y actividad catalítica y se usa a menudo en sensores de gas o como intermedio en el metal de tungsteno. Cuanto más fuerte es el grado de reducción (por ejemplo, alta concentración de hidrógeno o alta temperatura), más vacantes de oxígeno y más significativo es el cambio en la estructura cristalina.

Las atmósferas inertes, como el argón o el nitrógeno, se encuentran en algún punto intermedio y se utilizan normalmente para controlar las vacantes de oxígeno a niveles moderados. Por ejemplo, la calcinación de óxido de tungsteno en una atmósfera inerte produce formas cristalinas monoclinicas parcialmente defectuosas, donde el tamaño de grano y la cristalinidad están dominados por la temperatura y el tiempo. El óxido de tungsteno en estas condiciones tiene estabilidad y cierta actividad, lo que es adecuado para la preparación de productos químicos de tungsteno específicos.

#### 4.2.1.5 Efecto de la velocidad de reacción sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno

Como material multifuncional, la estructura cristalina del óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) tiene un efecto significativo en sus propiedades físicas y químicas. En diferentes reacciones químicas o procesos físicos, la velocidad de reacción no solo determina la eficiencia de formación del óxido de tungsteno, sino que también tiene un profundo efecto en la formación, transformación y estabilidad de su estructura cristalina. La velocidad de reacción generalmente está regulada por factores como la temperatura, la presión, la concentración de reactivo, el catalizador y el método de síntesis, que juntos dan forma a la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

forma cristalina, la densidad de defectos y la micromorfología del óxido de tungsteno a través de mecanismos cinéticos y termodinámicos. En este artículo, discutiremos en detalle el efecto de la velocidad de reacción en la estructura cristalina del óxido de tungsteno y revelaremos sus leyes internas basadas en el análisis cinético, la evidencia experimental y los antecedentes de la aplicación.

## 1. Propiedades básicas de la estructura cristalina de óxido de tungsteno.

La estructura cristalina del óxido de tungsteno es diversa, incluyendo principalmente monoclinicos, ortorrómbicos, tetragonales y cúbicos. Entre ellos, el cristal monoclinico es la forma cristalina más estable a temperatura ambiente, el grupo espacial es  $P2_1/n$  y los parámetros de la red son  $a = 7.306 \text{ \AA}$ ,  $b = 7.540 \text{ \AA}$ ,  $c = 7.692 \text{ \AA}$ ,  $\beta = 90.91^\circ$ . A medida que aumenta la temperatura, el óxido de tungsteno puede sufrir transformaciones de fase, como cristales ortorrómbicos a unos  $330^\circ \text{ C}$  y cristales tetragonales por encima de  $740^\circ \text{ C}$ . Además, el óxido de tungsteno a nanoescala a menudo exhibe una estructura cristalina cúbica debido a su mayor energía superficial y menor tamaño de grano.

La formación de la estructura cristalina está estrechamente relacionada con la velocidad de reacción. En condiciones de reacción rápida, los factores cinéticos dominan el crecimiento de los cristales, lo que puede dar lugar a estructuras no equilibradas (por ejemplo, fases metaestables o estados defectuosos); Sin embargo, bajo la condición de reacción lenta, prevalece el equilibrio termodinámico y tiende a formarse el monoclinico estable. Las diferencias en estas estructuras afectan directamente la banda prohibida, la conductividad y la actividad catalítica del óxido de tungsteno.

## 2. El mecanismo cinético de la velocidad de reacción en la formación de estructuras cristalinas

La velocidad de reacción determina la estructura cristalina del óxido de tungsteno al afectar el proceso de nucleación de cristales y el crecimiento del grano. A continuación se presenta un análisis dinámico del mecanismo de influencia:

- Tasa de formación del núcleo Durante la síntesis de óxido de tungsteno (por ejemplo, oxidación del polvo de tungsteno o descomposición térmica del ácido tungstónico), la velocidad de reacción determina la velocidad de formación del núcleo cristalino. Las reacciones rápidas (por ejemplo, tostado a alta temperatura  $> 800^\circ \text{ C}$ ) dan como resultado una alta

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

supersaturación y una tasa acelerada de formación de nucleación, lo que da como resultado una gran cantidad de granos de tamaño pequeño. En este caso, los cristales no tienen suficiente tiempo para crecer y tienden a formar fases metaestables (por ejemplo, tetragonales o cúbicas). Por ejemplo, el análisis XRD del óxido de tungsteno producido por el óxido de tungsteno metálico rápido muestra que la proporción de fases cúbicas es significativamente mayor que la de los productos de oxidación lenta.

- La tasa de crecimiento del grano, la tasa de reacción, también afecta el proceso de crecimiento del grano. En condiciones de reacción lenta (por ejemplo, hidrotermal criogénica, 150–200 ° C), los núcleos tienen tiempo suficiente para crecer a lo largo de la orientación termodinámicamente óptima para formar granos monoclinicos grandes y regulares. Por el contrario, la reacción rápida (por ejemplo, oxidación instantánea a alta temperatura del filamento de tungsteno) restringe la disposición ordenada de los granos y es fácil generar estructuras de coexistencia desordenadas o multifásicas. Los resultados muestran que al controlar el tiempo de reacción (1 hora frente a 24 horas), el tamaño de grano del óxido de tungsteno puede alcanzar 20–50  $\mu\text{m}$  para una síntesis lenta y solo 1–5  $\mu\text{m}$  para una síntesis rápida.
- La rápida velocidad de reacción de la generación de defectos suele ir acompañada de un alto aporte de energía, lo que resulta en un aumento de los defectos (por ejemplo, vacantes de oxígeno o dislocaciones de tungsteno) en la estructura cristalina. Por ejemplo, durante la oxidación rápida de las partículas de tungsteno, la difusión de oxígeno es limitada y el óxido de tungsteno resultante puede tener una relación no estequiométrica, que se manifiesta como óxido de tungsteno azul ( $\text{W}_{20}\text{O}_{58}$ ). Estos defectos cambian la simetría de la red y afectan la estabilidad de la forma cristalina.

### 3. Los efectos específicos de la regulación de la velocidad de reacción

La velocidad de reacción generalmente se controla mediante la temperatura, la concentración de reactivo y el método de síntesis, y sus efectos específicos sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno se analizan de la siguiente manera:

- Efecto de la temperatura La temperatura es el principal impulsor de la velocidad de reacción. En reacciones lentas a bajas temperaturas ( $<300$  ° C), como la calcinación a baja temperatura del metatungstato de amonio, el óxido de tungsteno tiende a formar cristales monoclinicos con

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un alto orden retular, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una alta estabilidad (por ejemplo, dispositivos electrocrómicos). En la reacción rápida a alta temperatura ( $>700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), como la oxidación instantánea de la aguja de tungsteno bajo atmósfera de oxígeno, el óxido de tungsteno generado es principalmente cristal tetragonal o cúbico, con granos pequeños y abundantes defectos. Esta estructura exhibe una mayor actividad en el campo de la fotocatalisis debido a su estrecha banda prohibida (alrededor de  $2,6\text{ eV}$ ).

- Las concentraciones de reactivos afectan a las altas concentraciones de reactivos (por ejemplo, oxígeno o solución de tungstato de sodio) y aceleran la velocidad de reacción, lo que hace que la estructura cristalina esté sesgada hacia una fase metaestable. Por ejemplo, oxidación rápida a alta presión de oxígeno ( $>1\text{ atm}$ ). Polvo de tungsteno, óxido de tungsteno generado, es principalmente cristal cúbico y el tamaño de grano es inferior a  $10\text{ }\mu\text{m}$ . Mientras que las reacciones de baja concentración (por ejemplo, dilución de ácido tungstico La precipitación lenta de la solución) conducen al crecimiento de cristales monoclinicos, y el tamaño de grano puede alcanzar más de  $50\text{ }\mu\text{m}$ .
- Efecto del método de síntesis Los diferentes métodos de síntesis afectan significativamente la estructura cristalina al controlar la velocidad de reacción:
  - Método de tostado: El óxido de tungsteno generado por el tostado rápido a alta temperatura ( $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 1 hora) es principalmente una fase tetragonal o mixta, que es adecuada para la producción de polvo de tungsteno.
  - Método hidrotermal: El óxido de tungsteno generado por el calor hidrotermal lento y a baja temperatura está dominado por cristales monoclinicos con granos regulares, lo que es adecuado para aplicaciones nano.
  - Deposición de vapor: Las películas de óxido de tungsteno formadas por deposición rápida suelen ser cristales cúbicos y se utilizan en dispositivos electrónicos.

#### 4.2.1.6 Efecto de los precursores sobre la estructura cristalina del óxido de volframio

Los precursores son los materiales de partida para la preparación de óxido de tungsteno, y sus características de composición química, estructura y descomposición afectan directamente la formación de la estructura cristalina final. Los precursores comunes incluyen paratungstato de amonio, metatungstato

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de amonio, ácido tungstico y tungstato de sodio, y la elección de diferentes precursores da como resultado diferencias en la forma del cristal de óxido de tungsteno, el tamaño de grano y la pureza.

Tomemos como ejemplo el paratungstato de amonio (APT), que se calcina y descompone a 500–700 ° C en el aire para formar trióxido de tungsteno monoclinico. La estructura molecular de APT es regular y se liberan amoniaco y vapor de agua durante la descomposición, lo que da como resultado pequeños granos de óxido de tungsteno (escala de micras a submicras), alta cristalinidad y pocas vacantes de oxígeno. Esta estructura cristalina es adecuada para la producción industrial de polvo de tungsteno o metal de tungsteno. Si se calcina en hidrógeno, APT produce óxido de tungsteno azul o púrpura, y la estructura cristalina se distorsiona debido a las vacantes de oxígeno.

El metatungstato de amonio (AMT) es más adecuado para la preparación de óxido de tungsteno a nanoescala. Por métodos hidrotermales o solvotérmicos, el óxido de tungsteno producido por la descomposición de AMT suele tener forma de cristal hexagonal, y los granos tienen la forma de nanovarillas o nanoláminas, porque la predisposición de las unidades de oxígeno de tungsteno en la molécula ayuda a formar una estructura abierta. Esta estructura cristalina sobresale en baterías y sensores. Por el contrario, el ácido tungstico produce granos de óxido de tungsteno más grandes cuando se descompone térmicamente, con baja cristalinidad y puede contener una pequeña cantidad de fase amorfa, lo que lo hace adecuado para la investigación de laboratorio en lugar de aplicaciones industriales. Cuando se utiliza tungstato de sodio como precursor, la estructura cristalina del óxido de tungsteno se ve afectada por los iones de sodio. Si las impurezas de sodio no se eliminan por completo, la red cristalina puede hincharse, la cristalinidad puede disminuir e incluso se puede formar heterofase. Sin embargo, después del lavado y la purificación, se puede obtener óxido de tungsteno monoclinico de alta pureza, que es adecuado para dispositivos optoelectrónicos. La solubilidad y la tasa de descomposición de los precursores también afectan la estructura cristalina, por ejemplo, la descomposición rápida (por ejemplo, calcinación a corto plazo a alta temperatura) produce granos pequeños con muchos defectos, mientras que la descomposición lenta da como resultado granos grandes regulares.

#### 4.2.1.7 Efecto del disolvente sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno

Los disolventes desempeñan un papel clave en la preparación del óxido de tungsteno mediante métodos químicos húmedos (por ejemplo, hidrotermales, métodos solvotérmicos), y sus propiedades (como la polaridad, el punto de

ebullición y la capacidad de coordinación) afectan directamente a la nucleación y el crecimiento de las estructuras cristalinas. En el caso del trióxido de tungsteno, diferentes disolventes pueden dar lugar a diferencias en la forma del cristal, la morfología y el tamaño de grano.

El agua es el solvente más utilizado, y generalmente se generan nanovarillas hexagonales o nanotubos cuando el óxido de tungsteno se prepara por método hidrotermal (por ejemplo, metatungstato de amonio como materia prima). La fuerte polaridad del agua y las propiedades supercríticas a alta temperatura y presión promueven la disposición ordenada de las celdas  $WO_6$ , formando una estructura de canal abierto. Esta estructura cristalina es adecuada para aplicaciones de incrustación de iones, como los materiales de electrodos de baterías. Si se agrega un ácido (por ejemplo, ácido clorhídrico) a la solución acuosa, se pueden formar nanopartículas monoclinicas, lo que acelerará la nucleación debido al ambiente ácido e inhibirá el crecimiento del grano.

Los disolventes orgánicos como el etanol o el etilenglicol, debido a su baja polaridad y alto punto de ebullición, producen estructuras cristalinas de óxido de tungsteno que son en su mayoría formas cristalinas monoclinicas, y la morfología está sesgada hacia las nanohojas o nanoflores. Por ejemplo, el tungstato de sodio se disuelve en etanol para una reacción solvotérmica, y la coordinación del etanol ralentiza la tasa de crecimiento de cristales y forma una estructura en capas. Esta estructura cristalina tiene una alta superficie específica y es adecuada para fotocatalizadores o sensores. Además, los disolventes orgánicos también pueden regular el crecimiento de los planos cristalinos a través de la adsorción superficial, como la exposición preferente de ciertos planos cristalinos y el cambio de la simetría cristalina. Los disolventes mixtos, como las mezclas de agua y etanol, tienen lo mejor de ambos mundos, produciendo cristales de transición entre monoclinicos y hexagonales con un control más fácil del tamaño y la morfología del grano. Por ejemplo, aumentar la proporción de etanol puede reducir el tamaño del grano y aumentar la cristalinidad. La viscosidad y la volatilidad de los disolventes también afectan a la estructura cristalina, ya que los disolventes de alta viscosidad, como el glicerol, dan lugar a óxido de tungsteno amorfo o de baja cristalinidad, mientras que los disolventes de baja viscosidad promueven la formación de cristales estructurados.

#### 4.2.2 Efecto de los estímulos externos sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno

Estímulos externos (como la luz, la fuerza mecánica, el campo electromagnético, etc.) juegan un papel importante en la formación y posterior evolución de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructura cristalina de óxido de tungsteno. Estos estímulos pueden alterar la disposición de la red, inducir transiciones de fase o introducir defectos que pueden afectar su rendimiento. El efecto de la luz sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno se refleja principalmente en el proceso de preparación o uso fotocatalítico. Por ejemplo, bajo luz ultravioleta, la reacción hidrotermal del ácido tungstico como materia prima puede acelerar la nucleación del óxido de tungsteno para formar nanopartículas monoclinicas. La excitación de electrones inducida por la luz puede promover el crecimiento selectivo de los planos cristalinos y cambiar la morfología de los cristales. Además, la exposición a la luz a largo plazo puede introducir vacantes de oxígeno en la superficie del trióxido de tungsteno, y la estructura cristalina puede distorsionarse localmente, mejorando la capacidad de absorción de luz.

No debe pasarse por alto la influencia de las fuerzas mecánicas (por ejemplo, molienda o sonicación) en la estructura cristalina del óxido de tungsteno. El molienda de bolas de alta energía tritura el óxido de tungsteno del tamaño de una micra en submicropartículas o nanopartículas mientras introduce tensiones y defectos de red para reducir la cristalinidad. Este cambio estructural lo hace más activo y adecuado para aplicaciones catalíticas. La sonicación puede inducir un reordenamiento del grano, como la conversión de óxido de tungsteno amorfo en una forma monoclinica con baja cristalinidad.

Los campos electromagnéticos juegan un papel importante en la preparación de óxido de tungsteno por deposición de vapor o método de plasma. Por ejemplo, con la ayuda de campos electromagnéticos, la estructura cristalina de las películas de óxido de tungsteno tiende a la forma de cristal monoclinico y la disposición del grano es más densa, lo que es adecuado para dispositivos optoelectrónicos. Además, el fuerte campo eléctrico puede inducir la transformación de fase del óxido de tungsteno, como de forma cristalina monoclinica a ortorrómbica, y mejorar sus propiedades eléctricas. Los estímulos externos proporcionan una nueva forma para la regulación dinámica de la estructura cristalina de óxido de tungsteno a través de acciones físicas o químicas, especialmente en el desarrollo de materiales funcionales.

#### **4.2.2.1 Efecto de la radiación óptica sobre la estructura cristalina del óxido de wolframio**

Como estímulo externo, la radiación luminosa tiene un efecto significativo en la formación y evolución de la estructura cristalina del óxido de tungsteno, especialmente cuando se utiliza en la preparación fotocatalítica o en condiciones de luz. La radiación óptica afecta la forma del cristal, los defectos y la morfología del óxido de tungsteno al excitar electrones, inducir

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

reacciones superficiales o cambiar la dirección de crecimiento del plano cristalino. Tomando como ejemplo el óxido de tungsteno amarillo, el cambio de su estructura cristalina bajo la radiación lumínica está directamente relacionado con sus propiedades ópticas y catalíticas.

Durante la preparación, la radiación óptica (por ejemplo, luz ultravioleta o visible) acelera la nucleación y el crecimiento del óxido de tungsteno. Por ejemplo, en la preparación hidrotérmica de nanoóxido de tungsteno, el ácido tungstico se utiliza como materia prima y la luz ultravioleta puede promover la polimerización de las unidades de óxido de tungsteno para formar nanopartículas monoclinicas. La excitación de electrones inducida por la luz mejora las reacciones redox en solución, exponiendo preferentemente ciertos planos cristalinos (por ejemplo, planos (002)), alterando así la morfología y simetría cristalina. Los estudios han demostrado que la radiación luminosa también puede regular el tamaño de los granos, formando pequeñas partículas después de la irradiación a corto plazo y promoviendo la agregación de granos en nanoflores o nanohojas por irradiación a largo plazo.

En el proceso de uso, el efecto de la radiación óptica sobre la estructura cristalina del óxido de tungsteno es más complejo. La luz ultravioleta a largo plazo puede introducir vacantes de oxígeno en la superficie del trióxido de tungsteno, y se pueden formar defectos debido a la reacción de los electrones fotogenerados con el oxígeno retular. Este cambio estructural distorsiona el patrón cristalino, reduce la banda prohibida de energía y expande el rango de absorción de luz a la región visible. Este efecto es particularmente importante en aplicaciones fotocatalíticas, como la descomposición de contaminantes orgánicos o la fotólisis del agua para producir hidrógeno, donde el aumento de las vacantes de oxígeno aumenta significativamente la actividad catalítica.

Además, la radiación óptica también puede inducir transiciones de fase, como la conversión de formas cristalinas monoclinicas en formas cristalinas ortorrómbicas bajo ciertas condiciones, y se mejora la simetría de la red. En la industria, la influencia de la radiación óptica se utiliza principalmente para optimizar las propiedades funcionales del óxido de tungsteno. Por ejemplo, en la producción de fotocatalizadores o dispositivos optoelectrónicos, el rendimiento de los productos de tungsteno se puede mejorar mediante la manipulación de la estructura cristalina mediante iluminación. La radiación óptica proporciona una forma única para la regulación dinámica de la estructura cristalina de óxido de tungsteno a través de la entrada de energía y la excitación de electrones.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.2.2.2 Efecto del campo eléctrico sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio

Como estímulo externo, la influencia del campo eléctrico en la estructura cristalina del óxido de tungsteno se refleja principalmente en la disposición de la red, la transformación de fase y el control de defectos en la preparación y aplicación. El campo eléctrico afecta las características estructurales del óxido de tungsteno al cambiar la tasa de migración de iones y la dirección de crecimiento del cristal, especialmente en la preparación electroquímica o de electrodeposición.

Durante el proceso de preparación, el campo eléctrico puede regular la forma cristalina y la morfología del óxido de tungsteno. Por ejemplo, en el método de deposición electroquímica, se utiliza paratungstato de amonio como materia prima, y la aplicación de un campo eléctrico de corriente continua puede inducir el crecimiento preferencial de trióxido de tungsteno a lo largo de la dirección del campo eléctrico, formando nanocables monoclinicos o películas delgadas. El campo eléctrico promueve la migración direccional de iones de tungsteno e iones de oxígeno, la disposición del octaedro  $WO_6$  es más densa y los parámetros de la red se ajustan ligeramente. Los estudios han demostrado que los campos eléctricos fuertes (por ejemplo, kilovoltios/metro) también pueden acelerar la nucleación y producir granos más pequeños de óxido de tungsteno, que es adecuado para la producción de productos químicos de tungsteno de alta precisión.

En la aplicación, la influencia dinámica del campo eléctrico en la estructura cristalina del óxido de tungsteno es particularmente prominente. Tomando dispositivos electrocrómicos como ejemplo, el trióxido de tungsteno puede realizar la transformación de una forma de cristal monoclinico a una estructura defectuosa bajo la acción del campo eléctrico. Cuando se aplica un voltaje, los iones (como  $Li^+$  o  $H^+$ ) se incrustan en la red cristalina, algunas células  $WO_6$  se distorsionan y las vacantes de oxígeno aumentan, lo que hace que el color cambie de amarillo a azul o gris. Este cambio estructural es reversible y refleja la capacidad de respuesta eléctrica del óxido de tungsteno. Además, los campos eléctricos fuertes pueden inducir transiciones de fase, como la transformación de monoclinico a cristalino ortorrómbico bajo campos eléctricos de alta temperatura, lo que mejora la simetría de la red y mejora la conductividad eléctrica. El campo eléctrico también afecta la distribución defectuosa del óxido de tungsteno. En las reacciones electroquímicas, la migración de iones impulsada por un campo eléctrico puede generar vacantes de oxígeno o de tungsteno en la superficie del cristal, alterando la estructura local. Este estado defectuoso del óxido de tungsteno funciona bien en los

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrodos o sensores de las baterías. El campo eléctrico proporciona un medio eficaz para el control fino de la estructura cristalina del óxido de tungsteno a través de la movilidad iónica y la tensión retular.

#### 4.2.2.3 Efecto del campo magnético sobre la estructura cristalina de óxido de wolframio

El campo magnético tiene un efecto relativamente pequeño en la estructura cristalina del óxido de tungsteno, pero sigue desempeñando un papel importante en procesos de preparación específicos, como la pulverización catódica del magnetrón o la deposición asistida por campo magnético. El campo magnético regula indirectamente el crecimiento de los cristales y las propiedades estructurales del óxido de tungsteno al influir en la trayectoria de los iones o partículas.

Durante el proceso de preparación, el campo magnético optimiza la disposición cristalina del óxido de tungsteno. Por ejemplo, en el método de pulverización catódica con magnetrón, se utiliza metal de tungsteno como material objetivo, y el campo magnético restringe el movimiento del plasma, lo que hace que los granos de película delgada de óxido de tungsteno depositados sean más densos e inclinados a formar formas cristalinas monoclinicas. La disposición del octaedro  $WO_6$  se ve afectada por la corriente iónica inducida por el campo magnético, y la direccionalidad de la red mejora y la cristalinidad aumenta. Los campos magnéticos fuertes (por ejemplo, varios Teslas) también pueden inhibir el crecimiento excesivo del grano y generar óxido de tungsteno a nanoescala, adecuado para dispositivos optoelectrónicos o sensores. El campo magnético tiene menos influencia dinámica en la estructura cristalina, pero puede inducir cambios microscópicos bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, en una reacción hidrotermal asistida por campo magnético, el campo magnético puede cambiar el entorno de coordinación de los iones de tungsteno en solución, afectar la dirección de nucleación del óxido de tungsteno y formar nanovarillas hexagonales o nanoláminas. Además, cuando el campo magnético se combina con el campo eléctrico, la distribución de la vacante de oxígeno del óxido de tungsteno se puede cambiar a través del efecto magnetoelectrónico, y el patrón de cristal puede distorsionarse para mejorar el rendimiento eléctrico.

En las aplicaciones, la influencia de los campos magnéticos se refleja principalmente en los materiales compuestos. Por ejemplo, al combinar óxido de tungsteno con un material magnético como los compuestos de molibdeno, el campo magnético puede modular la orientación del cristal de la estructura compuesta para mejorar el rendimiento catalítico o de almacenamiento de energía. Industrialmente, los procesos asistidos por campos magnéticos se utilizan a

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

menudo para preparar [productos de tungsteno] de alto rendimiento, como [los recubrimientos de cobre y tungsteno](#), pero su impacto directo en la estructura cristalina del óxido de tungsteno aún debe estudiarse más a fondo. El campo magnético proporciona un papel auxiliar para la optimización de la estructura cristalina del óxido de tungsteno a través del movimiento de partículas y la orientación microscópica, especialmente en la preparación de películas delgadas y nanomateriales.

#### 4.3 La relación intrínseca entre la estructura cristalina y las propiedades del óxido de tungsteno

Existe una profunda relación intrínseca entre la estructura cristalina del óxido de tungsteno y sus propiedades, que se refleja en la estructura electrónica, la óptica, la electricidad y la catálisis. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno y sus variantes (por ejemplo, [óxido de tungsteno azul], [óxido de tungsteno púrpura]), el cambio en la estructura cristalina determina directamente su aplicabilidad en el mercado del tungsteno y en los campos de alta tecnología.

Debido a su estructura asimétrica, el óxido de tungsteno monoclinico tiene propiedades ópticas y eléctricas estables, lo que es adecuado para vidrio inteligente y fotocatalizadores. La estructura hexagonal de canal abierto mejora el transporte de iones y es adecuada para baterías y sensores. Los defectos en la estructura cristalina, como las vacantes de oxígeno, modulan aún más las propiedades, como el aumento de la conductividad o el rango de absorción de luz. Este vínculo entre la estructura y el rendimiento es la raíz de la versatilidad del óxido de tungsteno.

##### 4.3.1 Enlace de estructura electrónica de óxido de tungsteno

La estructura electrónica del [óxido de tungsteno](#) es el puente entre la estructura cristalina y el rendimiento, lo que afecta directamente sus propiedades ópticas, eléctricas y catalíticas. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, su estructura electrónica está formada por la hibridación del orbital 5d del tungsteno y el orbital 2p del oxígeno, y la banda prohibida de energía suele ser de 2,5-2,8 eV.

En la forma cristalina monoclinica, la disposición asimétrica del octaedro  $WO_6$  da como resultado una distribución desigual de las nubes de electrones, con la parte superior de la banda de valencia dominada por orbitales  $O2p$  y la parte inferior de la banda de conducción compuesta por orbitales  $W5d$ . Esta estructura electrónica le da al óxido de tungsteno las propiedades de un semiconductor de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

banda prohibida ancha, que absorbe la luz ultravioleta y algo de luz visible, y aparece amarillo. La introducción de vacantes de oxígeno, como el óxido de tungsteno azul, genera niveles de energía defectuosos, que se encuentran por debajo de la banda de conducción, lo que resulta en un estrechamiento de la banda prohibida y la expansión de la absorción de luz en la región del infrarrojo cercano. Este cambio mejora la actividad fotocatalítica y es adecuado para la terapia fototérmica o la utilización de energía solar.

Eléctricamente, la estructura electrónica de la forma cristalina monoclinica le da una baja movilidad de portadores, pero la electrocromica se puede lograr cambiando la conductividad por intercalación de iones (por ejemplo,  $\text{Li}^+$ ) en un campo eléctrico. La estructura abierta de la forma de cristal hexagonal aumenta la tasa de difusión de iones debido al efecto canal, y el transporte de electrones es más eficiente, lo cual es adecuado para los electrodos de batería (ver Aplicaciones electroquímicas del polvo de tungsteno). Las vacantes de oxígeno introducen aún más portadores de electrones adicionales para mejorar la conductividad, lo que hace que el óxido de tungsteno en estado defectuoso funcione bien en el sensor.

En el campo de la catálisis, los cambios locales en la estructura electrónica (por ejemplo, W en el estado de vacantes de oxígeno) aumentan el sitio tensioactivo, mejorando la capacidad de adsorción y descomposición de las moléculas de gas o materia orgánica. Industrialmente, CTIA GROUP LTD El rendimiento del óxido de tungsteno en productos de tungsteno se optimiza mediante el uso del control de la estructura electrónica.

La estructura electrónica del óxido de tungsteno afecta profundamente sus propiedades funcionales a través del efecto sinérgico de la forma y los defectos del cristal, y es el núcleo de la relación entre la estructura cristalina y el rendimiento.

#### 4.3.1.1 Efecto de la estructura cristalina de óxido de tungsteno en el transporte de electrones

La estructura cristalina del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en su rendimiento de transporte de electrones, que se debe al efecto sinérgico de la disposición de la red, la distribución de defectos y la estructura electrónica. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), su estructura cristalina determina la tasa de migración y la conductividad de los portadores de electrones, lo cual es un factor clave en su aplicación en sensores, baterías y dispositivos electrocromicos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En el óxido de tungsteno monoclinico, el octaedro  $WO_6$  forma una red tridimensional asimétrica mediante conexiones coangulares. Esta estructura conduce a la distribución desigual de las nubes de electrones, la migración de electrones en la red cristalina se ve obstaculizada y la movilidad del portador es baja. Sin embargo, esta forma cristalina puede alterar las propiedades de transporte de electrones por intercalación de iones (por ejemplo,  $Li^+$  o  $H^+$ ) en respuesta a un campo eléctrico. Por ejemplo, en el vidrio inteligente, los iones se incrustan en la red cuando se aplica un voltaje, lo que da como resultado vacantes de oxígeno y tungsteno de baja valencia (por ejemplo,  $W^{5+}$ ), lo que mejora significativamente el transporte de electrones y cambia de color de amarillo a azul. Este control dinámico hace que la forma de cristal monoclinico sea excelente en aplicaciones eléctricas.

El óxido de tungsteno hexagonal tiene una mayor eficiencia de transporte de electrones debido a su estructura de canal abierto. El octaedro  $WO_6$  está dispuesto a lo largo del eje hexagonal para formar un canal unidimensional con menos resistencia a la migración de electrones a lo largo de la dirección del canal. Esta estructura es particularmente evidente en la morfología de nanovarilla o nanocable y es adecuada para aplicaciones altamente conductoras, como electrodos de batería o transistores de efecto de campo. Los estudios han demostrado que la tasa de transferencia de electrones de la forma hexagonal es varias veces mayor que la de la forma cristalina monoclinica, porque tiene menos defectos de red y menor dispersión de electrones.

Las vacantes de oxígeno son un factor importante que afecta el transporte de electrones de óxido de tungsteno. En [el óxido de tungsteno azul](#) o [el óxido de tungsteno violeta](#), la presencia de vacantes de oxígeno introduce portadores de electrones adicionales, que aumentan significativamente la conductividad. Aunque la estructura cristalina del óxido de tungsteno en este estado defectuoso está distorsionada, la ruta de transporte de electrones se optimiza debido a la formación de niveles de energía defectuosos y, a menudo, se usa en sensores de gas porque responde más rápido a las moléculas de gas.

La estructura cristalina del óxido de tungsteno determina directamente la eficiencia y la dirección de aplicación del transporte de electrones a través de la regulación de la forma y los defectos del cristal.

#### 4.3.1.2 Relación entre la estructura de la banda de óxido de wolframio y la estructura cristalina

La estructura de banda del óxido de tungsteno es el núcleo de su estructura electrónica, que está estrechamente relacionada con la estructura cristalina y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

afecta directamente sus propiedades ópticas y eléctricas. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, la posición de la banda prohibida, la banda de conducción y la banda de valencia está determinada por la simetría, la disposición atómica y los defectos de la red cristalina.

En el óxido de tungsteno monoclinico, la disposición asimétrica del octaedro  $WO_6$  da como resultado una distribución no uniforme de los niveles de electrones. La parte superior de la banda de valencia está compuesta principalmente por orbitales 2p de oxígeno, y la parte inferior de la banda de conducción es contribuida por el orbital 5d de tungsteno, y la banda prohibida de energía suele ser de 2,5-2,8 eV. Esta estructura de banda permite que el óxido de tungsteno absorba la luz ultravioleta y algo de luz visible. La baja simetría de la forma cristalina monoclinica hace que la eficiencia de transición entre la banda de conducción y la banda de valencia sea baja, y la separación de los portadores fotogenerados es limitada, pero aún tiene ventajas en el campo de la fotocatalisis debido a su alta estabilidad.

El óxido de tungsteno hexagonal tiene una estructura de banda ligeramente diferente debido a su alta simetría y estructura abierta. La disposición regular de las celdas  $WO_6$  reduce la dispersión de electrones, la banda prohibida de energía puede ser ligeramente más pequeña (2,4-2,7 eV) y la energía en la parte inferior de la banda de conducción se reduce. Este cambio hace que la forma de cristal hexagonal sea ligeramente más fuerte en la absorción de luz, especialmente en la forma nano, y el efecto cuántico ajusta aún más la posición de la banda de energía, que es adecuada para dispositivos optoelectrónicos o aplicaciones de fotohidrólisis. La estructura de bandas de la forma cristalina ortorrómbica está en el medio, y la simetría mejorada conduce a una migración de portadores más suave y una mayor actividad fotocatalítica.

El efecto de las vacantes de oxígeno en la estructura cristalina sobre la estructura de la banda es particularmente significativo. En el óxido de tungsteno azul o púrpura, las vacantes de oxígeno introducen niveles de energía defectuosos que se encuentran por debajo de la banda de conducción, lo que permite una mayor reducción en la banda prohibida de energía (hasta 2,0 eV). Estos estados defectuosos mejoran el rango de absorción de luz del óxido de tungsteno, extendiéndose a la región del infrarrojo cercano, que es adecuada para la terapia fototérmica o la utilización de energía solar. Al mismo tiempo, el nivel de energía del defecto actúa como una trampa de electrones para prolongar la vida útil de los portadores fotogenerados y mejorar la eficiencia catalítica. Industrialmente, CTIA GROUP LTD optimiza las propiedades ópticas del óxido de tungsteno en productos químicos de tungsteno mediante la

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

manipulación de la estructura de la banda a través de la estructura cristalina. La estrecha relación entre la estructura de la banda y la estructura cristalina del óxido de tungsteno es la base teórica de su versatilidad.

#### 4.3.2 Enlace de nivel de transporte de iones de óxido de tungsteno

La estructura cristalina del óxido de tungsteno está estrechamente relacionada con su capacidad de transporte de iones, y esta conexión determina su potencial para aplicaciones en baterías, dispositivos electrocrómicos y conductores iónicos. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, su rendimiento de transporte de iones se ve afectado por los canales reticulares, los defectos y la morfología, que es un aspecto importante de su funcionalización.

Debido a su estructura densa, el óxido de tungsteno monoclinico tiene un canal de transporte de iones estrecho y una baja tasa de difusión. Sin embargo, bajo la acción de un campo eléctrico, pequeños iones (por ejemplo,  $H^+$  o  $Li^+$ ) pueden incrustarse en la red cristalina y migrar lentamente a lo largo de los ocho canales brillantes  $WO_6$ . Esta capacidad de transporte de iones permite que las formas de cristal monoclinico funcionen bien en dispositivos electrocrómicos, como la incrustación de  $Li^+$  en vidrio inteligente. La presencia de vacantes de oxígeno mejora aún más el transporte de iones, proporcionando una ruta de difusión adicional debido a los defectos.

El óxido de tungsteno hexagonal tiene excelentes propiedades de transporte de iones debido a su estructura de canal hexagonal abierto. Los canales a nanoescala formados por la unidad  $WO_6$  permiten una rápida difusión de iones (por ejemplo,  $Li^+$  o  $Na^+$ ) con un coeficiente de difusión de hasta  $10^{-8}$   $cm^2/s$ , muy superior al de las formas cristalinas monoclinicas. Esta estructura lo convierte en un material ideal para electrodos de batería de litio con excelentes propiedades de ciclado. El óxido de tungsteno hexagonal en forma de nanovarillas o nanotubos mejora aún más la eficiencia del transporte de iones al aumentar el área de contacto debido a su alta área de superficie específica.

El óxido de tungsteno defectuoso, como el óxido de tungsteno azul, tiene rutas de transporte de iones más complejas debido a las vacantes de oxígeno y la distorsión de la red, pero la tasa de difusión aumenta por canales adicionales. Esta propiedad lo hace excelente en sensores electroquímicos. En la industria, el rendimiento del transporte de iones del polvo de tungsteno a menudo se optimiza mediante una estructura cristalina para mejorar el rendimiento de la batería. La capacidad de transporte de iones del óxido de tungsteno está directamente relacionada con los canales y defectos de su estructura

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

晶状体，这是其应用的关键，特别是在储能和能量检测领域。

#### 4.3.2.1 氧化钨晶体结构对离子扩散的影响

氧化钨晶体结构对其离子扩散的影响体现在晶粒尺寸、对称性和缺陷分布等方面。晶粒尺寸决定了迁移率和扩散路径。以三氧化钨为例，不同的晶型和晶粒尺寸会导致离子扩散性能的显著差异。

由于其三维致密晶格，单斜晶氧化钨具有狭窄的离子扩散通道和较低的扩散系数（约为  $10^{-10}$  cm<sup>2</sup>/s）。八面体 WO<sub>6</sub> 的配位空隙限制了离子迁移，只有较小的 H<sup>+</sup> 或 Li<sup>+</sup> 离子能够缓慢通过。这种结构在电致变色应用中仍然有效，因为离子扩散速度适中，足以改变电子结构和颜色。引入氧空位可以增加扩散速率，提供额外的扩散通道。

六方晶氧化钨具有显著的优势，其通道直径可达数百纳米，离子扩散系数高达  $10^{-8}$  cm<sup>2</sup>/s。这种开放结构在纳米线或纳米管中表现更佳，因为一维通道降低了扩散阻力。在电池应用中，六方晶氧化钨的高离子电导率显著提高了充放电效率。

正交晶氧化钨处于中间状态，通道较为宽松，扩散速率适中，适用于某些特定应用。纳米尺度的氧化钨（如纳米片）进一步优化了离子扩散效率，得益于其高比表面积和短扩散路径。晶体结构通过调节通道尺寸和缺陷分布，成为离子传输应用中的关键因素。

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.3.2.2 Efecto del proceso de intercalación/extracción de iones en la estabilidad estructural de los cristales de óxido de tungsteno

El proceso de intercalación y extracción de iones es el mecanismo central de la aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos electrocrómicos, baterías y conductores iónicos, y este proceso tiene un impacto significativo en la estabilidad de su estructura cristalina. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), la inserción y expulsión repetidas de iones (como  $H^+$ ,  $Li^+$  o  $Na^+$ ) cambiará los parámetros de la red, introducirá tensiones e incluso provocará daños estructurales, que están directamente relacionados con el rendimiento a largo plazo del material.

En el óxido de tungsteno monoclinico, el octaedro  $WO_6$  forma una densa red tridimensional mediante conexiones coangulares, y los canales de intercalación iónica son estrechos. Cuando pequeños iones (por ejemplo,  $Li^+$ ) están incrustados en la red impulsados por un campo eléctrico, ocupan los espacios entre las celdas  $WO_6$ , lo que hace que la red se expanda. Por ejemplo, durante los procesos electrocrómicos, la incrustación de  $Li^+$  cambia el óxido de tungsteno de amarillo a azul, aumentando los parámetros de red  $a$ ,  $b$  y  $c$  en aproximadamente  $0,1-0,3 \text{ \AA}$ , respectivamente. Esta expansión introduce tensiones locales, y si la cantidad de incrustación es moderada (por ejemplo,  $<0,5 \text{ mol/Li}^+$ ), la estructura cristalina permanece estable y los iones vuelven a su estado original después de ser eliminados. Sin embargo, si la cantidad de incrustación de iones es demasiado grande o el número de ciclos es demasiado grande, la tensión de la red se acumula, lo que puede provocar microgrietas o distorsión irreversible de la estructura cristalina, lo que reduce la estabilidad.

El óxido de tungsteno hexagonal tiene una mayor adaptabilidad a la intercalación de iones debido a su estructura de canal abierto. La disposición de las células  $WO_6$  a lo largo del eje hexagonal para formar canales a nanoescala permite una rápida inserción y expulsión de iones, con una pequeña expansión de la red (alrededor de  $0,05-0,1 \text{ \AA}$  de variación en el eje  $c$ ) y una distribución uniforme de la tensión. Esta estructura funciona bien en baterías de litio y es estable durante cientos de ciclos. Sin embargo, si el tamaño del ion es demasiado grande o la tasa de intercalación es demasiado rápida, el canal puede bloquearse, lo que lleva a un colapso estructural local y a la estabilidad a largo plazo.

La intercalación iónica también introduce vacantes de oxígeno, especialmente en el óxido de tungsteno azul o el óxido de tungsteno púrpura es más pronunciado. El proceso de incrustación se acompaña de la reducción de tungsteno ( $W^{6+} \rightarrow W^{5+}$ ),

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumenta la vacante de oxígeno y se distorsiona la estructura cristalina. Aunque esto mejora la conductividad, demasiadas vacantes pueden debilitar la fuerza de conexión de la célula  $WO_6$ , lo que hace que la estructura cristalina se desestabilice gradualmente durante ciclos repetidos. El proceso de intercalación/extracción de iones tiene un doble efecto en la estabilidad de la estructura cristalina de óxido de tungsteno a través de la tensión de la red y los cambios de defectos, que es una consideración clave en el diseño de su aplicación.

#### 4.3.3 Relación entre las propiedades superficiales del óxido de tungsteno

Las propiedades superficiales del óxido de tungsteno están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina, lo que afecta directamente su capacidad de adsorción, actividad catalítica y estado electrónico. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, el tipo de estructura cristalina, la exposición del plano cristalino y la distribución de defectos determinan el entorno de coordinación y el sitio activo de los átomos de la superficie, que son la base de su rendimiento en fotocátalisis, sensores y recubrimientos de superficies.

La superficie del óxido de tungsteno en forma de cristal monoclinico está compuesta por una conexión coangular de octaedro  $WO_6$ , y el plano cristalino expuesto tiene una alta energía superficial debido a la insaturación de la coordinación de los átomos de tungsteno y oxígeno. Esta propiedad superficial le confiere una gran capacidad de adsorción de moléculas de gas (por ejemplo,  $NO_2$ ) o materia orgánica, lo que lo hace adecuado para sensores de gas y fotocatalizadores. El óxido de tungsteno hexagonal tiene una mayor superficie específica y más sitios activos debido a su estructura de canal, que muestra una mayor eficiencia en las reacciones catalíticas.

Los defectos superficiales mejoran aún más las propiedades superficiales del óxido de tungsteno. En el óxido de tungsteno azul, los átomos de tungsteno expuestos por las vacantes de oxígeno se convierten en fuertes centros de adsorción y la capacidad de adsorción de las moléculas de agua mejora significativamente. Esta propiedad de la superficie lo hace excelente en los sensores de humedad. La actividad superficial del óxido de tungsteno a nanoescala mejora aún más debido a la alta área de superficie específica y el efecto de borde.

Las propiedades de la superficie del óxido de tungsteno también se ven afectadas por la topografía. El óxido de tungsteno a granel tiene una superficie plana y pocos sitios activos, mientras que el óxido de tungsteno en

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

forma de nanoflores o películas delgadas tiene mejores propiedades superficiales debido a su porosidad y alta rugosidad. Industrialmente, [CTIA GROUP LTD](#) Al ajustar la estructura cristalina, se optimizan las propiedades de la superficie y se mejora la competitividad del óxido de tungsteno en el mercado del tungsteno. Las propiedades superficiales del óxido de tungsteno están controladas por la estructura cristalina, que es su principal ventaja en aplicaciones relacionadas con la superficie.

#### 4.3.3.1 Efecto de la estructura cristalina de óxido de volframio en la adsorción superficial

La influencia de la estructura cristalina de óxido de tungsteno en su capacidad de adsorción superficial se refleja principalmente en el tipo de plano cristalino, la energía superficial y la distribución de defectos, lo que determina directamente su rendimiento de adsorción para gas, moléculas líquidas o iones. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno, las propiedades de la superficie de las diferentes formas y morfologías de cristales son significativamente diferentes.

La superficie del óxido de tungsteno monoclinico está compuesta por octaedro  $WO_6$ , y los planos de cristal expuestos comunes como (002) y (200) tienen una alta energía superficial, debido a la coordinación insaturada de los átomos de tungsteno y oxígeno en la superficie. Esta estructura tiene una fuerte capacidad de adsorción para moléculas polares (como  $H_2O$ ,  $NH_3$ ), y el calor de adsorción puede alcanzar decenas de  $kJ/mol$ . En los sensores de gas, el óxido de tungsteno monoclinico tiene una capacidad particularmente sobresaliente para adsorber  $NO_2$  porque los átomos de oxígeno en su superficie pueden formar enlaces químicos con  $NO_2$ . La presencia de vacantes de oxígeno mejora aún más la adsorción porque el sitio  $W^{5+}$  tiene una fuerte afinidad por las moléculas donantes de electrones (por ejemplo,  $H_2S$ ).

Debido a su estructura de canal, la superficie del óxido de tungsteno hexagonal es en su mayoría plana (001), con una fuerte apertura, y el área de superficie específica puede alcanzar los  $50-100 m^2/g$ . Este plano cristalino no solo tiene una fuerte capacidad física de adsorción, sino que también mejora la difusión molecular debido a los efectos del canal, lo que lo hace más eficiente en la adsorción de macromoléculas (como tintes orgánicos).

En el campo de la fotocatalisis, la adsorción de contaminantes por óxido de tungsteno hexagonal es el requisito previo para su descomposición eficiente. El óxido de tungsteno hexagonal en forma de nanovarillas o nanotubos ha aumentado aún más la capacidad de adsorción debido al aumento de los sitios de borde.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las características de la superficie del óxido de tungsteno ortorrómbico están en el medio, con una alta regularidad del plano cristalino y sitios de adsorción moderados, que son adecuados para reacciones catalíticas específicas. El óxido de tungsteno a nanoescala (por ejemplo, nanoláminas) tiene una capacidad de adsorción significativamente mejor que los materiales a granel debido a su alta área de superficie específica y planos de cristal de borde expuestos. Industrialmente, polvo de tungsteno El rendimiento de adsorción de la superficie a menudo se optimiza mediante la estructura cristalina para mejorar la eficiencia de los soportes del catalizador. La estructura cristalina del óxido de tungsteno regula la adsorción superficial a través de planos y defectos cristalinos, lo cual es un factor clave en sus aplicaciones relacionadas con la adsorción.

#### 4.3.3.2 Relación entre la estructura cristalina del óxido de wolframio y el estado electrónico de la superficie

La relación entre la estructura de los cristales de óxido de tungsteno y su estado electrónico superficial es el núcleo de sus propiedades funcionales superficiales, lo que afecta su actividad catalítica, propiedades fotoeléctricas y capacidad de reacción química a través de la exposición al plano de cristal, la distribución de defectos y la distribución de nubes de electrones. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno, el cambio de estado electrónico de la superficie determina directamente su rendimiento en los campos de la fotocatalisis, los sensores y la electroquímica.

En el óxido de tungsteno monoclinico, la superficie está compuesta de  $WO_6$  octaédrico, y los átomos de tungsteno y oxígeno del plano cristalino expuesto (como (002) o (020)) no están saturados y hay enlaces suspendidos. El orbital 2p del oxígeno y el orbital 5d del tungsteno forman un estado electrónico localizado en la superficie, y el nivel de energía de la superficie es ligeramente más bajo que el de la fase a granel, y la banda prohibida puede reducirse en 0,1-0,2 eV. Este estado electrónico hace que la superficie sea susceptible a la transferencia de electrones con moléculas externas. Por ejemplo, en la fotocatalisis, los electrones de la superficie son excitados por la luz a la banda de conducción, dejando huecos para generar especies reactivas de oxígeno (p. ej.,  $\cdot OH$ ), que descompone los contaminantes orgánicos. La presencia de vacantes de oxígeno cambia significativamente el estado electrónico de la superficie, y la presencia del sitio  $W^{5+}$  introduce un nivel de energía defectuoso, que se encuentra por debajo de la banda de conducción, lo que mejora la capacidad de donación-recepción de electrones y hace que el óxido de tungsteno sea más sensible a los gases reductores como el CO.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La superficie del óxido de tungsteno hexagonal es en su mayoría plana (001), porque la estructura del canal expone más átomos de tungsteno y el estado electrónico de la superficie es más activo. El nivel de energía del defecto se distribuye más ampliamente y la tasa de transferencia de electrones se acelera, lo que hace que exhiba una mayor respuesta de fotocorriente en los dispositivos optoelectrónicos. Debido al efecto cuántico, el estado electrónico de la superficie del óxido de tungsteno a nanoescala (como nanocables o nanoláminas) se localiza aún más y la densidad de electrones aumenta, lo que mejora la reactividad de la superficie. Por ejemplo, en la producción de hidrógeno a partir de la fotólisis del agua, el estado electrónico de superficie del óxido de tungsteno hexagonal optimiza la eficiencia de separación electrón-hueco. Por el contrario, el óxido de tungsteno ortorrómbico tiene un estado electrónico de superficie más uniforme, alta simetría del plano cristalino y una distribución de electrones estable, lo que es adecuado para aplicaciones que requieren defectos bajos, como algunos recubrimientos fotoeléctricos.

El estado electrónico de la superficie también se ve afectado por la topografía. El estado electrónico de la superficie del óxido de tungsteno a granel es más uniforme y la actividad es menor, mientras que el estado electrónico de la superficie del óxido de tungsteno en forma de nanoflores o películas delgadas es más rico y reactivo debido a la alta área de superficie específica y el efecto de borde. Por ejemplo, en los sensores de gas, la manipulación del estado electrónico de la superficie afecta directamente a la sensibilidad y selectividad de la detección.

La estructura cristalina del óxido de tungsteno regula el estado electrónico de la superficie a través de la exposición del plano cristalino y la distribución de defectos, que es la base teórica y la clave de aplicación de la funcionalización de superficies. Esta relación no solo revela la versatilidad del óxido de tungsteno, sino que también proporciona una dirección para su desarrollo posterior en el campo de la alta tecnología. Por ejemplo, en el mercado del tungsteno, el óxido de tungsteno con estado electrónico de superficie optimizado se está convirtiendo gradualmente en un punto caliente de investigación para materiales de alto valor agregado.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

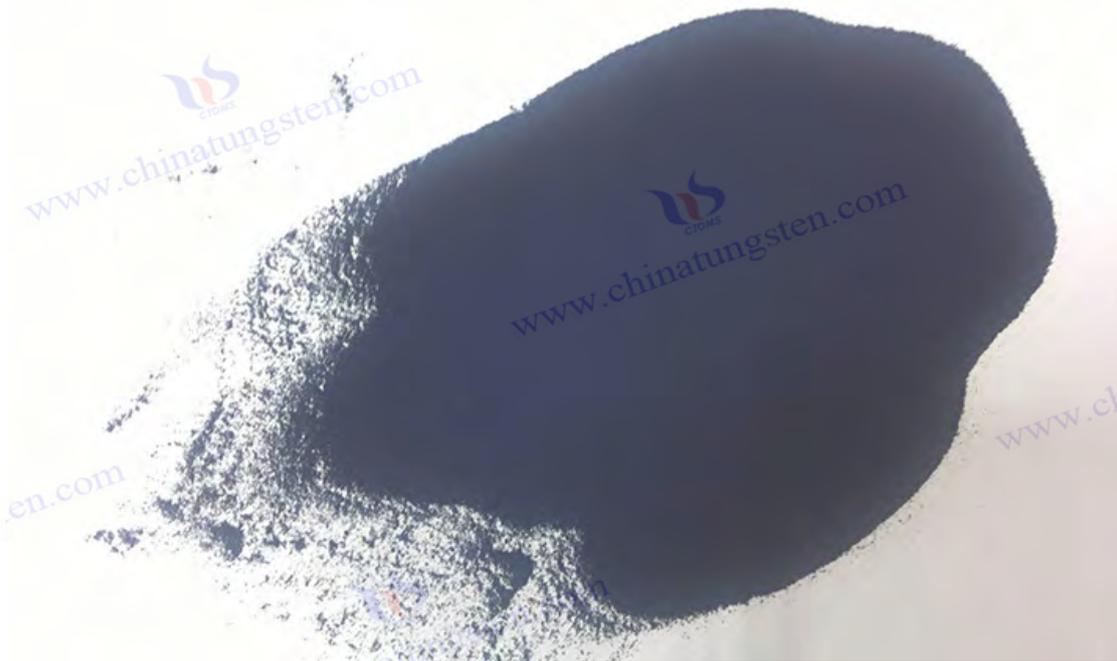
Email: [sales@chinatungsten.com](mailto:sales@chinatungsten.com)

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GRUPO LTD W02.72

## Capítulo 5 Propiedades físicas y químicas del óxido de tungsteno

### 5.1 Apariencia y color del óxido de tungsteno

La apariencia y el color del óxido de tungsteno es una de sus propiedades físicas más intuitivas, que refleja directamente su composición química, estructura cristalina y contenido de oxígeno. El trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), por ejemplo, se conoce comúnmente como óxido de tungsteno amarillo en su forma común como polvo amarillo, debido a su color amarillo vivo con luz natural. Este color se debe a su capacidad para absorber la luz ultravioleta y la luz parcialmente visible debido a su capacidad para absorber la luz ultravioleta y la luz parcialmente visible, lo que lo hace valioso en aplicaciones ópticas. Sin embargo, el óxido de tungsteno no es de color monolítico, y los cambios en el contenido de oxígeno hacen que su apariencia cambie de amarillo a azul, morado e incluso marrón, mostrando una rica diversidad.

El óxido de tungsteno amarillo es la forma más estable, generalmente obtenida por calcinación de paratungstato de amonio (APT) en el aire, y su estructura cristalina es en su mayoría un sistema cristalino monoclinico, con tamaños de partícula que van desde nanómetros hasta micras, y apariencia delicada y uniforme. Cuando el contenido de oxígeno se reduce ligeramente, por ejemplo, preparado bajo una atmósfera reductora de hidrógeno, se forma óxido de tungsteno azul ( $WO_2$ ) (), cuyo color es causado por cambios en la estructura electrónica causados por vacantes de oxígeno, aparece como un polvo azul oscuro o azul-negro. Esta forma

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se utiliza a menudo como intermediario en la producción de polvo de tungsteno en la industria debido a su fuerte reducibilidad. Al reducir aún más el contenido de oxígeno, se obtiene óxido de tungsteno púrpura ( $WO_2$ ), de apariencia púrpura o negro púrpura, partículas más finas y, a menudo, se usa en el estudio de catalizadores altamente activos.

La apariencia del óxido de tungsteno también está estrechamente relacionada con su topografía. El óxido de tungsteno a granel suele ser un sólido amarillo opaco con una superficie lisa, mientras que el óxido de tungsteno a nanoescala (como las nanopartículas o los nanocables) puede parecer más claro o incluso blanco debido a la dispersión de la luz, especialmente en condiciones de alta pureza. Por ejemplo, una película delgada preparada por pulverización catódica puede aparecer de color amarillo pálido o incoloro en un sustrato transparente, pero se volverá azul o gris durante los procesos electrocromáticos. Además, el dióxido de tungsteno, como forma de oxidación baja del óxido de tungsteno, tiene una apariencia de polvo marrón o marrón oscuro, y su estructura cristalina es un sistema cristalino monoclinico, que tiene una apariencia más gruesa.

En aplicaciones prácticas, la apariencia y el color del óxido de tungsteno no solo son su marca de identificación, sino que también están estrechamente relacionados con su función. Por ejemplo, el óxido de tungsteno amarillo se usa ampliamente en vidrio inteligente y fotocatalizadores debido a su estabilidad y propiedades ópticas; El óxido de tungsteno azul y púrpura se usa comúnmente en electroquímica y catálisis debido a su alta actividad.

## 5.2 Densidad/gravedad específica del óxido de wolframio

La densidad o gravedad específica del óxido de tungsteno es su importante propiedad física, que refleja su masa molecular y la compacidad de su estructura cristalina. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su densidad teórica es de unos  $7,16 \text{ g/cm}^3$ , lo que es típico de la familia del óxido de tungsteno porque es un compuesto estable con un alto estado de oxidación del tungsteno. La densidad no solo está relacionada con la composición química, sino que también se ve afectada por la forma del cristal, el tamaño de partícula y la morfología, que es un parámetro importante para medir el rendimiento de los materiales de óxido de tungsteno.

La densidad del trióxido de tungsteno es más común en la forma de cristal monoclinico debido a su densa disposición de octaedro  $WO_6$  y pequeños vacíos de red. La densidad real del óxido de tungsteno amarillo preparado por calcinación de paratungstato de amonio puede ser ligeramente inferior al valor teórico (alrededor de  $7,0-7,1 \text{ g/cm}^3$ ) debido a la presencia de microporos o defectos

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficiales entre las partículas. Óxido de tungsteno azul y óxido de tungsteno púrpura con una ligera disminución de la densidad de 6,8-7,0 g/cm<sup>3</sup> y 6,5-6,8 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente, debido a un ligero aflojamiento de la red debido al aumento de las vacantes de oxígeno. La densidad del dióxido de tungsteno (WO<sub>2</sub>) es aún menor, alrededor de 6,3 g/cm<sup>3</sup>, porque la estructura cristalina cambia de octaedro WO<sub>6</sub> a unidad WO<sub>4</sub> debido a la reducción de la relación tungsteno-oxígeno.

La densidad del óxido de tungsteno también se ve afectada por la topografía y el tamaño de las partículas. La densidad del óxido de tungsteno a granel está cerca del valor teórico, debido a sus pequeños poros internos y su estructura compacta. Sin embargo, la densidad aparente del óxido de tungsteno a nanoescala (por ejemplo, nanopartículas o nanovarillas) se reduce significativamente, posiblemente solo 4-5 g/cm<sup>3</sup>, debido a la gran cantidad de vacíos entre las nanopartículas y la baja densidad aparente. Esta diferencia es particularmente importante en aplicaciones prácticas, como en la producción de polvo de tungsteno, donde el óxido de tungsteno de alta densidad es más susceptible a la sedimentación y el procesamiento, mientras que el nanoóxido de tungsteno de baja densidad es adecuado para catalizadores o recubrimientos debido a su alta área superficial específica.

En aplicaciones industriales, la densidad del óxido de tungsteno afecta directamente su rendimiento de procesamiento y uso. El óxido de tungsteno de alta densidad es adecuado para la preparación de metal de tungsteno o alambre de tungsteno, porque la pérdida de masa en el proceso de reducción es controlable. El nanoóxido de tungsteno de baja densidad se utiliza en materiales compuestos como el plástico de tungsteno o el caucho de tungsteno debido a sus propiedades ligeras. CTIA GROUP LTD ajusta la densidad del óxido de tungsteno optimizando la estructura cristalina y la morfología de las partículas para satisfacer las necesidades de diferentes productos de tungsteno. La densidad del óxido de tungsteno no es solo un reflejo de sus propiedades físicas, sino también un parámetro clave en el diseño de su aplicación.

### 5.3 Estabilidad térmica del óxido de tungsteno

La estabilidad térmica del óxido de tungsteno es una característica importante del óxido de tungsteno en entornos de alta temperatura, lo que determina directamente su aplicabilidad en materiales refractarios, dispositivos optoelectrónicos y catálisis a alta temperatura. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), tiene una alta estabilidad térmica y puede mantener la integridad de la estructura cristalina a altas temperaturas, pero su rendimiento específico está estrechamente relacionado con su composición química, forma cristalina y condiciones de preparación. Lo siguiente se discute en detalle desde

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tres aspectos: punto de fusión, temperatura de descomposición y coeficiente de expansión térmica.

La estabilidad térmica del trióxido de tungsteno a presión atmosférica es la siguiente: por debajo de aproximadamente 1000 ° C, su estructura cristalina (generalmente en forma cristalina monoclinica) permanece estable y no se produce una descomposición significativa o transformación de fase. Cuando la temperatura sube a 1000-1200 ° C, puede ocurrir una transformación cristalina, como de monoclinica a cristalina ortogonal o hexagonal, pero aún así no se descompone. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen una estabilidad térmica ligeramente menor porque tienen más vacantes de oxígeno, que son fáciles de perder oxígeno a altas temperaturas y convertirse en dióxido de tungsteno o metal de tungsteno. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) es más estable térmicamente porque su estructura de baja oxidación es más difícil de descomponer en un entorno reductor.

La estabilidad térmica del óxido de tungsteno también se ve afectada por la atmósfera. En atmósferas oxidantes (por ejemplo, aire), el trióxido de tungsteno puede ser estable hasta cerca de su punto de fusión, mientras que en atmósferas reductoras (por ejemplo, hidrógeno), las vacantes de oxígeno aumentan y la estabilidad térmica disminuye, y puede comenzar a descomponerse en metal de tungsteno a temperaturas más bajas (por ejemplo, 700-800 ° C). Esta propiedad es ampliamente utilizada en la producción de polvo de tungsteno, donde la reducción del óxido de tungsteno se logra mediante el control de la atmósfera y la temperatura. La estabilidad térmica del óxido de tungsteno a nanoescala es ligeramente inferior a la de los materiales a granel, ya que su alta superficie específica y su energía superficial lo hacen más susceptible a la coalescencia del grano o a los cambios estructurales a altas temperaturas.

En aplicaciones prácticas, la estabilidad térmica del óxido de tungsteno lo convierte en un material ideal para entornos de alta temperatura. Por ejemplo, en la fabricación de alambre de tungsteno o calentador de tungsteno, su estabilidad a alta temperatura garantiza la confiabilidad del proceso de mecanizado; En el campo de la fotocatalisis, su estabilidad estructural garantiza un rendimiento a largo plazo.

### 5.3.1 Punto de fusión del óxido de tungsteno

El punto de fusión del óxido de tungsteno es un indicador importante de su estabilidad térmica, lo que refleja su capacidad de retención estructural a temperaturas extremadamente altas. En el caso del trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), por ejemplo, su punto de fusión suele determinarse en 1473 ° C (unos 1700 K), un

valor que le da una ventaja significativa en materiales de alta temperatura. El punto de fusión está estrechamente relacionado con la fuerza del enlace químico y la estructura cristalina del óxido de tungsteno, porque el enlace tungsteno-oxígeno (W-O) tiene altas propiedades covalentes e iónicas, y la energía del enlace es más fuerte.

El punto de fusión del trióxido de tungsteno es más típico en la forma de cristal monoclinico, y su estructura de red tridimensional octaédrica  $WO_6$  requiere una energía extremadamente alta para destruirse. El punto de fusión del óxido de tungsteno amarillo, que es calcinado por paratungstato de amonio, puede fluctuar ligeramente debido a trazas de impurezas o tamaño de partícula, pero generalmente está entre 1470-1480 ° C. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen un punto de fusión ligeramente más bajo de 1450-1470 ° C y 1430-1460 ° C, respectivamente, debido a la presencia de vacantes de oxígeno que debilitan la estabilidad general de la red cristalina. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene un punto de fusión más alto de aproximadamente 1700 ° C y es más difícil de fundir a altas temperaturas debido a su estructura de estado de oxidación baja, pero se convierte fácilmente en trióxido de tungsteno en una atmósfera oxidante.

El punto de fusión del óxido de tungsteno también se ve afectado por la topografía. El punto de fusión del óxido de tungsteno a granel está cerca del valor teórico debido a su estructura densa y conducción de calor uniforme. El punto de fusión del óxido de tungsteno a nanoescala puede reducirse entre 50 y 100 ° C porque la alta superficie y la superficie facilitan que los granos se fusionen o fundan a altas temperaturas. Esta diferencia debe prestarse especial atención en aplicaciones prácticas, como el óxido de tungsteno con un alto punto de fusión en la producción de metal de tungsteno, que es más adecuado para procesos de reducción a alta temperatura.

En aplicaciones industriales, el alto punto de fusión del óxido de tungsteno lo hace ideal para materiales refractarios como calentadores de tungsteno o materiales de revestimiento de hornos de alta temperatura. CTIA GROUP LTD mejora aún más el rendimiento del punto de fusión del óxido de tungsteno al controlar la estructura cristalina y la pureza para satisfacer las demandas de entornos hostiles de alta temperatura. El punto de fusión del óxido de tungsteno es un reflejo directo de su estabilidad térmica y la base de sus aplicaciones a alta temperatura.

### 5.3.2 Temperatura de descomposición del óxido de tungsteno

La temperatura de descomposición del óxido de tungsteno se refiere a la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura a la que comienza a perder átomos de oxígeno o a sufrir cambios químicos en condiciones específicas, lo que está estrechamente relacionado con la estabilidad térmica. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su temperatura de descomposición es extremadamente alta en una atmósfera oxidante atmosférica, generalmente superando su punto de fusión ( $1473\text{ }^\circ\text{C}$ ), porque su estructura es estable y no es fácil de descomponer directamente. Sin embargo, en una atmósfera reductora, la temperatura de descomposición disminuye significativamente y se convierte en un parámetro clave para la producción de polvo de tungsteno.

En el aire, la temperatura de descomposición del trióxido de tungsteno es difícil de definir definitivamente, ya que conserva su composición  $WO_3$  después de fundirse y puede volatilizar lentamente una pequeña cantidad de oxígeno hasta aproximadamente  $1500\text{--}1600\text{ }^\circ\text{C}$ . En una atmósfera reductora como el hidrógeno, el trióxido de tungsteno comienza a descomponerse a  $700\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$  para formar óxido de tungsteno azul ( $WO_{2.9}$ ) u óxido de tungsteno púrpura y finalmente se convierte en tungsteno a  $1000\text{--}1200\text{ }^\circ\text{C}$ . Este proceso de descomposición está estrechamente relacionado con la formación de vacantes de oxígeno, y cuanto mayor es la temperatura, más profundo es el grado de reducción. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura se descomponen a una temperatura más baja y se pierde más oxígeno en el rango de  $800\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$  para formar dióxido de tungsteno o tungsteno. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene una temperatura de descomposición más alta y es estable hasta aproximadamente  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  en una atmósfera inerte, pero se oxida rápidamente a trióxido de tungsteno en una atmósfera oxidante.

La temperatura de descomposición del óxido de tungsteno también se ve afectada por el tamaño de partícula. Debido a la alta área superficial y la actividad de la superficie, la temperatura de descomposición del óxido de tungsteno a nanoescala puede reducirse en  $50\text{--}100\text{ }^\circ\text{C}$ , y la reducción comenzará a  $600\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ . El óxido de tungsteno a granel tiene una estructura densa, una temperatura de descomposición más alta y una estabilidad más fuerte. Esta propiedad se aprovecha plenamente en la reducción industrial del metal de tungsteno, por ejemplo, para la descomposición paso a paso mediante un control preciso de la temperatura. En aplicaciones prácticas, la temperatura de descomposición del óxido de tungsteno determina su comportamiento en el proceso de reducción a alta temperatura. La temperatura de descomposición del óxido de tungsteno es la intersección de su estabilidad térmica y reactividad química.

### 5.3.3 Coeficiente de dilatación térmica del óxido de wolframio

El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno es el grado de su

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

expansión volumétrica o lineal bajo cambios de temperatura, lo que refleja la capacidad de la estructura cristalina para responder al estrés térmico. Tomando el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ) como ejemplo, su coeficiente de expansión térmica es de aproximadamente  $6-8 \times 10^{-6} K^{-1}$  en el rango de temperatura ambiente a  $1000^\circ C$ , que es relativamente bajo, lo que indica que tiene una buena estabilidad dimensional a alta temperatura, que es una base importante para su aplicación en dispositivos de alta temperatura.

El coeficiente de expansión térmica del trióxido de tungsteno es típico en la forma de cristal monoclinico, porque la disposición apretada del octaedro  $WO_6$  limita la expansión térmica de la red cristalina. Hay una ligera diferencia en el coeficiente de expansión a lo largo de los tres ejes A, B y C, por ejemplo, puede ser ligeramente mayor a lo largo del eje C (alrededor de  $8 \times 10^{-6} K^{-1}$ ), debido a la asimetría de la red, la tensión térmica se distribuye de manera desigual. El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno amarillo preparado por descomposición de ácido tungstico puede variar ligeramente según el tamaño de partícula y las impurezas, pero generalmente permanece entre  $6-9 \times 10^{-6} K^{-1}$ . El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen un coeficiente de expansión térmica ligeramente más alto (alrededor de  $8-10 \times 10^{-6} K^{-1}$ ), y la red se relaja debido a las vacantes de oxígeno, y la expansión térmica es más obvia. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene un coeficiente de expansión térmica de aproximadamente  $5-7 \times 10^{-6} K^{-1}$  y es ligeramente menos expansivo debido a su estructura más simple.

El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno también se ve afectado por la morfología y las condiciones de preparación. El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno a granel está cerca del valor teórico debido a su tensión interna uniforme. Sin embargo, el óxido de tungsteno a nanoescala (como las películas nanodelgadas) puede aumentar el coeficiente de expansión térmica en un 10-20% debido al aumento de los efectos de la superficie y los límites de grano, y es más fácil deformarse a altas temperaturas. Esta propiedad se considera particularmente en aplicaciones de película delgada, como en vidrio inteligente, donde se evita el agrietamiento inducido por el estrés térmico.

En aplicaciones industriales, el bajo coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno lo hace adecuado para componentes delicados en entornos de alta temperatura, como compuestos de tungsteno-cobre o dispositivos optoelectrónicos. CTIA GROUP LTD mejora el rendimiento del óxido de tungsteno en productos de tungsteno a alta temperatura optimizando la estructura cristalina y reduciendo el coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno. El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno es una realización importante de su estabilidad térmica y propiedades mecánicas.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 5.4 Solubilidad del óxido de tungsteno

La solubilidad del óxido de tungsteno es un aspecto importante de sus propiedades químicas, que afecta directamente su comportamiento en hidrometalurgia, reacciones químicas y preparación de soluciones. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), es casi insoluble en agua y tiene una solubilidad muy baja (alrededor de 0,02 g/100 mL, 25 ° C), que es un compuesto poco soluble. Esta propiedad se deriva de su fuerte enlace híbrido covalente-iónico (enlace W-O) y su estructura cristalina estable, lo que dificulta la disociación por moléculas de agua en condiciones convencionales.

En soluciones ácidas, la solubilidad del óxido de tungsteno varía ligeramente, pero sigue siendo limitada. Por ejemplo, en el ácido clorhídrico diluido o el ácido sulfúrico, la solubilidad del trióxido de tungsteno aumenta solo ligeramente, ya que se pueden formar trazas de ácido tungstico en la superficie, pero el conjunto permanece insoluble. Sin embargo, en los ácidos fuertes (por ejemplo, ácido nítrico concentrado), el óxido de tungsteno reacciona lentamente, especialmente en condiciones de calentamiento, para formar ácido tungstico soluble o tungstato. Esta reacción es ampliamente utilizada en la refinación húmeda de wolframita o scheelita para convertir el óxido de tungsteno en una solución intermedia por lixiviación ácida, que luego se procesa en metal de tungsteno. Por el contrario, el dióxido de tungsteno (WO<sub>2</sub>) es ligeramente más soluble y más reactivo en ácidos fuertes debido a su estructura de bajo estado de oxidación.

La solubilidad del óxido de tungsteno en soluciones alcalinas mejora significativamente, especialmente en bases fuertes como NaOH o KOH. El trióxido de tungsteno puede reaccionar con el hidróxido de sodio para formar tungstato de sodio (Na<sub>2</sub>WO<sub>4</sub>), y la solubilidad puede alcanzar decenas de gramos por 100 mL. Por ejemplo, en una solución alcalina concentrada a 80 ° C, el trióxido de tungsteno se disuelve rápidamente con las siguientes reacciones:  $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$ . Esta propiedad es la base para la producción industrial de tungstato, por ejemplo, en la preparación de compuestos de tungsteno a partir de paratungstato de amonio, que a menudo se logra alcalinizando óxido de tungsteno. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen una solubilidad similar en los álcalis, pero la velocidad de reacción es ligeramente más rápida debido a que hay más vacantes de oxígeno.

La solubilidad del óxido de tungsteno también se ve afectada por la topografía y el tamaño de las partículas. Debido a la alta área superficial específica del óxido de tungsteno a nanoescala (como las nanopartículas), la velocidad de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

disolución en la solución ácido-base es mayor que la de los materiales a granel, pero todavía se encuentra en el rango insoluble. En disolventes orgánicos como el etanol o la acetona, el óxido de tungsteno es casi completamente insoluble porque carece de un sitio activo para reaccionar con las moléculas orgánicas. La solubilidad del óxido de tungsteno refleja su estabilidad química y selectividad de reacción, que es una característica importante de su aplicación en los campos químicos y metalúrgicos.

## 5.5 Dureza y resistencia mecánica del óxido de tungsteno

La dureza y la resistencia mecánica del óxido de tungsteno son manifestaciones importantes de sus propiedades físicas, que determinan su idoneidad en materiales, recubrimientos y componentes estructurales resistentes al desgaste. El trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, tiene una alta dureza y resistencia mecánica, pero los valores específicos varían según la forma del cristal, la morfología y las condiciones de preparación.

La dureza del trióxido de tungsteno se debe a su estructura cristalina octaédrica  $WO_6$ , y las fuertes propiedades covalentes e iónicas del enlace tungsteno-oxígeno le confieren una alta resistencia a la deformación. En la forma cristalina monoclinica, el óxido de tungsteno tiene una disposición de celosía densa y mejores propiedades mecánicas que los compuestos no enteros como el óxido de tungsteno azul o el óxido de tungsteno púrpura. La dureza y la resistencia del óxido de tungsteno a granel son similares a las de los materiales cerámicos, mientras que las propiedades mecánicas del óxido de tungsteno a nanoescala cambian debido al aumento de los límites de grano y el efecto de las partículas. La dureza del óxido de tungsteno lo convierte en una fase de refuerzo en los compuestos de cobre y tungsteno, lo que mejora la resistencia general al desgaste.

En términos de resistencia mecánica, el óxido de tungsteno exhibe una buena resistencia a la compresión, pero una débil resistencia al cizallamiento y a la tracción. Esta propiedad está relacionada con la anisotropía de su estructura cristalina, como la disposición en capas de la forma cristalina monoclinica, lo que la hace más susceptible a la fractura en ciertas direcciones. Industrialmente, el óxido de tungsteno a menudo se calcina en polvo mediante paratungstato de amonio y luego se presiona en moldeo, y su resistencia mecánica se ve afectada por la densidad de prensado y las condiciones de sinterización. El bloque de óxido de tungsteno sinterizado a alta temperatura es más fuerte, mientras que el polvo suelto de óxido de nanotungsteno es más frágil.

La dureza y la resistencia mecánica del óxido de tungsteno también se ven afectadas por defectos. Debido a la distorsión de la red, la dureza y la

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia del óxido de tungsteno púrpura con más vacantes de oxígeno son ligeramente inferiores a las del trióxido de tungsteno, pero aún así es suficiente para satisfacer las necesidades de soporte del catalizador. En aplicaciones prácticas, las propiedades mecánicas del óxido de tungsteno a menudo se fortalecen mediante compuestos, como la combinación con plástico de tungsteno o caucho de tungsteno, para mejorar la tenacidad y la resistencia. CTIA GROUP LTD mejora las propiedades mecánicas del óxido de tungsteno en productos de tungsteno optimizando la estructura cristalina y la morfología de las partículas. La dureza y la resistencia mecánica del óxido de tungsteno son indicadores clave de su aplicación duradera, lo que refleja la combinación de su estructura cristalina y practicidad.

### 5.5.1 Dureza de Mohs del óxido de tungsteno

La dureza Mohs del óxido de tungsteno es un parámetro importante para medir su resistencia al rayado, lo que refleja su resistencia superficial a la erosión externa. En el caso del trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), la dureza de Mohs suele estar entre 4,5 y 5,5, ligeramente inferior a la de los materiales cerámicos comunes (por ejemplo, alúmina, dureza 9) pero superior a la de muchos óxidos metálicos. Este nivel de dureza lo hace valioso en recubrimientos resistentes al desgaste y componentes mecánicos.

La dureza de Mohs del trióxido de tungsteno se debe principalmente a su estructura cristalina octaédrica  $WO_6$ , y la fuerte covalentidad del enlace tungsteno-oxígeno proporciona una alta resistencia al rayado. En la forma monoclinica, el óxido de tungsteno tiene una dureza de aproximadamente 5 debido a su densa disposición de red y su fuerte adhesión interatómica en la superficie. La dureza del nanoóxido de tungsteno preparado por el método hidrotermal de metatungstato de amonio puede ser ligeramente menor (alrededor de 4,5), debido al efecto límite del grano y los defectos de la superficie de las nanopartículas, que debilitan la resistencia general. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene una dureza ligeramente superior, alrededor de 5,5-6, debido a su bajo estado de oxidación y a su estructura más compacta.

La dureza de Mohs del óxido de tungsteno también se ve afectada por la topografía y el tamaño de las partículas. La dureza del óxido de tungsteno a granel es cercana a 5.5 debido a su integridad estructural y pocos defectos superficiales. La dureza del óxido de tungsteno a nanoescala (por ejemplo, nanopelículas o nanopartículas) puede caer a 4-4,5, lo que hace que la superficie sea más susceptible a los arañazos debido a la alta superficie específica y al aumento de los límites de grano. Además, el óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura, que tienen más vacantes de oxígeno, tienen una dureza

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ligeramente menor (alrededor de 4-5) y la fuerza de enlace interatómica se reduce por la distorsión de la red.

En aplicaciones prácticas, la dureza Mohs del óxido de tungsteno lo hace adecuado como fase de refuerzo para recubrimientos o compuestos resistentes al desgaste. Por ejemplo, la adición de óxido de tungsteno al ferrotungsteno o al tungsteno dorado puede mejorar la dureza de la superficie y la resistencia al desgaste. La dureza Mohs del óxido de tungsteno es la base de sus propiedades mecánicas, que afectan directamente su durabilidad.

### 5.5.2 Resistencia a la compresión del óxido de wolframio

La resistencia a la compresión del óxido de tungsteno es el índice central de su resistencia mecánica, lo que refleja su resistencia a la deformación y al aplastamiento bajo presión. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su resistencia a la compresión suele estar entre 500 y 800 MPa, lo que lo hace de rendimiento moderadamente alto entre los materiales cerámicos y adecuado para entornos de alta presión.

La resistencia a la compresión del trióxido de tungsteno está estrechamente relacionada con su estructura cristalina monoclinica, y la red tridimensional del octaedro  $WO_6$  proporciona una alta resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión del óxido de tungsteno a granel preparado por calcinación de ácido tungstico puede alcanzar los 700-800 MPa, debido a su estrecha unión entre granos y pocos defectos internos. La resistencia a la compresión del óxido de tungsteno a nanoescala se reduce significativamente (alrededor de 300-500 MPa), y los vacíos intergranulares y los efectos del límite de grano lo hacen más propenso a fracturarse bajo presión. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene una resistencia a la compresión ligeramente superior, alrededor de 800-900 MPa, debido a su estructura más simple y a una mayor estabilidad de la red.

La resistencia a la compresión del óxido de tungsteno también se ve afectada por el proceso de preparación. Debido a la alta densidad, la resistencia a la compresión del bloque de óxido de tungsteno sinterizado a alta temperatura está cerca del límite superior, mientras que la resistencia a la compresión del óxido de tungsteno en polvo suelto (como el precursor de polvo de tungsteno) es baja, solo 200-300 MPa. Además, el óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura con más vacantes de oxígeno tienen una resistencia a la compresión ligeramente menor (alrededor de 400-600 MPa), lo que debilita la resistencia general de la red cristalina debido a defectos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En aplicaciones prácticas, la resistencia a la compresión del óxido de tungsteno lo hace adecuado para procesos de conformado a alta presión, como materia prima para piezas en bruto prensadas en la producción de alambre de tungsteno. CTIA GROUP LTD mejora la resistencia a la compresión del óxido de tungsteno optimizando las condiciones de sinterización para satisfacer las necesidades de las empresas de tungsteno en materiales resistentes a la presión. La resistencia a la compresión del óxido de tungsteno es una realización importante de sus propiedades mecánicas, lo que determina su fiabilidad en entornos de alta presión.

### 5.5.3 Resistencia al cizallamiento del óxido de wolframio

La resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno es otro parámetro clave de su resistencia mecánica, lo que refleja su capacidad para resistir la deformación o fractura causada por el esfuerzo cortante. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su resistencia al cizallamiento suele estar entre 200 y 300 MPa, que es inferior a la resistencia a la compresión, mostrando una cierta anisotropía. Esta propiedad lo hace un poco menos efectivo en aplicaciones con fuerzas de cizallamiento más altas, pero sigue siendo práctico.

La resistencia al cizallamiento del trióxido de tungsteno está relacionada con su estructura cristalina monoclinica, y la disposición en capas del octaedro  $WO_6$  lo hace débil en algunas direcciones. La resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno a granel obtenido por calcinación de paratungstato de amonio es de aproximadamente 250-300 MPa, porque la fuerza de unión entre granos es suficiente para resistir un cierto esfuerzo de cizallamiento. La resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno a nanoescala se reduce significativamente (alrededor de 100-200 MPa) debido al aumento de los límites de grano y las conexiones sueltas entre las partículas, lo que facilita el deslizamiento bajo el cizallamiento. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene una resistencia al cizallamiento ligeramente superior de unos 300-350 MPa debido a su estructura más homogénea.

La resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno también se ve afectada por la morfología y los defectos. Debido a su estructura en capas, la resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno de película delgada es baja (alrededor de 150-200 MPa) y es fácil de fracturar a lo largo de las capas intermedias. Sin embargo, la resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura con más vacantes de oxígeno se reduce aún más (alrededor de 120-180 MPa) y la resistencia al cizallamiento se debilita por la distorsión de la red. En los compuestos, la resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno se puede mejorar mediante la adición de tungsteno, cobre o tungsteno plateado para mejorar las propiedades generales.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En aplicaciones prácticas, la resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno hace que funcione bien en escenarios con bajas tensiones de cizallamiento, como [los calentadores de tungsteno](#). La resistencia al cizallamiento del óxido de tungsteno complementa sus propiedades mecánicas, lo que refleja sus limitaciones y potencial en entornos de tensión complejos.

## 5.6 Superficie específica del óxido de wolframio

El área superficial específica del óxido de tungsteno es un parámetro importante de sus propiedades físicas, que refleja directamente su tamaño de partícula, morfología y actividad superficial, y tiene un impacto clave en su aplicación en catálisis, adsorción y almacenamiento de energía. Tomando [como ejemplo el trióxido de tungsteno](#), su superficie específica varía según el método de preparación y el tamaño de partícula, y generalmente varía en el rango de 1-100 m<sup>2</sup>/g, lo cual es un indicador importante de su funcionalidad.

El óxido de tungsteno a granel tiene una superficie específica baja, normalmente entre 1 y 5 m<sup>2</sup>/g, debido a sus partículas grandes (escala de micras) y a la limitada exposición superficial de los sitios activos. El área superficial específica del óxido de tungsteno amarillo obtenido por calcinación a alta temperatura de paratungstato de amonio es generalmente de 2-10 m<sup>2</sup> / g, lo que es adecuado para el precursor de polvo de tungsteno, ya que no requiere una actividad superficial excesiva durante el proceso de reducción. Por el contrario, el área superficial específica del óxido de tungsteno a nanoescala aumenta significativamente, como las nanopartículas o las nanovarillas preparadas por el método hidrotermal de metatungstato de amonio, con un área superficial específica de 50-100 m<sup>2</sup>/g. Esta alta superficie específica se debe a una reducción en el tamaño de partícula (10-100 nm) y la diversidad morfológica (por ejemplo, nanocables o nanoflores), lo que da como resultado una proporción significativamente mayor de átomos de superficie.

El área superficial específica del óxido de tungsteno también está relacionada con su forma cristalina y la vacante de oxígeno. El óxido de tungsteno monoclinico tiene un área de superficie específica relativamente estable, mientras que la nanoestructura hexagonal tiene un área de superficie específica más alta debido al efecto canal, y a menudo se usa en fotocatalizadores o sensores de gas (ver Tecnología de tungsteno). El área superficial específica del óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura es ligeramente mayor que la del trióxido de tungsteno del mismo tamaño (aproximadamente 10-20% de aumento), y la rugosidad de la superficie aumenta debido a las vacantes de oxígeno y los sitios más activos. El dióxido de tungsteno (WO<sub>2</sub>) tiene una superficie específica más baja

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5-20 m<sup>2</sup>/g) debido a su estructura cristalina simple y a la tendencia de las partículas a fusionarse.

En aplicaciones prácticas, la alta área superficial específica del óxido de tungsteno lo hace excelente en el campo de la catálisis, por ejemplo, al descomponer contaminantes orgánicos, la alta área superficial del óxido de nanotungsteno puede adsorber más reactivos y mejorar la eficiencia. El área superficial específica del óxido de tungsteno es un reflejo directo de su funcionalidad superficial y un parámetro clave para su aplicación en nanotecnología.

### 5.7 Densidad aparente del óxido de tungsteno

La densidad aparente del óxido de tungsteno se refiere a la densidad de su polvo en el estado de empaque natural, que refleja las características de vacío y acumulación entre las partículas, y tiene un impacto importante en sus propiedades de almacenamiento, transporte y procesamiento. En el caso del trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), por ejemplo, la densidad aparente suele estar entre 1,0 y 2,5 g/cm<sup>3</sup>, que es muy inferior a su densidad teórica (7,16 g/cm<sup>3</sup>) debido a la gran cantidad de huecos entre las partículas.

El óxido de tungsteno a granel tiene una alta densidad aparente, como el óxido de tungsteno amarillo del tamaño de una micra producido por calcinación de ácido tungstático, con una densidad suelta de aproximadamente 2,0-2,5 g / cm<sup>3</sup>. Esta mayor densidad aparente se debe a las partículas más grandes (1-10 μm), un empaquetamiento más apretado y menos vacíos, lo que lo hace adecuado para la producción industrial de metal de tungsteno o alambre de tungsteno. Por ejemplo, la densidad aparente del óxido de tungsteno a nanoescala se reduce significativamente, por ejemplo, la densidad aparente de las nanopartículas preparadas por método hidrotermal es de solo 0,5-1,0 g / cm<sup>3</sup>, debido al aumento de los espacios entre las nanopartículas (10-100 nm) y la acumulación suelta. Esta baja densidad hace que sea fácil de dispersar en plástico de tungsteno o caucho de tungsteno.

La densidad aparente del óxido de tungsteno también se ve afectada por la morfología y la forma cristalina. Las partículas monoclinicas de óxido de tungsteno son regulares y tienen una alta densidad aparente (1,5-2,5 g/cm<sup>3</sup>), mientras que las nanovarillas o nanotubos hexagonales tienen una baja densidad aparente (0,8-1,5 g/cm<sup>3</sup>) debido a su compleja morfología. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen una densidad suelta ligeramente menor (1,0-2,0 g/cm<sup>3</sup>), porque las vacantes de oxígeno hacen que la superficie de la partícula sea más rugosa y la eficiencia de acumulación disminuye. El dióxido de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno ( $WO_2$ ) tiene una densidad suelta de aproximadamente 1,5-2,2 g/cm<sup>3</sup> porque sus partículas tienden a ser aglomerados.

En aplicaciones prácticas, la densidad aparente del óxido de tungsteno afecta su tecnología de procesamiento. Por ejemplo, el óxido de tungsteno con alta densidad aparente es más fácil de obtener al prensar, mientras que el óxido de nanotungsteno con baja densidad aparente es adecuado para recubrimientos livianos. CTIA GROUP LTD optimiza la densidad aparente del óxido de tungsteno ajustando el tamaño y la morfología de las partículas para satisfacer las necesidades de los diferentes mercados de tungsteno. La densidad suelta del óxido de tungsteno es un puente importante entre sus propiedades físicas y su practicidad.

## 5.8 Propiedades ópticas del óxido de tungsteno

Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno son la base para su aplicación en fotocátalisis, dispositivos fotocromáticos y optoelectrónicos, y están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina y estructura electrónica. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, sus propiedades ópticas incluyen propiedades de absorción, transmisión y reflexión de la luz, y exhibe diversidad debido a la banda prohibida y el estado defectuoso.

El trióxido de tungsteno tiene una banda prohibida de energía de aproximadamente 2.5-2.8 eV, que es un semiconductor de banda prohibida amplia, que puede absorber luz ultravioleta y algo de luz visible, y tiene una apariencia amarilla. Esta propiedad óptica le confiere ventajas en el campo de la fotocátalisis, como la división del agua o la degradación de contaminantes orgánicos. Debido a la estructura asimétrica, el óxido de tungsteno monoclinico tiene un borde de absorción de luz ligeramente más ancho, mientras que la nanoestructura hexagonal puede tener una banda prohibida ligeramente más pequeña (2,4-2,7 eV) y un rango de absorción más amplio debido al efecto cuántico. La banda prohibida entre el óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura se reduce aún más (2.0-2.5 eV), y la absorción de luz se expande a la región del infrarrojo cercano debido a la introducción de niveles de energía defectuosos por vacantes de oxígeno.

Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno también se manifiestan en la capacidad electrocromática. Bajo la acción de un campo eléctrico, el trióxido de tungsteno puede cambiar de color de amarillo a azul o gris por intercalación iónica (por ejemplo,  $Li^+$ ). Esta propiedad hace que sea ampliamente utilizado en vidrio inteligente, donde la transmitancia se puede reducir del 80% a menos del 10%. Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno en forma de películas delgadas

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

son mejores, y las características de reflexión y transmisión son fáciles de ajustar debido al espesor controlable. El óxido de tungsteno a nanoescala tiene un efecto de dispersión de la luz mejorado y puede parecer translúcido o blanco.

En aplicaciones prácticas, las propiedades ópticas del óxido de tungsteno lo hacen brillar en el campo de la optoelectrónica. Por ejemplo, los fotocatalizadores a base de tungstato utilizan sus propiedades de absorción de luz para descomponer los contaminantes, mientras que los recubrimientos ópticos de los calentadores de tungsteno aprovechan sus propiedades de cambio de color. CTIA GROUP LTD mejora las propiedades ópticas del óxido de tungsteno en empresas de tungsteno mediante la optimización de la estructura cristalina. Las propiedades ópticas del óxido de tungsteno están en el corazón de sus aplicaciones de alta tecnología

### 5.8.1 Absorción de luz y propiedades fotocatalíticas del óxido de wolframio

La absorción de luz y las propiedades fotocatalíticas del óxido de tungsteno son manifestaciones importantes de sus propiedades ópticas, que determinan directamente su eficiencia en la fotólisis del agua, la degradación de contaminantes y la utilización de la energía solar. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su rango de absorción de luz se concentra principalmente en la luz ultravioleta y algunas regiones de luz visible, y la banda prohibida de energía es de 2,5-2,8 eV, lo que lo convierte en un material fotocatalítico eficaz.

El borde de absorción de luz de óxido de tungsteno de la forma cristalina monoclinica es de aproximadamente 400-500 nm, y debido a la disposición asimétrica del octaedro  $WO_6$ , los electrones pasan del orbital  $O2p$  al orbital  $W5d$  para generar pares de electrones y huecos fotogenerados. Esta propiedad lo hace muy eficiente para descomponer los tintes orgánicos, como el azul de metileno, bajo la luz ultravioleta. Debido al efecto nano y la estructura del canal, el óxido de tungsteno hexagonal tiene un rango de absorción de luz ligeramente más amplio (hasta 550 nm) y una actividad fotocatalítica más fuerte, especialmente en forma de nanovarillas o nanoflores, con una mayor área de superficie específica y más sitios activos. La absorción de luz del óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura con más vacantes de oxígeno se extiende a la región del infrarrojo cercano, y la fotorrespuesta se ve mejorada por el nivel de energía del defecto.

Las propiedades fotocatalíticas del óxido de tungsteno también se ven afectadas por la morfología y los defectos. Debido a su alta área de superficie específica y su corta ruta de difusión del portador, el óxido de tungsteno a nanoescala

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tiene una mayor eficiencia de separación de huecos de electrones fotogenerados, y su rendimiento fotocatalítico es mejor que el de los materiales a granel. La vacante de oxígeno se utiliza como trampa de electrones para prolongar la vida útil del portador y mejorar aún más la eficiencia catalítica. Por ejemplo, en la producción de hidrógeno a partir de la fotólisis del agua, la tasa de producción de hidrógeno del óxido de tungsteno hexagonal puede alcanzar decenas de  $\mu\text{mol/h} \cdot \text{g}$ . Industrialmente, tungstato de calcio combinado con óxido de tungsteno, optimiza aún más la absorción de luz y el rendimiento catalítico.

### 5.8.2 Propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno

Las propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno se refieren a su capacidad para cambiar de color de forma reversible bajo la luz, lo cual es una manifestación única de sus propiedades ópticas. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), sus propiedades fotocromáticas se derivan de la transferencia de electrones inducida por la luz y la formación de vacantes de oxígeno, lo que lo convierte en una aplicación potencial en dispositivos inteligentes de vidrio y visualización.

El óxido de tungsteno monoclinico cambia de amarillo a azul o gris bajo luz ultravioleta, y las vacantes de oxígeno se forman por la reacción de electrones fotogenerados con oxígeno retular, y el tungsteno se reduce de  $\text{W}^{6+}$  a  $\text{W}^{5+}$ . Este proceso de decoloración generalmente involucra agua o una fuente de protones (por ejemplo,  $\text{H}_2\text{O}$  adsorbido en la superficie) en la siguiente reacción:  $\text{WO}_3 + \text{h}\nu \rightarrow \text{WO}_{3-x} + x/2 \text{O}_2$ . El óxido de tungsteno a nanoescala tiene propiedades fotocromáticas más fuertes, ya que la alta área superficial específica acelera la reacción de la superficie y el tiempo de cambio de color se puede acortar a unos pocos segundos. Debido a la estructura del canal, la eficiencia de decoloración del óxido de tungsteno hexagonal es ligeramente mayor, pero la estabilidad es ligeramente inferior.

Las propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno también se ven afectadas por las vacantes de oxígeno y la topografía. Las vacantes iniciales de oxígeno de óxido de tungsteno azul y púrpura les dan un umbral fotocromático más bajo y pueden cambiar de color a intensidades de luz más bajas. El óxido de tungsteno en forma de películas delgadas se usa a menudo en dispositivos ópticos debido a su grosor controlable y al ajuste más fácil de la profundidad y velocidad del color. En comparación con el electrocromismo, el fotocromismo es menos reversible y la iluminación a largo plazo puede provocar cambios irreversibles en la estructura. En aplicaciones prácticas, las propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno lo hacen prometedor para ventanas y sensores con control de luz. CTIA GROUP LTD mejora las propiedades de cambio de color del óxido de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en productos químicos de tungsteno mediante la optimización de la nanoestructura. Las propiedades fotocromáticas del óxido de tungsteno son una ventaja única para sus aplicaciones ópticas.

## 5.9 Propiedades eléctricas del óxido de tungsteno

Las propiedades eléctricas del óxido de tungsteno son las propiedades principales del óxido de tungsteno en dispositivos electrónicos, sensores y aplicaciones electrocrómicas, y están estrechamente relacionadas con su estructura cristalina, estructura electrónica y estado defectuoso. Tomando el trióxido de tungsteno como ejemplo, sus propiedades eléctricas son típicas del comportamiento de los semiconductores, y la conductividad y la movilidad del portador se ven afectadas por la forma del cristal y las condiciones ambientales, lo que muestra diversidad y sintonización.

Como semiconductor de tipo n, la conductividad del trióxido de tungsteno suele estar en el rango de  $10^{-7}$ – $10^{-3}$  S/cm, dependiendo de la temperatura, la vacante de oxígeno y el dopaje. En la forma cristalina monoclinica, los electrones del óxido de tungsteno se derivan principalmente del estado defectuoso de la vacante de oxígeno, y  $W^{6+}$  se reduce parcialmente a  $W^{5+}$ , proporcionando portadores de electrones adicionales. Esta propiedad lo hace excelente en sensores de gas, por ejemplo, la respuesta al  $NO_2$  o  $H_2S$  puede alterar significativamente la conductividad. Debido a la estructura del canal, el óxido de tungsteno hexagonal tiene una mayor movilidad de electrones y conductividad de hasta  $10^{-2}$  S / cm, lo que es adecuado para aplicaciones de alta sensibilidad.

Las propiedades eléctricas del óxido de tungsteno también tienen propiedades electrocrómicas. Bajo la acción de un campo eléctrico, los iones (como  $Li^+$  o  $H^+$ ) se incrustan en la red cristalina y, con la implantación de electrones, la conductividad aumenta significativamente. Por ejemplo, en el vidrio inteligente, el trióxido de tungsteno cambia de un estado aislante a un estado conductor y un color cambia de amarillo a azul. Este cambio dinámico se debe a la capacidad de ajuste de la estructura electrónica, lo que la hace ampliamente utilizada en dispositivos electroquímicos. El óxido de tungsteno a nanoescala tiene mejores propiedades eléctricas y se usa a menudo en la funcionalización de productos químicos de tungsteno debido a su alta área de superficie específica y su corta ruta de portador para mejorar la eficiencia del transporte de electrones.

En aplicaciones prácticas, las propiedades eléctricas del óxido de tungsteno han atraído mucha atención en el campo de la electrónica. Por ejemplo, el óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura son adecuados para materiales de electrodos debido a su mayor conductividad debido a más vacantes de oxígeno. Las

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propiedades eléctricas del óxido de tungsteno son la base de sus aplicaciones de alta tecnología, lo que refleja la flexibilidad de sus propiedades semiconductoras.

### 5.9.1 Propiedades semiconductoras del óxido de wolframio

Las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno son fundamentales para sus propiedades eléctricas, lo que lo hace importante en sensores, células solares y dispositivos optoelectrónicos. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), como semiconductor de banda prohibida ancha de tipo n, la banda prohibida de energía es de 2,5-2,8 eV, y la conductividad electrónica se deriva de los portadores introducidos por las vacantes de oxígeno o el dopaje.

El óxido de tungsteno monoclinico es la forma más común de semiconductor, y su banda de conducción está compuesta por orbitales W 5d y la banda de valencia está dominada por orbitales O2p. Las vacantes de oxígeno, como defectos donantes, donan electrones libres para hacer su conductividad entre  $10^{-7}$ - $10^{-4}$  S/cm. Esta propiedad lo hace sensible a los gases oxidantes como el  $NO_2$ , que adsorben y atrapan electrones, reduciendo la conductividad. Debido a la estructura del canal, el óxido de tungsteno hexagonal tiene una mayor movilidad electrónica y conductividad de  $10^{-3}$ - $10^{-2}$  S / cm, lo que es adecuado para sensores de alta sensibilidad. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) está cerca de un conductor metálico y tiene una mayor conductividad eléctrica, pero propiedades semiconductoras más débiles.

Las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno también se ven afectadas por la temperatura y la topografía. A temperatura ambiente, su conductividad es baja y, a medida que aumenta la temperatura (a 200-400 ° C), los electrones excitados térmicamente aumentan y la conductividad aumenta significativamente. El óxido de tungsteno a nanoescala (por ejemplo, nanocables o nanoláminas) puede tener una banda prohibida ligeramente más pequeña (2,4-2,7 eV) debido a los efectos cuánticos y los estados de superficie, las concentraciones de portadores más altas y el mejor rendimiento de los semiconductores. Por ejemplo, en los sensores basados en polvo de tungsteno, el óxido de nanotungsteno puede detectar CO docenas de veces más sensible que los materiales a granel. En aplicaciones prácticas, las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno lo hacen excelente para la detección de gases y la conversión fotoeléctrica. CTIA GROUP LTD optimiza la conductividad y la capacidad de respuesta del óxido de tungsteno mediante dopaje (por ejemplo, tungstato de sodio) o manipulando las vacantes de oxígeno para satisfacer las necesidades del mercado del tungsteno. Las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno son la base de sus aplicaciones eléctricas, lo que refleja la diversidad de su estructura

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrónica.

### 5.9.2 Propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno

Las propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno se refieren a su capacidad para cambiar de color de manera reversible bajo la acción del campo eléctrico, que es una manifestación única de sus propiedades eléctricas. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), sus propiedades electrocrómicas se deben a los cambios en la estructura electrónica causados por la intercalación de iones y la implantación de electrones, lo que lo hace ampliamente utilizado en dispositivos inteligentes de vidrio y visualización.

El óxido de tungsteno monoclinico es un material típico para el electrocromismo. Cuando se aplica un voltaje (por ejemplo, 1-3 V), pequeños iones (por ejemplo,  $Li^+$  o  $H^+$ ) se incrustan en el espacio octaédrico inter- $WO_6$ , y los electrones se inyectan en la red cristalina, y el tungsteno se reduce de  $W^{6+}$  a  $W^{5+}$ , generando vacantes de oxígeno. La reacción es:  $WO_3 + xLi^+ + xe^- \rightarrow Li_xWO_3$ . Este cambio cambia el óxido de tungsteno de amarillo a azul o gris, y la transmitancia cae del 80% a menos del 10%. Una vez que se separan los iones, el color se recupera de forma reversible, lo que refleja su capacidad de ajuste eléctrico. El óxido de tungsteno a nanoescala tiene propiedades electrocrómicas más fuertes, ya que la corta ruta de difusión acelera la intercalación de iones y el tiempo de decoloración se puede reducir a unos pocos segundos.

Las propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno también se ven afectadas por la forma del cristal y los defectos. Debido a la estructura del canal, el óxido de tungsteno hexagonal tiene una difusión de iones más rápida y una mayor eficiencia de decoloración, pero la estabilidad del ciclo es ligeramente inferior. Las vacantes iniciales de oxígeno del óxido de tungsteno azul y púrpura hacen que tengan un umbral de decoloración más bajo y una respuesta más rápida. El óxido de tungsteno en forma de película delgada se usa a menudo en dispositivos ópticos debido a su grosor controlable, fácil ajuste de la profundidad de color y velocidad. En comparación con el fotocromismo, el electrocromismo es más controlable y reversible.

En aplicaciones prácticas, las propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno lo hacen muy deseable en edificios energéticamente eficientes y tecnología de visualización. Por ejemplo, los electrodos a base de cobre y tungsteno están compuestos con óxido de tungsteno para mejorar la conductividad y las propiedades de cambio de color. Las propiedades electrocrómicas del óxido de tungsteno son aplicaciones avanzadas de sus propiedades eléctricas, lo que demuestra su versatilidad.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 5.10 Propiedades térmicas del óxido de tungsteno

Las propiedades térmicas del óxido de tungsteno son sus propiedades clave en entornos de alta temperatura, que determinan su idoneidad en materiales refractarios, dispositivos termoeléctricos y procesamiento a alta temperatura. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, sus propiedades térmicas incluyen la estabilidad térmica, las propiedades de expansión térmica y la conductividad térmica, que están estrechamente relacionadas con la estructura cristalina y la composición química.

Las propiedades térmicas del trióxido de tungsteno se caracterizan por una alta estabilidad térmica, con un punto de fusión de aproximadamente  $1473\text{ }^\circ\text{C}$ , y la estructura cristalina permanece intacta por debajo de  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ . Esta propiedad le permite mantener su función a altas temperaturas, p. ej. como precursor estable en la producción de tungsteno. El óxido de tungsteno tiene un bajo coeficiente de expansión térmica (alrededor de  $6-8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ) y una buena estabilidad dimensional, lo que es adecuado para dispositivos de precisión. En términos de conductividad térmica, el óxido de tungsteno tiene una baja conductividad térmica debido a su limitada eficiencia de transferencia de calor por vibración de red, pero es suficiente para satisfacer algunas necesidades de gestión térmica.

Las propiedades térmicas del óxido de tungsteno varían según la forma y la morfología del cristal. La forma monoclinica tiene la mejor estabilidad térmica del óxido de tungsteno, mientras que la forma hexagonal de la nanoestructura tiene una estabilidad térmica ligeramente menor debido a su alta energía superficial. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura son propensos a la pérdida de oxígeno a altas temperaturas y sus propiedades térmicas son ligeramente inferiores a las del trióxido de tungsteno. El óxido de tungsteno a nanoescala tiene una conductividad térmica más baja (alrededor de  $0,5-2\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) debido a la dispersión mejorada del límite de grano, pero tiene ventajas en el aislamiento térmico liviano.

En aplicaciones prácticas, las propiedades térmicas del óxido de tungsteno lo hacen excelente en el campo de las altas temperaturas. Por ejemplo, ferro-tungsteno : se agrega óxido de tungsteno para mejorar la resistencia al calor. CTIA GROUP LTD OPTIMIZA LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL ÓXIDO DE TUNGSTENO EN EL PRECIO DEL TUNGSTENO MEDIANTE LA MANIPULACIÓN DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA. Las propiedades térmicas del óxido de tungsteno son la piedra angular de sus aplicaciones a alta temperatura.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 5.10.1 Estabilidad térmica del óxido de wolframio

La estabilidad térmica del óxido de tungsteno es fundamental para sus propiedades térmicas, lo que refleja su capacidad para mantener la estructura y la función a altas temperaturas. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), tiene una alta estabilidad térmica, un punto de fusión de  $1473\text{ }^\circ\text{C}$  y no hay descomposición significativa ni transformación de fase por debajo de  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , lo que lo hace de gran valor en materiales refractarios y catálisis a alta temperatura.

El óxido de tungsteno monoclinico es la forma térmicamente más estable, y su red octaédrica  $WO_6$  permanece estable hasta aproximadamente  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , con solo transiciones de formas cristalinas (por ejemplo, a formas cristalinas ortogonales o hexagonales). El óxido de tungsteno amarillo obtenido por calcinación de paratungstato de amonio puede soportar altas temperaturas superiores a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  en el aire, y comienza a descomponerse en óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura a  $700\text{--}900\text{ }^\circ\text{C}$  en hidrógeno, y finalmente en metal de tungsteno. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) es térmicamente estable hasta  $1500\text{ }^\circ\text{C}$  en una atmósfera inerte.

La estabilidad térmica del óxido de tungsteno se ve afectada por la topografía. Debido a su estructura densa, el óxido de tungsteno a granel tiene una mejor estabilidad térmica que el óxido de tungsteno a nanoescala. Debido a la alta energía superficial de las nanopartículas, la coalescencia o descomposición del grano puede ocurrir a  $600\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ . El óxido de tungsteno con más vacantes de oxígeno es más propenso a la pérdida de oxígeno a altas temperaturas y su estabilidad térmica disminuye. La estabilidad térmica del óxido de tungsteno es la clave para sus aplicaciones a alta temperatura, lo que afecta directamente su confiabilidad en entornos hostiles.

### 5.10.2 Propiedades de expansión térmica del óxido de tungsteno

Las propiedades de expansión térmica del óxido de tungsteno son un aspecto importante de sus propiedades térmicas, lo que refleja su estabilidad dimensional bajo cambios de temperatura. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su coeficiente de expansión térmica está entre  $6 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ , que es un material de baja expansión, lo que lo hace excelente en dispositivos de alta temperatura.

El coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno en formas monoclinicas varía ligeramente debido a la asimetría del eje del cristal, por ejemplo, alrededor de  $8 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$  a lo largo del eje c y ligeramente más bajo a lo largo de los ejes a y b ( $6\text{--}7 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ). Esta baja expansión se debe a la fuerte unión del octaedro  $WO_6$ , que limita la vibración térmica de la red cristalina. El óxido

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungsteno preparado por ácido tungstico tiene un rendimiento de expansión térmica estable y es adecuado para piezas de precisión. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) tiene un coeficiente de expansión térmica ligeramente más bajo ( $5-7 \times 10^{-6} K^{-1}$ ), mientras que el óxido de tungsteno azul y púrpura tiene vacantes de oxígeno ligeramente más altas.

Las propiedades de expansión térmica del óxido de tungsteno se ven afectadas por la topografía. La expansión del óxido de tungsteno a granel es uniforme, mientras que el coeficiente de expansión térmica del óxido de tungsteno a nanoescala puede aumentar en un 10-20% debido al efecto límite del grano, y es fácil de deformar. En aplicaciones prácticas, la baja expansión térmica del óxido de tungsteno le permite reducir el agrietamiento por tensión térmica en compuestos de cobre y tungsteno. La expansión térmica del óxido de tungsteno es un complemento importante a sus propiedades térmicas, lo que garantiza su estabilidad en el entorno de los cambios de temperatura.

### 5.11 Sensibilidad al gas del óxido de tungsteno

La sensibilidad al gas del óxido de tungsteno se refiere a su capacidad para cambiar sus propiedades eléctricas en un entorno gaseoso específico, que es una característica clave de su aplicación en el campo de los sensores de gas. Por ejemplo, el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, es un semiconductor de tipo n con alta sensibilidad a los gases oxidantes (por ejemplo,  $NO_2$ ) y gases reductores (por ejemplo,  $H_2S$ ), lo que se debe a sus mecanismos de adsorción superficial y transferencia de electrones.

La sensibilidad al gas del trióxido de tungsteno depende principalmente de su estructura cristalina y las propiedades de su superficie. Debido a la disposición asimétrica del octaedro  $WO_6$  de óxido de tungsteno monoclinico, hay una gran cantidad de átomos de tungsteno y oxígeno insaturados de coordinación en la superficie, que pueden adsorber eficazmente moléculas de gas. Por ejemplo, en el entorno de  $NO_2$ , el óxido de tungsteno atrapa electrones en la superficie, la conductividad disminuye y la sensibilidad puede alcanzar decenas de veces. El óxido de tungsteno hexagonal es más sensible a los gases debido a su estructura de canal y su mayor área de superficie específica, especialmente en forma de nanovarillas o nanoláminas, y responde más rápido a bajas concentraciones de gases (como el nivel de PPM de CO). El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura, que tienen más vacantes de oxígeno, mejoran aún más su sensibilidad al gas debido al aumento de los sitios activos superficiales.

La sensibilidad al gas del óxido de tungsteno se ve afectada por la temperatura y la topografía. A una temperatura de funcionamiento de 200-400 ° C, tiene la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mejor sensibilidad al gas, ya que la excitación térmica mejora la adsorción de gas y la transferencia de electrones. Debido a su alta área de superficie específica y su corta trayectoria portadora, el óxido de tungsteno a nanoescala tiene un tiempo de respuesta más corto a un gas de segundos y un tiempo de recuperación más rápido. Por ejemplo, en [los sensores basados en polvo de tungsteno](#), el óxido de nanotungsteno puede detectar H<sub>2</sub> con una sensibilidad de más de 100. Por el contrario, el óxido de tungsteno a granel es menos sensible a los gases y responde más lentamente debido a que hay menos sitios activos.

En aplicaciones prácticas, la sensibilidad al gas del óxido de tungsteno lo hace excelente para el monitoreo ambiental y la seguridad industrial. Por ejemplo, [el cobre de tungsteno](#) está compuesto con óxido de tungsteno para mejorar la conductividad eléctrica y optimizar aún más el rendimiento del sensor. La sensibilidad al gas del óxido de tungsteno es una extensión de sus propiedades eléctricas, lo que refleja su valor práctico en la detección de gases.

## 5.12 Reacción redox del óxido de tungsteno

La reacción redox del óxido de tungsteno es una realización importante de sus propiedades químicas, lo que refleja su capacidad de transformación entre diferentes estados de oxidación. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), como compuesto de alta oxidación, puede reducirse a un estado de baja oxidación (como el WO<sub>2</sub>) o metal de [tungsteno](#), y también puede oxidar otras sustancias, que es su reacción básica en metalurgia y catálisis.

En la reacción de reducción, el trióxido de tungsteno exhibe una actividad redox significativa en una atmósfera de hidrógeno. Por ejemplo, a 700–900 ° C, el trióxido de tungsteno pierde oxígeno gradualmente para formar óxido de tungsteno azul (WO<sub>2</sub>), óxido de tungsteno púrpura, que finalmente se convierte en metal de tungsteno a 1000–1200 ° C, y la reacción es:  $WO_3 + 3H_2 \rightarrow W + 3H_2O$ . Este proceso de reducción paso a paso es el paso central en la producción industrial de filamentos de tungsteno, y el aumento de las vacantes de oxígeno va acompañado de un cambio en la estructura cristalina de monoclinico a una morfología más suelta. La tasa de reducción está estrechamente relacionada con la temperatura y la concentración de hidrógeno, y las altas temperaturas aceleran la reacción, pero pueden causar aglomeración de partículas.

El óxido de tungsteno también puede participar en la reacción como agente oxidante. Por ejemplo, el dióxido de tungsteno (WO<sub>2</sub>) puede oxidarse a trióxido de tungsteno cuando se calienta a 500–700 ° C en oxígeno o aire con la siguiente reacción:  $2WO_2 + O_2 \rightarrow 2WO_3$ . Esta reacción de oxidación se utiliza a menudo como un paso intermedio en la preparación de tungstato. Debido a la alta superficie, el óxido

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungsteno a nanoescala tiene una tasa de reacción de reducción y oxidación más rápida, pero la estabilidad es ligeramente inferior. Las vacantes de oxígeno juegan un papel clave en las reacciones redox, por ejemplo, el óxido de tungsteno azul se reduce más fácilmente debido a estados defectuosos.

En aplicaciones prácticas, la reacción redox del óxido de tungsteno se usa ampliamente en la metalurgia del tungsteno y la regeneración de catalizadores. CTIA GROUP LTD mejora la eficiencia de conversión del óxido de tungsteno en el mercado del tungsteno optimizando las condiciones de reducción como la atmósfera y la temperatura. La reacción redox del óxido de tungsteno está en el corazón de su actividad química, lo que demuestra su versatilidad en la industria.

### 5.13 Reacción ácido-base del óxido de tungsteno

La reacción ácido-base del óxido de tungsteno es un aspecto importante de sus propiedades químicas, reflejando las características de sus óxidos anfóteros, que pueden reaccionar con ácidos o bases para formar los compuestos de tungsteno correspondientes. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), su capacidad de reacción ácido-base hace que desempeñe un papel importante en la hidrometalurgia y la [preparación química del tungsteno](#).

En condiciones ácidas, el trióxido de tungsteno tiene una reactividad limitada, ya que es casi insoluble en agua. En ácidos diluidos como HCl o  $H_2SO_4$ , el trióxido de tungsteno tiene una solubilidad muy baja y es posible que solo se formen trazas de ácido tungstico en la superficie. Sin embargo, en ácidos concentrados (por ejemplo,  $HNO_3$ ), el trióxido de tungsteno puede reaccionar lentamente para formar ácido tungstico en las siguientes reacciones:  $WO_3 + H_2O \rightarrow H_2WO_4$ . Esta reacción se utiliza en la refinación de wolframita o [scheelita](#) para convertir el óxido de tungsteno en compuestos solubles a través de la lixiviación ácida. El dióxido de tungsteno ( $WO_2$ ) es ligeramente más reactivo en los ácidos porque es más soluble debido a su estructura de bajo estado de oxidación.

En condiciones alcalinas, el óxido de tungsteno exhibe una mayor reactividad. El trióxido de tungsteno reacciona con una base fuerte (como NaOH) para formar tungstato de sodio, y la reacción es:  $WO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2WO_4 + H_2O$ . En una solución alcalina concentrada a  $80^\circ C$ , la reacción se completa rápidamente para producir tungstato soluble en agua. Esta propiedad es un paso fundamental en la producción industrial de paratungstato de amonio. Debido a la alta superficie del óxido de tungsteno a nanoescala, la velocidad de reacción alcalina es más rápida, pero puede ir acompañada de daños estructurales locales. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura son similares en reactividad alcalina, pero se disuelven más completamente debido a más vacantes de oxígeno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En aplicaciones prácticas, la reacción ácido-base del óxido de tungsteno se utiliza en la extracción y purificación de tungsteno. La reacción ácido-base del óxido de tungsteno refleja sus propiedades anfóteras y su flexibilidad química, que es la clave para su procesamiento húmedo.

#### 5.14 Propiedades catalíticas del óxido de tungsteno

El rendimiento catalítico del óxido de tungsteno es una realización de alto nivel de sus propiedades químicas, lo que lo hace ampliamente utilizado en los campos de fotocatalisis, catálisis térmica y electrocatálisis. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, su rendimiento catalítico se debe a sus propiedades semiconductoras, alta área superficial y sitios tensioactivos, que son sus principales ventajas en el campo de la protección del medio ambiente y la energía.

El trióxido de tungsteno tiene un rendimiento fotocatalítico sobresaliente porque su banda prohibida (2,5–2,8 eV) es adecuada para absorber luz ultravioleta y algo de luz visible. Con la luz, el óxido de tungsteno genera pares electrón-hueco fotogenerados que descomponen el agua o degradan los contaminantes orgánicos. Por ejemplo, el óxido de tungsteno monoclinico puede descomponer el azul de metileno con una eficiencia de más del 90% bajo luz ultravioleta. El óxido de tungsteno hexagonal nano óxido de tungsteno tiene una mayor actividad catalítica debido a su estructura de canal y su alta área de superficie específica, y a menudo se usa para la producción de hidrógeno por fotólisis del agua. El óxido de tungsteno azul y el óxido de tungsteno púrpura tienen un rendimiento fotocatalítico más fuerte debido a la absorción prolongada de luz en la región del infrarrojo cercano debido a las vacantes de oxígeno.

Las propiedades termocatalíticas del óxido de tungsteno son excelentes en reacciones a alta temperatura. Por ejemplo, a 500–700 °C, el trióxido de tungsteno cataliza la oxidación o deshidrogenación de los hidrocarburos debido a las fuertes propiedades oxidantes de los átomos de oxígeno en su superficie. Debido a la gran cantidad de sitios activos y la mayor eficiencia catalítica térmica, el óxido de tungsteno a nanoescala a menudo se combina con tungstato de calcio para mejorar la estabilidad. En el campo de la electrocatálisis, el óxido de tungsteno se utiliza como catalizador para las reacciones de evolución del oxígeno (REA) y se comporta bien en electrolitos alcalinos debido a su alta conductividad y estabilidad.

En aplicaciones prácticas, el rendimiento catalítico del óxido de tungsteno ha atraído mucha atención en el control de la contaminación y las nuevas energías.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, los catalizadores a base de plástico de tungsteno utilizan su alta actividad para descomponer los COV. CTIA GROUP LTD optimiza el rendimiento catalítico del óxido de tungsteno en el precio del tungsteno mediante la manipulación de la estructura cristalina y la morfología. Las propiedades catalíticas del óxido de tungsteno son un reflejo concentrado de sus propiedades químicas, lo que demuestra su potencial en la tecnología moderna.



CTIA GRUPO LTD WO<sub>2.72</sub>

## Capítulo 6 Método de preparación del óxido de tungsteno

### 6.1 Métodos tradicionales de preparación de óxido de tungsteno

El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno es un medio técnico común en la industria y el laboratorio, con el objetivo de preparar óxido de tungsteno con propiedades específicas a través de un proceso simple y eficiente. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), sus métodos de preparación tradicionales incluyen el método de reacción en fase sólida a alta temperatura, el método sol-gel y el método hidrotermal, etc., que tienen sus propias características y son adecuados para diferentes escenarios de aplicación, como la producción de polvo de tungsteno, la preparación de fotocatalizadores, etc.

El método de reacción en fase sólida a alta temperatura es el método tradicional más común en la industria, que generalmente utiliza paratungstato de amonio o ácido tungstico como materia prima y calcinas y se descompone a alta temperatura para producir óxido de tungsteno. Este método es simple y tiene un alto rendimiento, que es adecuado para la producción a gran escala de materiales precursores de metales de tungsteno, pero las partículas del producto son grandes (a escala micrométrica) y tienen un área de superficie específica baja. El método sol-gel prepara óxido de tungsteno por reacción química en solución, y la materia prima es principalmente tungstato de sodio u óxido de tungsteno, y el producto se obtiene mediante tratamiento térmico después de la solización y gelificación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Este método puede preparar óxido de tungsteno a nanoescala con partículas uniformes, lo cual es adecuado para aplicaciones de alta precisión, pero el proceso es complejo y el costo es alto.

El método hidrotermal es otro método de preparación tradicional, que utiliza un entorno de solución acuosa a alta temperatura y alta presión para sintetizar óxido de tungsteno en una caldera de reacción utilizando metatungstato de amonio o tungstato como materias primas. Este método puede generar óxido de tungsteno con morfologías especiales como nanovarillas y nanoláminas, y la forma cristalina es controlable (como la forma cristalina hexagonal o monoclinica), que se usa ampliamente en fotocatalizadores y materiales sensores. El método hidrotermal tiene las ventajas de una alta pureza y control de morfología, pero el tiempo de reacción es más largo y los requisitos del equipo son mayores.

En la práctica, la elección de los métodos de preparación tradicionales depende de la naturaleza y el uso del producto objetivo. Los laboratorios prefieren los métodos sol-gel e hidrotermales para preparar productos de tungsteno de alto rendimiento. El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno ha sentado las bases para su industrialización y funcionalización, y cada uno tiene sus propias ventajas y limitaciones.

### 6.1.1 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de reacción en fase sólida a alta temperatura

El método de reacción en fase sólida a alta temperatura es uno de los métodos más tradicionales y ampliamente utilizados para la preparación de óxido de tungsteno, que es conocido por su proceso simple, bajo costo y alto rendimiento. Tomando el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ) como ejemplo, este método se usa comúnmente en la producción industrial de alambre de tungsteno y precursores metálicos de tungsteno mediante la calcinación de materias primas que contienen tungsteno a altas temperaturas para descomponerlas u oxidarlas y formar óxido de tungsteno.

Las materias primas típicas para este método incluyen paratungstato de amonio (APT) y ácido tungstálico. Tomando como ejemplo el paratungstato de amonio, se calcina a 500–700 ° C en el aire y se descompone en trióxido de tungsteno, y la reacción es:  $(NH_4)_{10}(H_2W_{12}O_{42}) \cdot 4H_2O \rightarrow 12WO_3 + 10NH_3 + 7H_2O$ . El óxido de tungsteno resultante es en su mayoría forma de cristal monoclinico, con un tamaño de partícula entre 1 y 10  $\mu m$ , y el color es amarillo (es decir, óxido de tungsteno amarillo). Si se calcina en una atmósfera reductora de hidrógeno, el óxido de tungsteno azul ( $WO_2$ ) puede generarse, u óxido de tungsteno púrpura, el contenido de vacantes de oxígeno varía con la temperatura y la atmósfera (consulte Tungsten Research). El ácido tungstico se descompone directamente en óxido de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a 600–800 ° C, y la reacción es:  $\text{H}_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , el producto es de alta pureza, pero las partículas son gruesas.

La ventaja del método de reacción en fase sólida a alta temperatura es que el equipo es simple (por ejemplo, un horno de mufla es suficiente), lo que es adecuado para la producción a gran escala. La temperatura de calcinación y el tiempo de retención son parámetros clave, por ejemplo, el óxido de tungsteno con alta cristalinidad se puede obtener manteniéndolo a 600 ° C durante 2 horas, mientras que el crecimiento excesivo del grano puede ocurrir por encima de 800 ° C. El control de la atmósfera también es crucial, con atmósferas oxidantes (por ejemplo, aire) que generan trióxido de tungsteno y atmósferas reductoras (por ejemplo, mezclas de  $\text{H}_2/\text{N}_2$ ) que generan óxido de tungsteno entero. Este método es ampliamente utilizado en el procesamiento de compuestos de tungsteno extraídos de wolframita o scheelita.

Sin embargo, las limitaciones de este método son que el producto tiene un tamaño de partícula grande y una superficie específica baja (normalmente  $< 10 \text{ m}^2/\text{g}$ ), lo que lo hace inadecuado para aplicaciones que requieren una alta actividad, como los fotocatalizadores. CTIA GROUP LTD mejora la calidad del óxido de tungsteno en empresas de tungsteno optimizando las condiciones de calcinación, como el aumento de temperatura del gradiente. El método de reacción en fase sólida a alta temperatura es la piedra angular de la preparación industrial de óxido de tungsteno, que es simple y eficiente, pero tiene un control de morfología limitado.

### 6.1.2 Método tradicional de preparación del método sol-gel de óxido de tungsteno/método de preparación sol-gel de óxido de tungsteno

El método sol-gel es un método tradicional para la preparación de óxido de tungsteno mediante la reacción química de la solución, y es conocido por su capacidad para producir óxido de tungsteno a nanoescala y de alta pureza. El trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), por ejemplo, es un método que genera partículas homogéneas o películas delgadas a través de etapas de formación de sol, gelificación y tratamiento térmico, adecuado para fotocatalizadores, sensores y materiales electrocrómicos.

Las materias primas típicas para este método incluyen tungstato de sodio y alcóxidos de tungsteno (por ejemplo, etanol de tungsteno). Tomando tungstato de sodio como ejemplo, primero disuélvalo en agua, agregue ácido (como  $\text{HCl}$ ) para ajustar el pH a 1–2 e hidrolice el tungstato de sodio para formar sol de ácido tungstónico, la reacción es:  $\text{Na}_2\text{WO}_4 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{WO}_4 + 2\text{NaCl}$ . El sol se agrega gradualmente en un gel bajo agitación o reposo, seguido de un secado (100–150 ° C) y un tratamiento térmico (400–600 ° C) para generar óxido de tungsteno. La

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mayoría de los productos obtenidos son formas cristalinas monoclinicas, el tamaño de partícula se puede controlar a 10-50 nm y el área de superficie específica es tan alta como 50-100 m<sup>2</sup> / g. El alcóxido de tungsteno se forma directamente por alcoholización y policondensación, y el óxido de tungsteno se forma después del tratamiento térmico, que es de mayor pureza pero mayor costo.

La ventaja del método sol-gel es que las partículas del producto son pequeñas y homogéneas, y la morfología se puede manipular mediante la adición de un agente plantilla (por ejemplo, surfactante), por ejemplo, para la preparación de óxido de tungsteno poroso o películas delgadas. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno para electrocrómico se pueden preparar hilando geles sobre sustratos de vidrio con espesores de hasta el nivel nanométrico. La temperatura y el tiempo del tratamiento térmico son parámetros clave, 500 ° C durante 2 horas puede producir una cristalinidad moderada del óxido de tungsteno, mientras que una temperatura demasiado alta (por ejemplo, 800 ° C) puede causar el crecimiento del grano. La atmósfera suele ser aire, pero una atmósfera inerte (por ejemplo, N<sub>2</sub>) reduce las impurezas.

Las limitaciones de este método son que el proceso es complejo, el ciclo es largo y el costo de las materias primas es alto, por lo que no es adecuado para la producción industrial a gran escala. En el laboratorio, el método sol-gel se utiliza a menudo para preparar óxido de nano-tungsteno, por ejemplo, mediante un compuesto de plástico de tungsteno para mejorar el rendimiento. El método sol-gel es la opción tradicional para la preparación de alta precisión de óxido de tungsteno, que combina flexibilidad y delicadeza.

### 6.1.3 Método tradicional de preparación de óxido de tungsteno - método hidrotermal

El método hidrotermal es un método tradicional para preparar óxido de tungsteno utilizando un entorno de solución acuosa a alta temperatura y alta presión, que es conocido por su capacidad para generar productos de morfología especial y alta cristalinidad. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), este método prepara el óxido de tungsteno en forma de nanovarillas, nanoláminas o nanoflores haciendo reaccionar precursores que contienen tungsteno en una caldera de reacción cerrada, que se usa ampliamente en fotocatalizadores y materiales de baterías.

Las materias primas típicas para el proceso hidrotermal incluyen metatungstato de amonio y [tungstato de sodio]. Tomando el metatungstato de amonio como ejemplo, disuélvalo en agua, agregue ácido (como HNO<sub>3</sub>) para ajustar el pH a 2-4, forme una solución precursora y reaccione a 150-200 ° C y alta presión (1-5 MPa)

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante 12-24 horas para generar óxido de tungsteno. La reacción es:  $(\text{NH}_4)_5\text{H}_5[\text{H}_2(\text{WO}_4)_6] \rightarrow \text{WO}_3 + \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . El óxido de tungsteno resultante es en su mayoría hexagonal, y su morfología puede modificarse mediante la adición de agentes directores de estructura (por ejemplo, CTAB), como la generación de nanovarillas con un diámetro de 20-50 nm. El tungstato de sodio forma óxido de tungsteno monoclinico en condiciones similares y las partículas son más uniformes.

Las ventajas del método hidrotermal son que la forma cristalina y la morfología son controlables, el área superficial específica del producto es alta (50-150  $\text{m}^2/\text{g}$ ) y la cristalinidad es buena. La temperatura de reacción, el tiempo y el pH son parámetros clave, por ejemplo, las nanovarillas cristalinas hexagonales se pueden obtener mediante una reacción a 180 ° C durante 24 horas, mientras que el óxido de tungsteno amorfo puede formarse mediante una reacción corta a 120 ° C. La presión se autogenera a través del reactor, acelerando la nucleación y el crecimiento. El entorno de alta presión también reduce las vacantes de oxígeno y garantiza la pureza del producto. Si se requiere óxido de tungsteno azul o morado, se puede añadir un agente reductor (por ejemplo,  $\text{NaBH}_4$ ) al tratamiento posterior.

Las limitaciones de este método son los altos requisitos de equipo (por ejemplo, reactores de alta presión) y el largo ciclo de reacción, lo que lo hace inadecuado para la producción a gran escala. Industrialmente, el método hidrotermal se utiliza principalmente para preparar óxido de tungsteno de alto valor agregado, tales como: Compuestos de tungstato de calcio. CTIA GROUP LTD mejora el óxido de tungsteno optimizando las condiciones hidrotermales del rendimiento de los productos químicos de tungsteno. El método hidrotermal es una herramienta tradicional para la nanofabricación de óxido de tungsteno, que tiene alta calidad y diversidad.

#### 6.1.4 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno - método de tungstato de amonio

El método de tungstato de amonio es uno de los métodos tradicionales para la preparación de óxido de tungsteno, que se usa ampliamente en la industria y el laboratorio debido a su fácil disponibilidad de materias primas y tecnología madura. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), este método genera óxido de tungsteno a través de la conversión química o el tratamiento térmico del tungstato de amonio, que a menudo se usa como material precursor para la producción de polvo de tungsteno y alambre de tungsteno.

El método de tungstato de amonio generalmente utiliza paratungstato de amonio

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(APT) o metatungstato de amonio como materias primas. Tomando el paratungstato de amonio como ejemplo, reacciona con ácidos (como el HCl) en solución para formar un precipitado de ácido tungstico insoluble, que luego se convierte en óxido de tungsteno mediante tratamiento térmico. El proceso típico es: el paratungstato de amonio se disuelve en agua, se agrega ácido clorhídrico para ajustar el pH a 2-3 para generar ácido tungstálico y la reacción es:  $(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}) \cdot 4\text{H}_2\text{O} + 10\text{HCl} \rightarrow 12\text{H}_2\text{WO}_4 + 10\text{NH}_4\text{Cl}$ . Posteriormente, el ácido tungstico se calcina a 400-600 ° C para descomponerse en óxido de tungsteno:  $\text{H}_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . El óxido de tungsteno obtenido es en su mayoría de tipo cristal monoclinico, con un tamaño de partícula de 1-5 μm, color amarillo brillante y alta pureza.

La ventaja de este método es que el proceso es sencillo y las materias primas están ampliamente disponibles, como los compuestos de tungsteno extraídos de la wolframita o la scheelita. La acidez, la temperatura de reacción y las condiciones de calcinación son parámetros clave, por ejemplo, un pH demasiado bajo puede provocar la precipitación de impurezas, y una temperatura de calcinación demasiado alta (por ejemplo, 800 ° C) puede provocar el crecimiento del grano. El metatungstato de amonio reacciona más rápido en condiciones similares, porque su estructura molecular es más fácil de descomponer y es adecuado para la preparación de óxido de tungsteno de grano fino. Si se requiere óxido de tungsteno azul, el producto se puede tratar en una atmósfera reductora (por ejemplo, H<sub>2</sub>).

La limitación del método de tungstato de amonio es que el producto tiene un tamaño de partícula grande y una superficie específica baja (5-20 m<sup>2</sup>/g), lo que no es adecuado para aplicaciones de alta actividad. El método de tungstato de amonio es un proceso clásico para la preparación tradicional de óxido de tungsteno, que tiene alta eficiencia y economía.

#### 6.1.5 Método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de descomposición del ácido clorhídrico del tungstato

El método de descomposición del ácido clorhídrico del tungstato es un método químico húmedo tradicional para la preparación de óxido de tungsteno, que es conocido por su alta pureza y controlabilidad. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), este método hace reaccionar el tungstato (como el tungstato de sodio) con ácido clorhídrico para producir óxido de tungsteno o sus precursores, que a menudo se usa en laboratorios y campos de química fina.

El proceso típico de este método es el siguiente: el tungstato de sodio se disuelve en agua, la concentración suele ser de 0,1-0,5 mol/L, el ácido clorhídrico (1-2 mol/L) se añade lentamente, el pH se ajusta a 1-2 y se genera

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el precipitado de ácido tungstico, y la reacción es:  $\text{Na}_2\text{WO}_4 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{WO}_4 + 2\text{NaCl}$ . Después del lavado y la filtración, el ácido tungstico se calcina y se descompone en óxido de tungsteno a 400–600 ° C:  $\text{H}_2\text{WO}_4 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ . La mayor parte del óxido de tungsteno obtenido es en forma de cristal monoclinico, el tamaño de partícula es de 0,5–2  $\mu\text{m}$  y la pureza puede alcanzar más del 99%. Si se requiere óxido de tungsteno a nanoescala, se puede agregar un surfactante (por ejemplo, CTAB) a la reacción para controlar el tamaño de partícula a 50–100 nm.

Las ventajas del método de descomposición del ácido clorhídrico del tungstato son que el producto es de alta pureza y partículas finas, lo que es adecuado para la preparación de productos químicos de tungsteno de alta calidad. Las condiciones de reacción son críticas, por ejemplo, un pH demasiado bajo (<1) puede conducir a la formación de heterofases, y una temperatura de calcinación demasiado alta (por ejemplo, 700 ° C) puede conducir a la aglomeración de grano. El tungstato de sodio es de amplia fuente y, a menudo, se procesa a partir de tungstato de calcio. Si se trata térmicamente en una atmósfera reductora, el óxido de tungsteno púrpura se puede producir para aplicaciones catalíticas específicas. La concentración de la solución y la aceleración de las gotas también afectan a la morfología de los productos, y la caída lenta puede obtener partículas más uniformes.

La limitación de este método es que hay muchos pasos del proceso y el costo del tratamiento de líquidos residuales es alto, lo que no es adecuado para la producción industrial a gran escala. En el laboratorio, este método se utiliza a menudo para preparar óxido de tungsteno de alta pureza, por ejemplo, como fase de refuerzo en compuestos plásticos de tungsteno. CTIA GROUP LTD mejora la calidad del óxido de tungsteno en las empresas de tungsteno mediante la optimización de los parámetros de reacción. El método de descomposición del ácido clorhídrico del tungstato es una opción de alta pureza para la preparación tradicional del óxido de tungsteno, que es a la vez delicado y controlable.

#### **6.1.6 El método tradicional de preparación de óxido de tungsteno: método de descomposición térmica de paratungstato de amonio**

El método de descomposición térmica del paratungstato de amonio es un proceso tradicional a alta temperatura para la preparación de óxido de tungsteno, que es ampliamente utilizado por su franqueza y aplicabilidad industrial. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), este método descompone el paratungstato de amonio (APT) para generar óxido de tungsteno a altas temperaturas, que es la principal forma de producir tungsteno metálico y precursores de alambre de [tungsteno](#) en la industria.

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

El flujo del proceso es el siguiente: el paratungstato de amonio se coloca en un horno de mufla, se calcina a 500-700 ° C en el aire durante 2-4 horas, se descompone en óxido de tungsteno, y 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 óxido de tungsteno resultante es monoclinico con un tamaño de partícula de 1-10  $\mu\text{m}$  y un color amarillo brillante (es decir, óxido de tungsteno amarillo). Si se calcina en una atmósfera de hidrógeno, se forma óxido de tungsteno azul ( $\text{WO}_2$ ) u óxido de tungsteno púrpura, el contenido de vacante de oxígeno aumenta con la temperatura y el tiempo de reducción. El paratungstato de amonio generalmente se extrae de la scheelita y tiene productos de descomposición estables y de alta pureza.

Las ventajas de este método son que el proceso es simple, los requisitos de equipo son bajos (por ejemplo, calcinadores ordinarios) y es adecuado para la producción a gran escala. La temperatura de calcinación y la atmósfera son parámetros clave, por ejemplo, el óxido de tungsteno de alta cristalinidad se genera en el aire a 600 ° C y el óxido de tungsteno entero se forma en hidrógeno a 800 ° C. El tiempo de retención afecta el tamaño de las partículas, ya que las partículas finas se forman en un período corto (1 hora) y los granos crecen en un período largo (4 horas). La pureza y el contenido de humedad de la materia prima también afectan la calidad del producto, y se puede obtener un 99,9% de óxido de tungsteno a partir de paratungstato de amonio de alta pureza.

La limitación es que el producto tiene partículas grandes y una superficie específica baja (2-10  $\text{m}^2/\text{g}$ ), lo que lo hace inadecuado para aplicaciones nanométricas. Industrialmente, el óxido de tungsteno de CTIA GROUP LTD está optimizado por el calentamiento por gradiente y el rendimiento del precio del tungsteno de control de atmósfera. La descomposición térmica del paratungstato de amonio es la columna vertebral industrial de la preparación tradicional de óxido de tungsteno, que es eficiente y económica.

## 6.2 Nuevos métodos de preparación del óxido de tungsteno

El nuevo método de preparación de óxido de tungsteno es una tecnología avanzada desarrollada sobre la base de la tecnología tradicional, con el objetivo de preparar óxido de tungsteno de alto rendimiento con una morfología especial para satisfacer las necesidades de la ciencia y la tecnología modernas. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), una forma común de óxido de tungsteno, los nuevos métodos incluyen la deposición de vapor, la deposición asistida por microondas y la deposición electroquímica, que prestan más atención a la nano y la funcionalización que los métodos tradicionales.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La deposición de vapor (por ejemplo, deposición química de vapor, CVD) es la descomposición y deposición de óxido de tungsteno en un sustrato de alta temperatura por un precursor gaseoso de tungsteno (por ejemplo,  $WF_6$ ), y se usa comúnmente en la preparación de películas delgadas o nanocables. Por ejemplo, a 500-700 °C,  $WF_6$  reacciona con el oxígeno para formar una película de óxido de tungsteno con la siguiente reacción:  $WF_6 + 3/2O_2 \rightarrow WO_3 + 3F_2$ . El producto resultante tiene una alta cristalinidad y un espesor controlable a nivel nanométrico, lo que es adecuado para dispositivos electrocrómicos. El método asistido por microondas utiliza el calentamiento por microondas para acelerar la reacción y utiliza ácido tungstico como materia prima para generar rápidamente óxido de nano-tungsteno en solución, el tiempo de reacción se acorta a varios minutos y el área de superficie específica puede alcanzar los 100 m<sup>2</sup> / g.

La deposición electroquímica es la electrólisis de soluciones que contienen tungsteno (por ejemplo, tungstato de sodio) para depositar óxido de tungsteno en electrodos. Por ejemplo, a 1-3 V, los iones de tungstato se reducen en el cátodo y se depositan como una película delgada de óxido de tungsteno con morfología ajustable (por ejemplo, nanoláminas o estructuras porosas), adecuada para electrodos de batería. El nuevo método también puede preparar óxido de tungsteno especial, como el bronce de cesio-tungsteno, que se puede dopar para mejorar las propiedades fototérmicas. Los productos de estos métodos son de alta pureza y morfología diversa, pero el equipo es complejo y el costo es alto.

### 6.2.1 Un nuevo método de preparación para el óxido de tungsteno: método de deposición electroquímica

La deposición electroquímica es un nuevo método para la preparación de óxido de tungsteno, que ha atraído mucha atención en la ciencia moderna de los materiales debido a su alta eficiencia, controlabilidad y diversidad morfológica. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), este método se utiliza para depositar óxido de tungsteno en la superficie del electrodo mediante la electrólisis de una solución que contiene tungsteno, que a menudo se usa para preparar películas delgadas o nanoestructuras, y es adecuada para dispositivos electrocrómicos, electrodos de batería y sensores.

El proceso típico de este método es preparar un electrolito de 0,01-0,1 mol/L utilizando tungstato de sodio o ácido tungstico como materia prima, y añadir ácido (como  $H_2SO_4$ ) para ajustar el pH a 1-3. Bajo un campo eléctrico de corriente continua (1-3 V), los iones de tungstato se reducen en el cátodo y se depositan como óxido de tungsteno con la siguiente reacción:  $WO_4^{2-} + 2H^+ + 2e^- \rightarrow WO_3 + H_2O$ . El óxido de tungsteno resultante es en su mayoría forma cristalina monoclinica, y su morfología puede modificarse mediante condiciones electrolíticas, como bajo

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

voltaje (1 V) para formar películas delgadas densas y alto voltaje (3 V) para generar estructuras porosas. Después de la deposición, generalmente se trata térmicamente a 300–500 ° C para mejorar la cristalinidad y la estabilidad.

Las ventajas de la deposición electroquímica son que el proceso es simple, la topografía es controlable y las películas de óxido de tungsteno se pueden generar directamente sobre sustratos conductores como el vidrio ITO. La concentración de electrolito, el voltaje y el tiempo de deposición son parámetros clave, por ejemplo, la deposición de tungstato de sodio de 0,05 mol/L a 2 V durante 30 minutos produce una película homogénea con un espesor de aproximadamente 200 nm. Con la adición de una plantilla (por ejemplo, polietilenglicol), se pueden preparar nanovarillas o nanoláminas con una superficie específica de 50–100 m<sup>2</sup>/g. El material del electrodo también influye en el producto, por ejemplo, el óxido de tungsteno depositado en un electrodo de cobre y tungsteno es más conductor.

La limitación de este método es que tiene un bajo rendimiento, que es adecuado para la preparación de alta precisión a pequeña escala, y no es adecuado para la producción industrial en masa. En el laboratorio, la deposición electroquímica se utiliza a menudo para preparar películas delgadas funcionales de productos químicos de tungsteno, por ejemplo, como material de electrodo en baterías para mejorar el rendimiento de los ciclos. La deposición electroquímica es una forma nueva y eficiente de preparar óxido de tungsteno, que es precisa y funcional.

### 6.2.2 Un nuevo método de preparación para el óxido de tungsteno: método de deposición de vapor

La deposición de vapor es un método novedoso avanzado para la preparación de películas delgadas o nanoestructuras de óxido de tungsteno, que sobresale en el campo de los dispositivos optoelectrónicos y la catálisis debido a su alta pureza, alta cristalinidad y compatibilidad con sustratos. El trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>), por ejemplo, se utiliza a menudo para producir recubrimientos de filamentos de tungsteno o películas delgadas fotocatalíticas mediante la descomposición y el depósito de precursores gaseosos de tungsteno a altas temperaturas.

Los procesos típicos de este método incluyen la deposición química de vapor (CVD) y la deposición física de vapor (PVD). En el caso de CVD, el tungsteno metálico o los compuestos de tungsteno (por ejemplo, WF<sub>6</sub>) se utilizan como precursores y se depositan sobre un sustrato (por ejemplo, oblea de silicio) a 400–700 ° C en una atmósfera de oxígeno, con la siguiente reacción:  $WF_6 + 3/2O_2 \rightarrow WO_3 + 3F_2$ . El óxido de tungsteno resultante es una película cristalina monoclinica con un espesor de 10–500 nm y alta cristalinidad. PVD reacciona en oxígeno para formar óxido de tungsteno mediante pulverización catódica del objetivo de polvo de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, que es adecuado para la preparación de películas ultrafinas. Si se requieren nanocables, esto se puede lograr ajustando el flujo de aire y la temperatura (por ejemplo, 600 ° C, baja presión).

Las ventajas del método de deposición de vapor son la alta pureza del producto (>99,9%), la variedad de morfologías (películas delgadas, nanocables, nanopartículas) y la capacidad de controlar con precisión el espesor. La temperatura de deposición, la presión del aire y el flujo de oxígeno son parámetros clave, por ejemplo, 500 ° C, los bajos caudales de oxígeno generan películas densas y las altas temperaturas y los altos caudales generan estructuras porosas. Si se dopa con tungstato de calcio, se puede mejorar el rendimiento fotocatalítico. La elección del sustrato también es importante, por ejemplo, el óxido de tungsteno depositado sobre un sustrato [de cobre de tungsteno] es más conductor.

Las limitaciones de este método son que el equipo es complejo (por ejemplo, sistemas de vacío), el costo es alto y no es adecuado para la producción en masa. Industrialmente, la deposición de vapor se utiliza principalmente para aplicaciones de alto valor agregado, como la preparación de recubrimientos fotoeléctricos en el mercado del tungsteno. CTIA GROUP LTD mejora la calidad del óxido de tungsteno en las empresas de tungsteno mediante la optimización de las condiciones de deposición. La deposición de vapor es un nuevo proceso de precisión para la preparación de óxido de tungsteno, que es adecuado para campos de alta tecnología.

### 6.2.3 Un nuevo método de preparación de óxido de tungsteno: método de molde biológico

El método de bioplantilla es un nuevo método emergente para la preparación de óxido de tungsteno utilizando estructuras biológicas naturales, que ha atraído mucha atención en el campo de los nanomateriales debido a su protección ambiental y morfología única. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), este método guía la deposición y transformación de precursores de tungsteno a través de plantillas biológicas (como bacterias y fibras vegetales) para generar una estructura porosa o compleja de óxido de tungsteno, que es adecuada para fotocatalizadores y materiales de almacenamiento de energía.

El proceso típico de este método es el siguiente: se utiliza tungstato de sodio o metatungstato de amonio como fuente de tungsteno, se prepara una solución de 0,1-0,5 mol/L y se sumerge en ella una plantilla biológica (como celulosa o proteína) para adsorber iones de tungsteno en la superficie de la plantilla. Posteriormente, mediante tratamiento térmico (400-600 ° C) o reacción hidrotermal

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(150–200 ° C), la plantilla se descompone y genera óxido de tungsteno. Por ejemplo, se utiliza una plantilla de celulosa bacteriana para calcinar a 500 ° C después de 12 horas de calor de agua a 180 ° C para obtener óxido de tungsteno poroso con un tamaño de poro de 20–100 nm y una superficie específica de 80–150 m<sup>2</sup>/g. El óxido de tungsteno obtenido es en su mayoría monoclinico o en forma de cristal hexagonal, y la morfología hereda la estructura de la plantilla.

Las ventajas del método de plantilla biológica son que es respetuoso con el medio ambiente y el producto tiene una morfología única (por ejemplo, poroso, reticulado), que es adecuado para aplicaciones de alta actividad. El tipo de plantilla y las condiciones de reacción son clave, por ejemplo, las fibras vegetales generan estructuras macroporosas y las plantillas bacterianas generan poros a nanoescala. Si se añade un agente reductor (por ejemplo, glucosa), se puede preparar óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno morado. La temperatura del tratamiento térmico afecta a la conservación de los poros, y una temperatura demasiado alta (por ejemplo, 800 ° C) puede destruir la estructura porosa. La concentración de la solución y el tiempo de impregnación también afectan la carga de tungsteno, y se puede obtener óxido de tungsteno de alta pureza después de la optimización. La limitación de este método es que la preparación de la plantilla es compleja y el rendimiento es bajo, lo que no es adecuado para la producción a escala industrial. En el laboratorio, el método de bioplantilla se utiliza a menudo para preparar catalizadores a base de plástico de tungsteno para mejorar el rendimiento fotocatalítico.

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD 黄色钨氧化物

## Capítulo VII Equipo de producción de óxido de tungsteno

### 7.1 El equipo principal para la producción de óxido de tungsteno.

La producción de óxido de tungsteno implica múltiples pasos de proceso, y su equipo principal es la clave para lograr el proceso desde el procesamiento de la materia prima hasta la preparación del producto terminado. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno, una forma común de óxido de tungsteno, el equipo principal incluye equipos de procesamiento de materias primas, equipos de reacción y equipos de posprocesamiento, que trabajan juntos para garantizar la eficiencia de la producción y la calidad del producto, y son ampliamente utilizados en la producción industrial de polvo de tungsteno y alambre de tungsteno.

El equipo de manipulación de materias primas es el primer paso en la producción y se utiliza para convertir minerales como la wolframita o la scheelita en estados granulares o de solución adecuados para reacciones posteriores. Incluye principalmente trituradoras, molinos y equipos de cribado para triturar, clasificar y purificar materias primas. Por ejemplo, una trituradora de mandíbula tritura el mineral hasta el nivel de centímetros, y un molino de bolas lo muele aún más hasta el nivel de micras, asegurando que las partículas de materia prima sean uniformes y convenientes para la lixiviación o calcinación posterior. Estos equipos deben ser resistentes al desgaste y tener una alta capacidad de procesamiento para hacer frente al mineral de tungsteno más duro.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los equipos de reacción son el corazón de la producción de óxido de tungsteno y se utilizan para la conversión química o la descomposición térmica. Tomando como ejemplo el método de descomposición térmica del paratungstato de amonio, el horno de mufla o el horno rotatorio calcina la materia prima a 500–700 ° C para generar óxido de tungsteno. El horno de mufla es adecuado para la producción de lotes pequeños, con precisión de control de alta temperatura ( $\pm 5$  ° C); El horno rotatorio es adecuado para la producción continua, con una producción de hasta tonelaje. Para la producción de óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura, debe estar equipado con un dispositivo de reducción de hidrógeno para controlar la atmósfera y la temperatura. El proceso húmedo utiliza un reactor, como una planta de lixiviación ácida o disolución de álcalis, para convertir el ácido tungstico en un precursor de óxido de tungsteno.

El equipo de posprocesamiento se utiliza para la refinación y formación de óxido de tungsteno, incluidos hornos de secado, máquinas de cribado y prensas. El horno de secado seca el óxido de tungsteno preparado en húmedo hasta convertirlo en polvo a una temperatura de 100–200 ° C para evitar la aglomeración. La máquina de cribado separa el óxido de tungsteno con diferentes tamaños de partícula para satisfacer las diversas necesidades del mercado del tungsteno. Las prensas, por otro lado, presionan el polvo en grumos para facilitar el transporte o el procesamiento posterior.

### 7.1.1 Equipos de manipulación de materias primas

El equipo de manejo de materias primas es el primer paso en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para procesar minerales o compuestos que contienen tungsteno en formas adecuadas para reacciones posteriores. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, el equipo de procesamiento de materias primas incluye equipos de trituración y molienda, equipos de cribado y clasificación y equipos auxiliares, que se utilizan para procesar materias primas como la scheelita o el paratungstato de amonio para garantizar que el tamaño de partícula y la pureza cumplan con los requisitos del proceso.

El equipo de trituración y molienda se encarga de triturar el mineral en bruto o las partículas gruesas a medida. Por ejemplo, una trituradora de mandíbula tritura wolframita a 5–10 cm, una trituradora de martillos la reduce aún más a 1–2 cm, y luego un molino de bolas o un molino de barras la muele a 50–200  $\mu$ m. Este proceso de trituración y molienda por etapas mejora la eficiencia de la lixiviación posterior, ya que las partículas finas aumentan el área de superficie y promueven reacciones químicas. El equipo debe estar hecho de acero o cerámica resistente al desgaste para resistir la alta dureza del mineral de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(dureza de Mohs 5-7). Para las materias primas químicas como el tungstato, la necesidad de molienda es baja y, por lo general, solo se requiere una molienda ligera.

El equipo de cribado y clasificación se utiliza para separar materias primas con diferentes tamaños de partícula y mejorar la calidad del producto. Una criba vibratoria o un clasificador de aire clasifican las partículas molidas por tamaño, por ejemplo,  $< 100 \mu\text{m}$  de polvo fino para la hidrometalurgia y  $100 \mu\text{m}$  de polvo grueso  $>$  devuelven para la molienda. En los procesos húmedos, un tanque de sedimentación o centrífuga clasifica las partículas en la suspensión para garantizar la homogeneidad. Para la producción de óxido de tungsteno a nanoescala, debe estar equipado con equipos de cribado ultrafinos (como tamices ultrasónicos) con una precisión de  $10\text{-}50 \mu\text{m}$ . Estos dispositivos tienen un impacto directo en la distribución de partículas de productos químicos de tungsteno.

Los equipos auxiliares incluyen cintas transportadoras, colectores de polvo y silos de almacenamiento. Las cintas transportadoras transportan las materias primas a cada proceso, y los colectores de polvo (como los filtros de bolsa) recogen el polvo generado por la molienda para garantizar la seguridad medioambiental. El almacenamiento de materias primas procesadas oscila entre unas pocas toneladas y decenas de toneladas. CTIA GROUP LTD ha mejorado la eficiencia de producción de óxido de tungsteno en empresas de tungsteno mediante la optimización del equipo de manejo de materias primas. El equipo de manejo de materias primas es la piedra angular de la producción de óxido de tungsteno, lo que garantiza que el proceso posterior se desarrolle sin problemas.

#### 7.1.1.1 Equipos de trituración y molienda

El equipo de trituración y molienda es el equipo central para el procesamiento de materias primas en la producción de óxido de tungsteno, y se utiliza para triturar minerales que contienen tungsteno o partículas gruesas a un tamaño adecuado para el procesamiento posterior. Tomando como ejemplo la producción de óxido de tungsteno, estos equipos procesan materias primas duras como la wolframita o la scheelita para proporcionar partículas finas para la lixiviación húmeda o la descomposición térmica, que es una parte importante de la producción de metal de tungsteno y polvo de tungsteno.

El equipo de trituración incluye principalmente trituradora de mandíbula, trituradora de cono y trituradora de martillos. La trituradora de mandíbula es la principal fuerza de trituración primaria, triturando mineral de  $50\text{-}100 \text{cm}$  a  $5\text{-}10 \text{cm}$ , con una capacidad de procesamiento de  $100\text{-}500 \text{t/h}$ , adecuada para mineral de tungsteno con alta dureza (dureza de Mohs 5-7). La trituradora de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cono se utiliza para la trituración secundaria, reduciendo las partículas a 1-3 cm con una alta relación de trituración y adecuada para la producción continua. La trituradora de martillos es adecuada para compuestos de tungsteno más blandos (como el tungstato de calcio), que se pueden triturar a 1-2 cm a la vez, con una estructura simple pero alta resistencia al desgaste. La placa de revestimiento del equipo está hecha principalmente de acero al manganeso o aleación con alto contenido de cromo para prolongar la vida útil.

El equipo de molienda incluye molinos de bolas, molinos de barras y molinos vibratorios. El molino de bolas es el equipo más utilizado, moliendo las partículas trituradas a 50-200  $\mu\text{m}$ , el medio de molienda son bolas de acero o bolas de cerámica, y la velocidad y la relación pellet-material (por ejemplo, 10: 1) afectan la finura de las partículas. El molino de barras es adecuado para la molienda húmeda y el tamaño del producto es uniforme (100-300  $\mu\text{m}$ ), lo que a menudo se usa en la preparación antes de la hidrometalurgia. Los molinos vibratorios se utilizan para la molienda ultrafina de hasta 10-50  $\mu\text{m}$ , que es adecuada para la preparación de óxido de tungsteno a nanoescala, pero el consumo de energía es alto. Los revestimientos de molinos requieren materiales resistentes al desgaste, como la alúmina, para reducir la contaminación.

La elección del equipo de trituración y molienda depende de la naturaleza de la materia prima y del tamaño de partícula objetivo. Por ejemplo, la producción de plástico de tungsteno requiere partículas ultrafinas y se prefieren los molinos vibratorios; Los molinos de bolas se utilizan principalmente a escala industrial. El equipo de trituración y molienda es la columna vertebral del tratamiento de materias primas de óxido de tungsteno, lo que afecta directamente el efecto del proceso posterior.

#### 7.1.1.2 Equipos de cribado y clasificación

El equipo de cribado y clasificación es una parte importante del procesamiento de materias primas en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para separar las partículas trituradas y molidas y garantizar que la distribución del tamaño de partícula cumpla con los requisitos del proceso. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos procesan paratungstato de amonio o polvo de mineral para proporcionar una materia prima homogénea para reacciones posteriores, que es un paso crítico en la preparación de productos químicos de tungsteno y filamentos de tungsteno.

El equipo de cribado incluye principalmente cribas vibratorias, cribas de trómel y cribas ultrasónicas. Las cribas vibratorias son el equipo más utilizado, donde las partículas se dividen en diferentes grados por medio de cribas multicapa

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(tamaño de poro de 10  $\mu\text{m}$ -5 mm), por ejemplo, < finos de 100  $\mu\text{m}$  se tamizan para hidrometalurgia y los polvos gruesos de 200  $\mu\text{m}$  > se devuelven para la molienda. La frecuencia de las vibraciones (1000-3000 vibraciones/min) y el material de la pantalla (por ejemplo, acero inoxidable) afectan a la eficiencia de la separación. Las cribas de trómel son adecuadas para el cribado de grandes volúmenes con una capacidad de 50-200 t/h, y se utilizan a menudo en la producción industrial de precursores de polvo de tungsteno. Los tamices ultrasónicos se utilizan para partículas ultrafinas (<50  $\mu\text{m}$ ) y son adecuados para la preparación de óxido de nanotungsteno mediante vibración ultrasónica para evitar obstrucciones.

El equipo de clasificación incluye clasificadores de flujo de aire y centrifugas. El clasificador de aire utiliza el flujo de aire para separar las partículas por tamaño, por ejemplo, a una velocidad del viento de 10-100 m/s, separando polvo fino de 20-50  $\mu\text{m}$ , que es adecuado para la producción de óxido de tungsteno de alta pureza. Las centrifugas se utilizan para la clasificación en húmedo, donde la fuerza centrífuga (500-2000 g) se utiliza para separar partículas en suspensión, a menudo en combinación con molienda húmeda, con un rango de clasificación de 10-300  $\mu\text{m}$ . Estos dispositivos garantizan un tamaño de partícula uniforme y mejoran la eficiencia de conversión de tungstato.

El rendimiento de los equipos de cribado y clasificación tiene un impacto directo en la calidad del producto. Por ejemplo, las partículas demasiado finas pueden aumentar las pérdidas de polvo, mientras que las partículas demasiado gruesas pueden reducir la eficiencia de la reacción. CTIA GROUP LTD OPTIMIZA LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS DE ÓXIDO DE TUNGSTENO EN PRODUCTOS DE TUNGSTENO MEDIANTE LA INTEGRACIÓN DE EQUIPOS DE CRIBADO Y CLASIFICACIÓN DE ALTA EFICIENCIA. Los equipos de cribado y clasificación son una garantía importante para la producción de óxido de tungsteno, ya que garantizan la calidad de las materias primas y la estabilidad del proceso.

### 7.1.2 Equipo de reacción

El equipo de reacción es el equipo central en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para realizar la transformación química o física de materias primas a óxido de tungsteno. Tomando el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) como ejemplo, el equipo de reacción incluye equipos de hidrólisis alcalina y acidólisis, equipos de calcinación y descomposición térmica y dispositivos de reacción auxiliares, que son ampliamente utilizados en la producción industrial de polvo de tungsteno y alambre de tungsteno para garantizar la alta eficiencia del proceso y la calidad del producto.

Los equipos de hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida se utilizan en

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hidrometalurgia para convertir minerales como la wolframita o la scheelita en compuestos solubles de tungsteno o ácido tungstónico. El equipo de hidrólisis alcalina (como el reactor de alta presión) trata el mineral con hidróxido de sodio a alta temperatura y alta presión para generar tungstato de sodio, que es adecuado para tratar minerales insolubles. El equipo de acidólisis (como el tanque de reacción resistente a los ácidos) utiliza ácido clorhídrico o ácido nítrico para lixiviar el ácido tungstólico, que es adecuado para el tungstato de calcio y otras materias primas. Estas máquinas deben estar fabricadas con materiales resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable o el esmalte, y están equipadas con sistemas de mezcla y calentamiento con capacidades que van desde decenas de litros hasta varias toneladas.

Los equipos de calcinación y pirólisis se utilizan para convertir precursores como el paratungstato de amonio o el ácido tungstico en óxido de tungsteno. El horno de mufla es adecuado para la producción de lotes pequeños, con un control de temperatura de 400–800 °C y una precisión de  $\pm 5$  °C, adecuado para la preparación de óxido de tungsteno de laboratorio o de alta pureza. Los hornos rotatorios se utilizan para la producción industrial continua, con una longitud de 10–50 metros y una capacidad de varias toneladas por día, que pueden producir óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura en una atmósfera de aire o hidrógeno. Estos dispositivos requieren resistencia a altas temperaturas y sistemas de control de atmósfera para garantizar la uniformidad de la reacción y la cristalinidad del producto.

Las unidades de reacción auxiliares incluyen sistemas de suministro de gas (por ejemplo, tuberías de hidrógeno u oxígeno), agitadores y dispositivos de control de temperatura. El sistema de suministro de gas regula la atmósfera de reacción, por ejemplo, hidrógeno para la reducción de óxido de tungsteno, a un caudal de 0,1–10 m<sup>3</sup>/h. El agitador garantiza que la solución reaccione de manera uniforme y que un dispositivo de control de temperatura (como un termopar) mantenga las condiciones de reacción. El equipo de reacción es el núcleo técnico de la producción de óxido de tungsteno, lo que afecta directamente la eficiencia de conversión y el rendimiento del producto.

#### 7.1.2.1 Equipos de hidrólisis y acidólisis alcalina

El equipo de hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida es un equipo de reacción clave en el proceso húmedo de producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para convertir materias primas que contienen tungsteno en intermedios solubles o generar directamente precursores de óxido de tungsteno. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos procesan materias primas como la scheelita o el paratungstato de amonio, y realizan la extracción de

tungsteno a través de medios alcalinos o ácidos, que es una parte importante de la preparación de [productos químicos de tungsteno](#).

El equipo de hidrólisis alcalina incluye principalmente un reactor de alta presión y un tanque de agitación atmosférica. El reactor de alta presión se utiliza para procesar minerales insolubles (como la wolframita), y el mineral se descompone con hidróxido de sodio (concentración del 10-20%) a 150-200 ° C y 1-5 MPa para generar [tungstato de sodio], y la reacción es:  $\text{CaWO}_4 + 2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{WO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ . El equipo está fabricado en acero inoxidable resistente a los álcalis (por ejemplo, 316L) con volúmenes que van desde 50 L hasta varios miles de litros, y está equipado con un sistema de sellado y calentamiento de alta presión, mientras que el tanque de agitación atmosférica se utiliza para el ajuste posterior de la solución, y la velocidad de agitación es de 100-500 rpm para garantizar una reacción homogénea. Las plantas de hidrólisis alcalina son adecuadas para procesos de alta recuperación, pero consumen más energía.

La planta de acidólisis incluye un tanque de reacción resistente a los ácidos y una unidad de filtración. El ácido tungstico se lixivia con ácido clorhídrico o ácido nítrico (1-6 mol/L), por ejemplo, a partir de tungstato:  $\text{Na}_2\text{WO}_4 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2\text{WO}_4 + 2\text{NaCl}$ . El tanque está hecho de esmalte o PTFE, altamente resistente a la corrosión, con un volumen de 10-1000 L, equipado con un agitador (50-200 rpm) y un dispositivo de calentamiento (50-100° C). Los dispositivos de filtración (por ejemplo, filtros prensa de placas y marcos) separan los precipitados de ácido tungstico con una capacidad de procesamiento de 1-10 t/h para garantizar la pureza del producto. Si el óxido de tungsteno se va a generar directamente, el ácido tungstico se puede calcinar aún más.

Los equipos de hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida deben seleccionarse de acuerdo con las propiedades de las materias primas. Por ejemplo, la scheelita está mayoritariamente alcalinizada y el tungstato de calcio está acidificado. CTIA GROUP LTD mejora la eficiencia de la producción de óxido de tungsteno en las empresas de tungsteno al optimizar el diseño del equipo, como la adición de una capa resistente a la presión. El equipo de hidrólisis alcalina e hidrólisis ácida es la base del proceso húmedo de óxido de tungsteno, que garantiza la extracción y conversión eficientes del tungsteno.

#### 7.1.2.2 Equipos de calcinación y descomposición térmica

El equipo de calcinación y descomposición térmica es el equipo de reacción central en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para convertir el tratamiento térmico precursor en óxido de tungsteno, que es un eslabón clave en el proceso seco. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estos equipos procesan paratungstato de amonio o ácido tungstico para producir óxido de tungsteno a través de la descomposición a alta temperatura, que se usa ampliamente en la producción de metal de tungsteno y precursores de polvo de tungsteno.

El equipo de calcinación incluye principalmente hornos de mufla y hornos rotatorios. El horno de mufla es adecuado para lotes pequeños o producción de laboratorio, con un rango de temperatura de 300-1000 ° C, una precisión de control de temperatura de  $\pm 5$  ° C y un volumen de 10-500 L. Por ejemplo, el paratungstato de amonio se calcina a 500-700 ° C durante 2-4 horas para producir trióxido de tungsteno:  $(\text{NH}_4)_{10}(\text{H}_2\text{W}_{12}\text{O}_{42}) \cdot 4\text{H}_2\text{O} \rightarrow 12\text{WO}_3 + 10\text{NH}_3 + 7\text{H}_2\text{O}$ . El horno rotatorio se utiliza para la producción industrial continua, con una longitud de 10-50 metros, un diámetro interior de 1-3 metros, una temperatura de 400-800 ° C y una producción de hasta 1-10 t / día. El horno rotatorio está equipado con un accionamiento giratorio (1-5 rpm) y un sistema de control de atmósfera para generar óxido de tungsteno amarillo en el aire y óxido de tungsteno azul o púrpura en hidrógeno.

Los equipos de descomposición térmica requieren materiales resistentes a altas temperaturas (por ejemplo, ladrillos refractarios o aleaciones a base de níquel) y están equipados con una unidad de tratamiento de gases de escape (por ejemplo, depurador) para tratar el  $\text{NH}_3$  o  $\text{H}_2\text{O}$  producido por descomposición. La temperatura y la atmósfera son parámetros clave, por ejemplo, una atmósfera de aire de 600 ° C para producir óxido de tungsteno de alta cristalinidad, una atmósfera de hidrógeno de 800 ° C para producir óxido de tungsteno entero. El tiempo de retención afecta el tamaño de partícula, lo que da como resultado partículas de 1-5  $\mu\text{m}$  en 2 horas y partículas de 10  $\mu\text{m}$  en 4 horas. Si se requiere óxido de tungsteno a nanoescala, se puede combinar con el pretratamiento de secado por pulverización.

El equipo de calcinación y descomposición térmica tiene la ventaja de un proceso simple y un alto rendimiento, pero un alto consumo de energía y un control limitado de partículas. Los equipos de calcinación y descomposición térmica son la columna vertebral del proceso seco de óxido de tungsteno, lo que garantiza una conversión eficiente y la idoneidad industrial.

### 7.1.3 Equipos de separación y purificación

El equipo de separación y purificación es el equipo clave en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para extraer y refinar el óxido de tungsteno o sus precursores de los productos de reacción. Tomando como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), estos equipos incluyen equipos de

separación sólido-líquido y equipos de cristalización y recristalización, que se utilizan ampliamente en hidrometalurgia y procesos secos para garantizar la pureza y la calidad del polvo de tungsteno y los precursores de filamentos de tungsteno.

Los equipos de separación sólido-líquido se utilizan para separar sólidos (por ejemplo, ácido tungstálico) de líquidos (por ejemplo, líquido residual) generados por reacciones. El equipo típico incluye filtros prensa y centrifugas de placa y marco, que filtran suspensiones a una presión (0,5-1 MPa) con una capacidad de 1-10 t/h, adecuadas para la extracción de ácido tungstico del hidrolizado de ácido wolframita. Las centrifugas utilizan la fuerza centrífuga (500-2000 g) para una separación rápida, lo que es adecuado para lotes pequeños de producción de alta pureza. Estos dispositivos deben estar fabricados con materiales resistentes a la corrosión, como el polipropileno o el acero inoxidable, para hacer frente a entornos ácidos y alcalinos. La eficiencia de la separación tiene un impacto directo en la purificación posterior.

Los equipos de cristalización y recristalización se utilizan para purificar compuestos solubles de tungsteno como el tungstato de sodio o el paratungstato de amonio. Al controlar la temperatura (20-80 ° C) y la concentración, el tanque de cristalización permite precipitar compuestos de tungsteno de la solución, como el paratungstato de amonio, que cristaliza cuando se enfría a 30 ° C, con una pureza de hasta el 99,5%. El equipo de recristalización (por ejemplo, cristizador de evaporación) elimina las impurezas a través de la disolución-cristalización múltiple y es adecuado para la producción de óxido de tungsteno de alta pureza. El equipo está equipado con un agitador (50-200 rpm) y un sistema de control de temperatura para garantizar un crecimiento uniforme de los cristales.

El equipo de separación y purificación debe adaptarse al proceso. Por ejemplo, el proceso húmedo de producción de productos químicos de tungsteno se basa en la separación sólido-líquido, mientras que el proceso seco se centra en la cristalización y purificación. Los equipos de separación y purificación son un eslabón clave en la producción de óxido de tungsteno, ya que garantizan la pureza y la recuperación del producto.

### 7.1.3.1 Equipos de separación sólido-líquido

El equipo de separación sólido-líquido es un equipo importante para la separación y purificación en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para extraer productos sólidos de mezclas de reacción. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos procesan la suspensión después

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la acidólisis de scheelita o la hidrólisis alcalina y separan las partículas de ácido tungstico u óxido de tungsteno, que es el paso central en la preparación de precursores de metales de tungsteno.

Los equipos comunes de separación sólido-líquido incluyen filtros prensa de placa y marco, centrífugas y filtros de vacío. El filtro prensa de placas y bastidores presiona los sólidos (como el ácido tungstálico) en la suspensión en una torta de filtración a través de la presión (0,5-1,5 MPa), y el filtrado se descarga, con una capacidad de procesamiento de 1-20 t/h, que es adecuada para la producción a gran escala. Las centrífugas utilizan una rotación de alta velocidad (1000-3000 rpm) para generar fuerza centrífuga (500-2000 g) para separar rápidamente las partículas finas, como el ácido tungstico de las soluciones de tungstato, y son adecuadas para requisitos de alta pureza. El filtro de vacío se filtra por presión negativa (0,01-0,08 MPa), que es adecuada para la producción de laboratorio o lotes pequeños, y la precisión de filtración es de hasta 1-10  $\mu\text{m}$ .

El equipo debe estar fabricado con materiales resistentes a la corrosión, como una tela filtrante de polipropileno o una carcasa de acero inoxidable 316L, para manejar entornos ácidos (p. ej., HCl) o alcalinos (p. ej., NaOH). El tamaño de los poros (5-50  $\mu\text{m}$ ) del medio filtrante (como la tela filtrante o la membrana) afecta el efecto de separación, y es fácil obstruirse si es demasiado fino, y tiene fugas si es demasiado grueso. Es necesario optimizar los parámetros de funcionamiento, como la presión, la velocidad de rotación y el tiempo de filtración, por ejemplo, se puede obtener una torta con un contenido de humedad del < del 20% después de 30 minutos de filtración a 1 MPa. Si se seca, se puede combinar con el proceso de plástico de tungsteno.

La eficiencia de los equipos de separación sólido-líquido afecta directamente a la recuperación de tungsteno. Por ejemplo, las centrífugas pueden recuperar más del 95% de las partículas finas. CTIA GROUP LTD optimiza el proceso de producción de óxido de tungsteno en la empresa de tungsteno equipándola con una planta de separación sólido-líquido de múltiples etapas. El equipo de separación sólido-líquido es la piedra angular del proceso húmedo de óxido de tungsteno, lo que garantiza la extracción eficiente de productos sólidos.

### 7.1.3.2 Equipos de cristalización y recristalización

El equipo de cristalización y recristalización es un equipo clave para la purificación en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para precipitar compuestos de tungsteno de alta pureza a partir de una solución. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos procesan tungstato de sodio o solución de paratungstato de amonio para generar

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cristales puros mediante el control de las condiciones de cristalización, que es una parte importante de la preparación de productos químicos de tungsteno de alta calidad.

El equipo de cristalización incluye un tanque de cristalización y un cristizador de enfriamiento. El tanque de cristalización precipita compuestos de tungsteno por enfriamiento o evaporación, por ejemplo, la solución de paratungstato de amonio se enfría de 80 ° C a 30 ° C para precipitar cristales en forma de aguja con una pureza de hasta el 99,5%. El volumen del tanque es de 50-5000 L, equipado con un agitador (50-200 rpm) y un sistema de control de temperatura para garantizar un crecimiento uniforme de los cristales. El molde de enfriamiento acelera la precipitación mediante la circulación de agua de enfriamiento, que es adecuada para la producción continua con una capacidad de procesamiento de 1-10 t / día. Si se requiere óxido de tungsteno azul, los cristales se pueden tratar térmicamente adicionalmente.

El equipo de recristalización incluye un cristizador de evaporación y un tanque de disolución. El cristizador de evaporación concentra la solución calentándola (50-100 ° C), se recristaliza después de eliminar las impurezas, como la solución de tungstato de sodio que se evapora hasta la saturación, y luego se enfría para precipitar cristales de alta pureza, y la pureza se puede aumentar al 99,9%. El tanque de disolución se utiliza para volver a disolver los cristales primarios, repetir el proceso de cristalización y está equipado con materiales resistentes a la corrosión (por ejemplo, esmalte) y dispositivos de calentamiento. La velocidad de evaporación y la velocidad de enfriamiento son clave, demasiado rápido puede provocar defectos en los cristales y demasiado lento puede provocar ineficiencia.

La ventaja de los equipos de cristalización y recristalización es que el efecto de purificación es notable, pero el consumo de energía es alto y es adecuado para productos de alto valor agregado. El equipo de cristalización y recristalización es una herramienta de precisión para la purificación de óxido de tungsteno, lo que garantiza la calidad del producto.

## 7.2 Equipos auxiliares de producción de óxido de wolframio

El equipo de producción auxiliar de óxido de tungsteno es un dispositivo que soporta el equipo principal y se utiliza para el transporte de materiales, el control ambiental y el procesamiento de productos terminados. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos incluyen equipos de manejo de materiales, equipos de eliminación de polvo y equipos de embalaje para garantizar la continuidad y seguridad de las líneas de producción de metal

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungsteno y polvo de tungsteno.

El equipo de manejo de materiales es responsable del transporte de materias primas, productos intermedios y terminados, incluido el equipo de transporte mecánico (como cintas transportadoras) y el equipo de transporte neumático (como tuberías de flujo de aire) para garantizar que todos los procesos sean perfectos. Los equipos de eliminación de polvo (como los filtros de mangas) recogen el polvo de la molienda o calcinación con una capacidad de procesamiento de 10-100 m<sup>3</sup>/min, lo que cumple con los requisitos de protección del medio ambiente. El equipo de embalaje (como la máquina ensacado automática) llena el polvo de óxido de tungsteno en bolsas o barriles con una eficiencia de 100-500 bolsas / hora, que es adecuado para las diversas necesidades de empaque del mercado de tungsteno.

El dispositivo auxiliar debe coincidir con el dispositivo principal. Por ejemplo, el equipo de transporte debe ser resistente al desgaste y adaptarse a partículas duras como el tungstato de calcio; El equipo de recolección de polvo debe filtrar < polvo de 10 μm de manera eficiente. CTIA GROUP LTD aumenta la eficiencia de producción de óxido de tungsteno en productos de tungsteno mediante la integración de equipos de producción auxiliares. El equipo auxiliar de producción de óxido de tungsteno es la garantía de la línea de producción y optimiza el flujo general del proceso.

### 7.2.1 Equipos de manipulación de materiales

El equipo de manejo de materiales es un equipo importante para la producción auxiliar de óxido de tungsteno, que se utiliza para transportar materias primas, productos intermedios y productos terminados entre varios procesos. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos incluyen equipos de transporte mecánico y equipos de transporte neumático para procesar materiales como la scheelita o el ácido tungstico para garantizar la continuidad de las líneas de producción de productos químicos de tungsteno.

Los equipos de transporte mecánico, como las cintas transportadoras y los transportadores de tornillo, transportan gránulos o polvos desde la trituración hasta los procesos de reacción con una capacidad de transporte de 10-500 t/h, adecuados para la producción en masa. Los equipos de transporte neumático, como las tuberías de flujo de aire, utilizan aire comprimido (0,1-0,5 MPa) para transportar polvos finos (como el polvo de tungsteno), adecuados para la transmisión a larga distancia o cerrada. El equipo de transporte debe estar fabricado con materiales resistentes al desgaste (como correas de goma o tubos de acero inoxidable) para hacer frente a la alta dureza del material de tungsteno. La elección del equipo de manejo de materiales depende de la naturaleza del

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

material y del diseño del proceso. Por ejemplo, los transportadores de tornillo se utilizan para materiales húmedos y los transportadores neumáticos se utilizan para polvos secos. El equipo de manejo de materiales es el enlace entre la producción de óxido de tungsteno y garantiza un proceso sin problemas.

#### 7.2.1.1 Equipos mecánicos de transporte

El equipo de transporte mecánico es el principal equipo auxiliar para el transporte de material en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para el transporte a corta distancia y a gran escala. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos incluyen cintas transportadoras, transportadores de tornillo y elevadores de cangilones, que manejan materiales como wolframita o ácido tungstónico, y son un soporte importante para las líneas de producción de metal de tungsteno.

La cinta transportadora transporta materiales a través de cintas de caucho o poliéster con un ancho de 0,5-2 m, una velocidad de 1-5 m/s y una capacidad de transporte de 50-1000 t/h, adecuada para la transferencia continua de la trituración a la molienda. El transportador de tornillo utiliza un tornillo giratorio para empujar los materiales, con un diámetro de tubería de 0,1-0,5 m y una capacidad de transporte de 1-50 t/h, que es adecuado para materiales húmedos o polvos (como el tungstato). El elevador de cangilones eleva materiales verticalmente con una altura de 5-50 m, lo que es adecuado para escenarios con limitaciones de espacio. El equipo necesita revestimientos resistentes al desgaste (por ejemplo, acero al manganeso) para reducir el desgaste.

Las ventajas del equipo de transporte mecánico son la estructura simple y el fácil mantenimiento, pero no es adecuado para el transporte a larga distancia o de polvo fino. CTIA GROUP LTD está equipado con equipos de transporte mecánico de alta eficiencia para mejorar la eficiencia de producción de óxido de tungsteno en el precio del tungsteno. El equipo de transporte mecánico es un asistente confiable en la producción de óxido de tungsteno y garantiza el flujo de materiales.

#### 7.2.1.2 Equipos de transporte neumático

El equipo de transporte neumático es un equipo auxiliar avanzado para el transporte de materiales en la producción de óxido de tungsteno, que utiliza el flujo de aire para transportar partículas finas. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos incluyen sistemas de transporte neumático de presión positiva y sistemas de transporte neumático de presión negativa, que procesan polvo de tungsteno u óxido de tungsteno púrpura,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que es adecuado para la transmisión cerrada de productos químicos de tungsteno.

El sistema de transporte neumático de presión positiva empuja el material hasta el punto objetivo a través de aire comprimido (0,1-0,5 MPa), con un diámetro de tubería de 50-300 mm, una distancia de transporte de 10-500 m y una capacidad de 1-50 t/h, que es adecuada para el transporte a larga distancia. El sistema de transporte neumático de presión negativa utiliza una bomba de vacío (0,01-0,08 MPa) para succionar el material a una distancia más corta, pero con un mejor control del polvo, lo que lo hace adecuado para laboratorios o entornos limpios. Las tuberías están hechas de acero inoxidable o poliuretano, que son resistentes al desgaste y anti-obstrucción. El equipo de transporte neumático tiene la ventaja de ser hermético y estar libre de fugas de polvo, pero consume más energía y requiere una limpieza regular de la tubería. El equipo de transporte neumático es un soporte eficiente para la producción de óxido de tungsteno y aumenta el nivel de modernización del proceso.

### 7.2.2 Equipos de secado y refrigeración

El equipo de secado y enfriamiento es un equipo auxiliar importante en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para tratar la humedad y la temperatura de los productos de reacción o intermedios. Tomemos como ejemplo el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo), estos equipos incluyen equipos de secado y equipos de enfriamiento, que se utilizan ampliamente en la producción de polvo de tungsteno y alambre de tungsteno para garantizar que el estado físico del material satisfaga las necesidades de procesamiento o almacenamiento posterior.

El equipo de secado se utiliza para eliminar el agua del óxido de tungsteno preparado en húmedo o precursores como el ácido tungstálico. El equipo típico incluye un secador por pulverización y un horno, el secador por pulverización atomiza la suspensión y luego la seca instantáneamente en aire caliente (150-300 ° C), con una capacidad de procesamiento de 1-10 t/h, y el polvo resultante tiene un tamaño de partícula uniforme (10-50  $\mu\text{m}$ ), que es adecuado para la producción continua. El horno se seca estáticamente a 100-200 ° C con un volumen de 50-5000 L, adecuado para lotes pequeños u óxido de tungsteno de alta pureza, con un tiempo de secado de 2-8 horas. El equipo de secado debe tener una temperatura controlada con precisión ( $\pm 5$  ° C) y materiales resistentes a la corrosión (como el acero inoxidable) para evitar la aglomeración causada por los residuos de humedad.

El equipo de enfriamiento se utiliza para reducir el estado de alta temperatura del óxido de tungsteno después de la calcinación o el secado, para evitar la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidación o para facilitar el embalaje. El equipo común incluye un tambor de enfriamiento que reduce el óxido de tungsteno de 500 ° C a 50 ° C mediante la rotación del tambor y aire frío (20-50 ° C) con una capacidad de 5-20 t/h. El enfriador de lecho fluidizado utiliza una corriente de aire (0,5-2 m/s) para enfriar polvos finos, adecuados para óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura, con enfriamiento uniforme y antiaglomerante. El equipo necesita un sistema de intercambio de calor eficiente para garantizar que la temperatura baje rápidamente.

Los equipos de secado y enfriamiento deben adaptarse al proceso. Por ejemplo, la producción húmeda de productos químicos de tungsteno se basa en el secado por pulverización, mientras que el proceso seco requiere el enfriamiento del tambor. El equipo de secado y enfriamiento es el pilar auxiliar de la producción de óxido de tungsteno, lo que garantiza la estabilidad y procesabilidad del material.

### 7.2.2.1 Equipos de secado

El equipo de secado es un equipo auxiliar clave en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para eliminar el agua de los productos de preparación húmeda. En el caso de la producción de trióxido de tungsteno, por ejemplo, estos equipos procesan los productos de cristalización de la solución de ácido tungstico o paratungstato de amonio después de la acidólisis de scheelita para garantizar el estado seco de los precursores de metales de tungsteno.

Los equipos de secado comunes incluyen secadores por pulverización, hornos y secadores al vacío. El secador por pulverización atomiza la suspensión a través de una boquilla de alta presión (0,5-2 MPa), y el agua se evapora instantáneamente por aire caliente (150-300 ° C), con una capacidad de procesamiento de 1-10 t / h, y el tamaño de partícula de polvo resultante es de 10-50 μm, que es adecuado para la producción continua de polvo de tungsteno. El horno se seca estáticamente a 100-200 ° C, con un volumen de 50-5000 L y un tiempo de secado de 2-8 horas, lo que es adecuado para pequeños lotes de óxido de tungsteno de alta pureza. El secador de vacío funciona a una presión negativa de 0,01-0,08 MPa y 50-100 ° C, lo que es adecuado para materiales sensibles al calor como el tungstato y evita la descomposición a alta temperatura.

Los equipos de secado requieren materiales resistentes a la corrosión (por ejemplo, acero inoxidable 316L) y un sistema de control de temperatura preciso ( $\pm 5$  ° C) para evitar residuos o aglomeraciones por sobrecalentamiento. El caudal de aire caliente, la velocidad de alimentación y la temperatura son parámetros clave, por ejemplo, un secador por pulverización puede producir un polvo con un contenido de humedad del <1% con una alimentación de 5 L/min a 200 ° C. Si se

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requiere óxido de tungsteno a nanoescala, la temperatura de secado se puede reducir a 150 ° C para reducir la coalescencia de partículas. El equipo también debe estar equipado con un colector de polvo (por ejemplo, un separador ciclónico) para recuperar los finos.

La eficiencia del equipo de secado afecta directamente la calidad del producto. Por ejemplo, un secador por pulverización puede secar rápidamente el ácido de tungsteno hasta convertirlo en un polvo homogéneo, lo que mejora la eficiencia de la calcinación posterior. CTIA GROUP LTD mejora la calidad de la producción de óxido de tungsteno en empresas de tungsteno mediante la optimización de los parámetros de la planta de secado. El equipo de secado es la garantía del proceso húmedo de óxido de tungsteno, que asegura el secado y la fluidez del polvo.

### 7.2.2.2 Equipos de refrigeración

El equipo de enfriamiento es un equipo auxiliar importante en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para reducir la temperatura de productos de alta temperatura o intermedios. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos procesan el óxido de tungsteno calcinado o el polvo de tungsteno y lo reducen de 500–800 ° C a temperatura ambiente, que es una parte necesaria de la preparación de productos químicos de tungsteno y filamentos de tungsteno.

Los equipos de enfriamiento comunes incluyen tambores de enfriamiento, enfriadores de lecho fluidizado y máquinas de tornillo enfriadas por agua. El tambor de enfriamiento enfría el óxido de tungsteno girando el cilindro (1–5 rpm) y el aire frío (20–50 ° C), con un diámetro de 0,5–2 m y una capacidad de procesamiento de 5–20 t/h, que es adecuado para la producción de alto volumen. El enfriador de lecho fluidizado utiliza una corriente de aire (0,5–2 m/s) para suspender y enfriar el polvo de 600 ° C a 50 ° C durante 10–30 minutos, y es adecuado para óxido de tungsteno azul o morado, con enfriamiento uniforme y antiaglomerante. La máquina de tornillo refrigerada por agua empuja el material refrigerante a través de la camisa refrigerada por agua (10–30 ° C) y el tornillo, que es adecuado para la producción a pequeña escala o continua.

Los equipos de enfriamiento requieren sistemas de intercambiadores de calor eficientes (por ejemplo, intercambiadores de calor de tubos de cobre) y materiales resistentes a altas temperaturas (por ejemplo, acero refractario) para garantizar un enfriamiento rápido y evitar la oxidación. El medio de enfriamiento (aire o agua), el caudal y la longitud del equipo son clave, por ejemplo, el tambor de enfriamiento puede manejar 10 t/h de óxido de tungsteno a una velocidad del viento de 1 m/s. Si la temperatura desciende demasiado

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lentamente, puede provocar una reducción de las vacantes de oxígeno, lo que afectará el rendimiento del plástico de tungsteno. El equipo también debe ser a prueba de polvo para evitar la pérdida de polvo.

El rendimiento del equipo de refrigeración afecta al posterior procesamiento y almacenamiento. Por ejemplo, un enfriador de lecho fluidizado mantiene el polvo suelto para facilitar el empaquetado. El equipo de enfriamiento es el estabilizador de la producción de óxido de tungsteno, lo que asegura el estado físico del material.

### 7.2.3 Equipos de tratamiento de protección ambiental

El equipo de tratamiento de protección ambiental es un equipo auxiliar necesario en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para tratar los gases residuales y las aguas residuales generadas en el proceso de producción. En el caso de la producción de trióxido de tungsteno, por ejemplo, estas instalaciones incluyen equipos de tratamiento de gases de escape y equipos de tratamiento de aguas residuales para tratar contaminantes de reacciones de wolframita o paratungstato de amonio, asegurando el cumplimiento de las normas ambientales y apoyando el desarrollo sostenible del mercado del tungsteno.

Las plantas de tratamiento de gases residuales tratan el  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  o el polvo procedente de la calcinación o la acidólisis. El filtro de mangas recoge el polvo fino ( $<10 \mu\text{m}$ ) con una capacidad de procesamiento de  $10\text{--}100 \text{ m}^3/\text{min}$  y una eficiencia de más del 99%. El depurador absorbe gases ácidos (como  $\text{HCl}$ ) con lejía (por ejemplo,  $\text{NaOH}$ ) a una altura de  $5\text{--}20 \text{ m}$  y una velocidad del gas de  $1\text{--}3 \text{ m/s}$  para garantizar que la descarga cumpla con la norma. El equipo de tratamiento de aguas residuales trata los residuos ácidos y alcalinos líquidos o iones de metales pesados, neutraliza las aguas residuales ácidas ( $\text{pH } 2\text{--}4$  a  $7\text{--}8$ ) con cal en el tanque de sedimentación y precipita los residuos de tungsteno con una capacidad de tratamiento de  $10\text{--}1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Los equipos de tratamiento respetuosos con el medio ambiente requieren materiales resistentes a la corrosión (como PP o FRP) y sistemas de filtración de alta eficiencia para garantizar una tasa de eliminación de contaminantes del  $>$  del 95%. Es necesario optimizar los parámetros de funcionamiento, como la relación líquido-gas ( $2\text{--}5 \text{ L/m}^3$ ) y el tiempo de sedimentación ( $1\text{--}4$  horas). Si se trata de residuos de tungstato de calcio, se requiere un dispositivo de intercambio iónico adicional para eliminar el  $\text{Ca}^{2+}$ . CTIA GROUP LTD ha mejorado el nivel de producción verde de óxido de tungsteno en productos de tungsteno a través de la integración de equipos de protección ambiental. El equipo de tratamiento de protección ambiental es la garantía de protección ambiental de la producción de óxido de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, lo que reduce el impacto ambiental y mejora la competitividad de la empresa.

### 7.2.3.1 Equipos de tratamiento de gases residuales

El equipo de tratamiento de gases residuales es un equipo auxiliar ambiental en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para tratar los gases residuales producidos por reacción y calcinación. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos tratan el  $\text{NH}_3$ , el  $\text{HCl}$  o el polvo producido por acidólisis scheelita o descomposición térmica del ácido tungstico para garantizar que la emisión cumpla con los estándares de protección ambiental, que es la garantía verde para la producción química de tungsteno.

Los equipos comunes de tratamiento de gases residuales incluyen cámaras de filtros, depuradores y adsorbentes de carbón activado. El filtro de bolsa captura el polvo a través de una bolsa de filtro de poliéster (tamaño de poro de 1-5  $\mu\text{m}$ ), con una capacidad de procesamiento de 10-100  $\text{m}^3/\text{min}$  y una tasa de eliminación del  $>99\%$ , que es adecuada para el proceso de molienda de polvo de tungsteno. El depurador absorbe gases ácidos (como  $\text{SO}_2$ ) con lejía (5-10%  $\text{NaOH}$ ), con un diámetro de 1-3 m, una relación líquido-gas de 2-5  $\text{L}/\text{m}^3$  y una capacidad de tratamiento de 50-500  $\text{m}^3/\text{h}$ . Los adsorbentes de carbón activado adsorben volátiles (por ejemplo, residuos de disolventes) y son adecuados para el tratamiento de gases residuales a pequeña escala.

El equipo requiere materiales resistentes a la corrosión (por ejemplo, FRP) y sistemas de filtración de alta eficiencia para garantizar que los gases de escape se descarguen según el estándar (por ejemplo,  $\text{NH}_3 < 10 \text{ mg}/\text{m}^3$ ). El volumen de aire, el caudal de pulverización y los intervalos de cambio de bolsa son clave, por ejemplo, el depurador puede manejar 200  $\text{m}^3/\text{h}$  de gases de escape a una velocidad de 3  $\text{m}^3/\text{s}$ . CTIA GROUP LTD optimiza el rendimiento medioambiental del óxido de tungsteno en las empresas de tungsteno equipándolo con equipos de tratamiento de gases de escape de varias etapas. El equipo de tratamiento de gases de escape es una barrera ambiental para la producción de óxido de tungsteno y garantiza la calidad del aire.

### 7.2.3.2 Equipos de tratamiento de aguas residuales

El equipo de tratamiento de aguas residuales es un equipo auxiliar respetuoso con el medio ambiente en la producción de óxido de tungsteno, que se utiliza para tratar las aguas residuales generadas por procesos húmedos. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, estos equipos tratan los líquidos residuales ácidos y alcalinos y los iones de metales pesados después de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reacción del tungstato de sodio o el paratungstato de amonio para garantizar que las aguas residuales se descarguen según el estándar, que es la clave para la producción ecológica en el mercado del tungsteno.

Los equipos comunes de tratamiento de aguas residuales incluyen tanques de sedimentación de neutralización, columnas de intercambio iónico y dispositivos de separación por membranas. El tanque de sedimentación de neutralización neutraliza las aguas residuales ácidas (pH 2-4 a 7-8) con cal o NaOH, precipita residuos de tungsteno y metales pesados (por ejemplo,  $Pb^{2+}$ ), con una capacidad de tanque de 10-1000  $m^3$  y una capacidad de tratamiento de 5-500  $m^3/h$ . La columna de intercambio iónico adsorbe los iones de tungsteno residuales (por ejemplo,  $WO_4^{2-}$ ) a través de la resina, y el contenido de tungsteno del efluente es de  $< 1$  mg/L, lo que es adecuado para requisitos de alta pureza. Los dispositivos de separación por membrana (por ejemplo, ósmosis inversa) filtran las trazas de impurezas con una capacidad de 1-100  $m^3/h$  y una tasa de recuperación del  $>90\%$ .

Los equipos de tratamiento de aguas residuales requieren materiales resistentes a la corrosión (como PE o PVC) y sistemas de sedimentación de alta eficiencia para garantizar una tasa de eliminación de DQO y metales pesados del  $>$  del 95%. Es necesario optimizar la cantidad de neutralizador (0,1-1  $kg/m^3$ ) y el tiempo de sedimentación (1-4 horas). Si el tungstato de calcio está contenido en las aguas residuales, se debe agregar floculante para mejorar la eficiencia de la sedimentación. Los equipos de tratamiento de aguas residuales son la piedra angular de la protección del medio ambiente en la producción de óxido de tungsteno, garantizando la seguridad del agua.

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more yellow tungsten oxide information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 8 Investigación sobre el principio de detección del óxido de tungsteno

### 8.1 Espectroscopía de detección de óxido de tungsteno

La espectroscopía es una técnica importante para la detección de óxido de tungsteno, revelando su composición, estructura y propiedades mediante el análisis de su interacción con ondas electromagnéticas de una longitud de onda específica. Tomando el trióxido de tungsteno (óxido de tungsteno amarillo) como ejemplo, los métodos de análisis espectroscópico incluyen espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), espectroscopía Raman y espectroscopía ultravioleta-visible, etc., que se utilizan ampliamente en el control de calidad y la investigación de polvo de tungsteno y filamento de tungsteno.

La espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) excita los átomos de óxido de tungsteno mediante rayos X, detecta sus rayos de fluorescencia característicos y analiza cuantitativamente el contenido de tungsteno y elementos de impurezas. Por ejemplo, una muestra de trióxido de tungsteno muestra una línea  $K\alpha$  de tungsteno (alrededor de 59 keV) en XRF, que se puede usar para determinar su pureza (>99%) y oligoelementos (por ejemplo, Fe, Ca). Este método es no destructivo, rápido y adecuado para la inspección industrial de productos en el mercado de tungsteno. Los instrumentos, como los analizadores XRF portátiles, tienen límites de detección tan bajos como ppm y un tiempo de manipulación de solo unos minutos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La espectroscopia Raman excita la vibración molecular del óxido de tungsteno por láser para analizar su estructura cristalina y las características del enlace químico. Por ejemplo, la forma monoclinica de trióxido de tungsteno muestra picos Raman del enlace W-O-W a  $807\text{ cm}^{-1}$  y  $717\text{ cm}^{-1}$ , que pueden distinguir la diferencia estructural del óxido de tungsteno azul o el óxido de tungsteno púrpura. Este método es sensible a la forma cristalina y es adecuado para estudiar las propiedades microscópicas de los productos químicos de tungsteno. Los espectrómetros Raman (por ejemplo, láseres de  $532\text{ nm}$ ) tienen alta resolución y son capaces de detectar muestras a nanoescala.

Se utilizó la espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) para detectar las características de absorción de luz del óxido de tungsteno, reflejando su banda prohibida y sus propiedades ópticas. El trióxido de tungsteno tiene un borde de absorción de  $400\text{--}450\text{ nm}$  y una banda prohibida de energía de aproximadamente  $2,5\text{--}2,8\text{ eV}$ , que se puede utilizar para verificar su rendimiento fotocatalítico. Instrumentos como los espectrofotómetros con longitudes de onda de detección que van de  $200$  a  $800\text{ nm}$  son adecuados para el análisis de laboratorio. La espectroscopia es la piedra angular científica de la detección de óxido de tungsteno, ya que proporciona información multidimensional.

### 8.1.1 Detección de óxido de tungsteno - Análisis de espectroscopia de fluorescencia de rayos X

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) es un método espectroscópico altamente eficiente para la detección de óxido de tungsteno, que excita los átomos de muestra mediante rayos X, mide sus rayos de fluorescencia característicos y analiza la composición y el contenido elemental. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, XRF se utiliza para detectar la pureza del óxido de tungsteno después del procesamiento de wolframita o scheelita, y es una tecnología clave para el control de calidad del metal de tungsteno.

El principio de detección de XRF se basa en transiciones a nivel atómico. Los rayos X (energía  $10\text{--}50\text{ keV}$ ) irradian óxido de tungsteno para excitar los electrones internos del átomo de tungsteno (por ejemplo, la capa L) y emiten una fluorescencia característica cuando los electrones externos llenan las vacantes, como la línea  $K\alpha$  ( $59,3\text{ keV}$ ) y la línea  $K\beta$  ( $67,2\text{ keV}$ ) de tungsteno. La intensidad de la fluorescencia puede ser registrada por un detector (por ejemplo, detector de Si(Li)) para cuantificar el contenido de tungsteno (precisión  $\pm 0,1\%$ ) y los elementos de impureza (por ejemplo, línea  $K\alpha$  de Fe,  $6,4\text{ keV}$ ). Instrumentos como los analizadores XRF de sobremesa con una potencia de  $50\text{--}100\text{ W}$  y límites de detección de hasta el rango de ppm son adecuados para un análisis rápido.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fuerza de XRF radica en sus capacidades de detección no destructiva, rápida y de múltiples elementos. Por ejemplo, la detección de óxido de tungsteno producido por calcinación de paratungstato de amonio puede confirmar el contenido de tungsteno > 99,5% e identificar trazas de Mo o Si en 5 minutos. La preparación de la muestra es sencilla, ya sea en forma de tableta de polvo o de bloque directo, pero es necesario calibrar un patrón (por ejemplo,  $WO_3$  puro) para evitar efectos de matriz. Si se detecta tungstato de calcio, el contenido de Ca se puede analizar al mismo tiempo para verificar la pureza de la materia prima. Los parámetros del instrumento, como el voltaje del tubo (40–60 kV) y la corriente (1–2 mA), deben optimizarse para garantizar la sensibilidad.

La limitación de XRF es que no es sensible a elementos ligeros como el O, y es necesario confirmar el estado de oxidación en combinación con otros métodos. INDUSTRIALMENTE, CTIA GROUP LTD UTILIZA XRF PARA MONITOREAR LA CONSISTENCIA DE LA CALIDAD DEL ÓXIDO DE TUNGSTENO EN LOS PRECIOS DEL TUNGSTENO. La espectroscopia de fluorescencia de rayos X es el punto de referencia de la industria para la detección de óxido de tungsteno, ya que proporciona información elemental rápida y confiable.

### 8.1.2 Detección de óxido de tungsteno – Espectroscopia Raman

La espectroscopia Raman es un método espectroscópico importante para la detección de óxido de tungsteno, que excita la vibración molecular de la muestra mediante láser para analizar su estructura cristalina y las características del enlace químico. Tomando como ejemplo la producción de trióxido de tungsteno, la espectroscopia Raman se utiliza para distinguir la forma de cristal de óxido de tungsteno generada por pirólisis de ácido de tungsteno, que es una herramienta precisa para estudiar las propiedades microscópicas de los productos químicos de tungsteno y el polvo de tungsteno.

El principio de detección de la espectroscopia Raman se basa en la dispersión inelástica de la luz. Un láser (por ejemplo, 532 nm o 785 nm) irradia óxido de tungsteno para excitar la vibración de los enlaces W-O, y el cambio de longitud de onda de la luz dispersada refleja las características moleculares. Por ejemplo, los picos Raman de la forma cristalina monoclinica de trióxido de tungsteno son  $807\text{ cm}^{-1}$  (vibración telescópica W-O-W) y  $717\text{ cm}^{-1}$  (vibración de flexión W-O), y la forma cristalina hexagonal tiene un pico característico de alrededor de  $690\text{ cm}^{-1}$ . Si se detecta óxido de tungsteno azul u óxido de tungsteno púrpura, se puede juzgar el estado defectuoso si la vacante de oxígeno provoca un aumento en el ancho o desplazamiento del pico. Instrumentos como la microscopia Raman con una resolución de  $<1\text{ cm}^{-1}$  son adecuados para el microanálisis.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La ventaja de la espectroscopia Raman es su alta sensibilidad y no destructividad. Detección de tungstato El óxido de tungsteno convertido puede confirmar la forma del cristal en segundos y se puede medir directamente a partir de polvo o película sin necesidad de una preparación compleja de la muestra. La potencia del láser (1-50 mW) y el tiempo de integración (5-60 s) deben ajustarse para evitar el sobrecalentamiento de la muestra. Por ejemplo, para la detección de óxido de nanotungsteno, un láser de 10 mW y una integración de 20 s proporcionan una resolución clara del pico de enlace W-O. Si la muestra contiene impurezas fluorescentes (por ejemplo, residuos orgánicos), el fondo debe suprimirse con un láser de 785 nm. La limitación de la espectroscopia Raman es que no hay información directa sobre el contenido de los elementos metálicos, por lo que debe usarse junto con XRF.

## 8.2 Detección de óxido de tungsteno: análisis electroquímico

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) es un material funcional importante, que se usa ampliamente en catalizadores, sensores, materiales de almacenamiento de energía y otros campos debido a sus propiedades únicas en luz, electricidad y calor. Con el fin de caracterizar y detectar con precisión sus propiedades, el análisis electroquímico se ha convertido en un método eficiente y sensible. El análisis electroquímico se basa en las propiedades electroquímicas de una sustancia en solución y analiza la composición y concentración de una sustancia midiendo los parámetros eléctricos (como la corriente, el potencial o la cantidad eléctrica) durante la reacción del electrodo. Este método es particularmente adecuado para estudiar las propiedades redox del óxido de tungsteno y su comportamiento químico en condiciones específicas.

El principio básico del análisis electroquímico se deriva de las reacciones electroquímicas. En un sistema electroquímico típico, la celda consta de un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar, denominados colectivamente un sistema de tres electrodos. El electrodo de trabajo es donde reacciona el óxido de tungsteno, el electrodo de referencia (por ejemplo, electrodo saturado de calomel) se utiliza para proporcionar una referencia de potencial estable y el electrodo auxiliar (por ejemplo, electrodo de platino) completa el cierre del circuito. Cuando se aplica un potencial aplicado al electrodo de trabajo, el óxido de tungsteno puede sufrir una reacción de oxidación o reducción, produciendo una señal de corriente medible. Al registrar los cambios en estas señales, se puede inferir la concentración de la sustancia, el mecanismo de reacción y las propiedades electroquímicas.

Cuando se trata de la detección de óxido de tungsteno, el análisis electroquímico

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ofrece ventajas significativas. En primer lugar, es altamente sensible y capaz de detectar sustancias a niveles traza, lo que es particularmente importante para estudiar el comportamiento del óxido de tungsteno en nanomateriales o películas delgadas. En segundo lugar, el método electroquímico es fácil de operar y el costo del instrumento es relativamente bajo, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de laboratorio y de campo industrial. Además, el método proporciona información dinámica, como cambios en las velocidades de reacción y las superficies de los electrodos, que es de gran importancia para estudiar el comportamiento electroquímico del ácido de tungsteno o los productos químicos de tungsteno.

Las técnicas comunes de análisis electroquímico incluyen voltamperometría cíclica, polarografía y valoración potenciométrica. Entre ellos, la voltamperometría cíclica se utiliza a menudo en la detección de óxido de tungsteno debido a su intuición y amplia aplicabilidad. La voltamperometría cíclica registra la respuesta de la corriente mediante la aplicación de un potencial que cambia linealmente con el tiempo, lo que da como resultado una curva de voltamperometría característica. Estas curvas revelan no solo el potencial redox del óxido de tungsteno, sino también su comportamiento de adsorción o difusión en la superficie del electrodo. Por ejemplo, cuando se utiliza óxido de tungsteno como material de electrodo, su curva de voltios-amperios puede mostrar picos significativos de oxidación y reducción, lo que indica sus propiedades de reacción electroquímica reversibles.

En aplicaciones prácticas, la detección electroquímica de óxido de tungsteno a menudo requiere la optimización de las condiciones experimentales. Por ejemplo, la elección del electrolito (por ejemplo, ácido sulfúrico o solución de ácido nítrico) afecta la reactividad, mientras que el estado de la superficie del material del electrodo (por ejemplo, metal de tungsteno o electrodo de carbono vítreo) afecta directamente la sensibilidad de detección. Además, los estudios en el campo de la investigación del tungsteno han demostrado que la forma cristalina del óxido de tungsteno (por ejemplo, monoclinico u ortorrófono) tiene un impacto significativo en sus propiedades electroquímicas, por lo que es necesario aclarar las propiedades estructurales de la muestra antes de la detección.

Para mejorar aún más la precisión de la detección, se pueden combinar otras tecnologías. Por ejemplo, al combinarse con los avances recientes en la tecnología de tungsteno, como el uso de electrodos nanoestructurados de óxido de tungsteno, la intensidad de la señal puede mejorarse significativamente. Además, el comportamiento electroquímico del tungstato también proporciona apoyo teórico para la detección de óxido de tungsteno. Por ejemplo, las reacciones

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electroquímicas en una solución de tungstato de sodio se pueden utilizar como un experimento de control para ayudar a comprender el mecanismo de reacción del óxido de tungsteno.

En el campo del monitoreo ambiental, las pruebas electroquímicas del óxido de tungsteno también se pueden utilizar para evaluar su rendimiento como material de detección. Por ejemplo, los sensores de gas a base de óxido de tungsteno pueden detectar cambios en la concentración de gases específicos mediante métodos electroquímicos. Esta aplicación se debe a la alta selectividad de los productos de tungsteno en las reacciones electroquímicas. Además, las fluctuaciones en los precios del tungsteno también pueden afectar el costo del equipo de inspección, por lo que se debe considerar la economía en las aplicaciones industriales.

Sin embargo, el análisis electroquímico tiene limitaciones. Por ejemplo, una selectividad deficiente puede provocar los efectos de sustancias interferentes, especialmente cuando se detecta óxido de tungsteno en matrices complejas. Además, la superficie del electrodo puede pasivarse con el tiempo, lo que afecta la estabilidad de la detección a largo plazo. En respuesta a estos problemas, los investigadores propusieron una variedad de mejoras, como el uso de electrodos compuestos de tungsteno-cobre para mejorar la conductividad eléctrica o la introducción de tungstato de calcio como estabilizador.

En conclusión, el análisis electroquímico proporciona una poderosa herramienta para la detección de óxido de tungsteno. Su alta sensibilidad, facilidad de operación y capacidades de análisis dinámico lo convierten en una posición importante en la investigación académica y las aplicaciones industriales del tungsteno. Al optimizar continuamente las condiciones experimentales y los materiales de los electrodos, se espera que el método electroquímico mejore aún más el valor de aplicación de la detección de óxido de tungsteno.

### 8.2.1 Detección de óxido de tungsteno - voltamperometría

La voltamperometría es una rama importante del análisis electroquímico, que es particularmente adecuada para detectar las propiedades electroquímicas del óxido de tungsteno. Mide la relación entre el potencial del electrodo y la corriente para generar una curva de voltios-amperios, que permite el análisis cualitativo y cuantitativo de la materia. En la detección de óxido de tungsteno, la voltamperometría se ve favorecida por su alta sensibilidad y rápida respuesta, especialmente cuando se estudia su comportamiento redox y propiedades electrocatalíticas.

Los principios básicos de la voltamperometría se basan en la ley de Ohm y en la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cinética de las reacciones electroquímicas. En los experimentos, generalmente se usa un sistema de tres electrodos: un electrodo de trabajo (por ejemplo, electrodo de película delgada de tungsteno metálico u óxido de tungsteno), un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar. Al aplicar un potencial variable en el tiempo, como un barrido lineal o un barrido cíclico, se registra la corriente resultante de la reacción de oxidación o reducción del óxido de tungsteno en la superficie del electrodo. La curva corriente-potencial resultante (es decir, voltamperometría) proporciona una representación visual de las propiedades electroquímicas de la sustancia.

La voltamperometría cíclica (CV) es una de las técnicas más utilizadas en la detección de voltamperometría del óxido de tungsteno. Genera una curva simétrica de voltios-amperios mediante el escaneo repetido de un rango de potenciales. Por ejemplo, cuando se examinan las propiedades capacitivas del óxido de tungsteno, la curva voltio-amperio puede ser rectangular, lo que indica que tiene excelentes capacidades de almacenamiento de energía electroquímica. Al estudiar su rendimiento catalítico, los picos redox en la curva revelan el potencial y la velocidad de reacción específicos.

Las ventajas de la voltamperometría son su facilidad de manejo y su carácter informativo. Para el óxido de tungsteno, no solo puede determinar su concentración, sino también analizar su mecanismo de reacción en la superficie del electrodo. Por ejemplo, la curva de voltamperometría de un electrodo de óxido de tungsteno preparado a partir de polvo de tungsteno en un electrolito ácido puede mostrar múltiples picos correspondientes a diferentes transiciones de estado de oxidación. Esta propiedad es particularmente importante en los estudios de datos de tungsteno, ya que ayuda a comprender el comportamiento polivalente del óxido de tungsteno.

La optimización de las condiciones experimentales es esencial para la detección de voltamperometría. Por ejemplo, la elección de la velocidad de escaneo tiene un impacto directo en la forma de la curva de voltios-amperios y la corriente máxima. En general, una velocidad de escaneo más lenta es adecuada para estudiar el proceso de control de difusión del óxido de tungsteno, mientras que una velocidad de escaneo más rápida es mejor para analizar las reacciones de la superficie. Además, el pH y la fuerza iónica del electrolito también pueden afectar los resultados de la prueba. Por ejemplo, en una solución de ácido tungstático, el comportamiento de voltamperometría del óxido de tungsteno puede variar dependiendo de la concentración de protones.

La aplicación de la voltamperometría en la detección de óxido de tungsteno también se refleja en su combinación con otras tecnologías. Por ejemplo, mediante

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la combinación con la nanotecnología desarrollada por empresas de tungsteno, es posible preparar electrodos de óxido de tungsteno con una gran superficie, mejorando así la sensibilidad de detección. Además, la introducción de materiales compuestos como el ferrotungsteno o el plástico de tungsteno también puede mejorar la estabilidad y la conductividad del electrodo.

En la práctica, la voltamperometría se ha utilizado para probar el rendimiento del óxido de tungsteno en el campo de la fotoelectrocatalisis. Por ejemplo, mediante el análisis de su curva de voltios-amperios, es posible determinar la eficiencia de transferencia de carga del óxido de tungsteno bajo iluminación. Esta aplicación es de gran importancia en el mercado del tungsteno, ya que promueve el desarrollo del óxido de tungsteno en el campo de las nuevas energías.

Sin embargo, la voltamperometría también se enfrenta a algunos desafíos. Por ejemplo, la contaminación o el envejecimiento de la superficie del electrodo pueden causar una deriva de la señal que puede afectar la repetibilidad del ensayo. Además, en muestras complejas, el óxido de tungsteno puede superponerse con las señales electroquímicas de otras sustancias, lo que reduce la selectividad. Para resolver estos problemas, los investigadores experimentaron con el uso de agujas de tungsteno como microelectrodos para reducir la interferencia y mejorar la resolución espacial.

### 8.3 Otros métodos de detección de óxido de tungsteno

Además del análisis electroquímico, el óxido de tungsteno se puede detectar mediante una variedad de métodos físicos y químicos. Cada uno de estos métodos tiene sus propias características y es adecuado para diferentes escenarios de aplicación y necesidades de inspección. A continuación, discutiremos en detalle otras técnicas de detección distintas de la voltamperometría, centrándonos en sus principios, ventajas y limitaciones, y proporcionaremos una variedad de opciones para la caracterización integral del óxido de tungsteno.

En el estudio del conocimiento del tungsteno, la espectroscopia es un método de detección no electroquímico comúnmente utilizado. Por ejemplo, la espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) y la espectroscopia infrarroja (IR) se pueden utilizar para detectar las propiedades ópticas y las características de enlace químico del óxido de tungsteno. La espectroscopia UV-Vis puede estimar indirectamente la concentración de óxido de tungsteno midiendo sus picos de absorción en longitudes de onda específicas, mientras que la espectroscopia IR puede identificar vibraciones de enlace W-O en su estructura cristalina. Estos métodos no requieren reacciones de electrodos y son particularmente adecuados para el análisis de variaciones de color de óxido de tungsteno amarillo o azul.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La difracción de rayos X (XRD) es otra técnica de detección importante que se utiliza para analizar la estructura cristalina del óxido de tungsteno. Al medir el patrón de difracción de los rayos X, es posible determinar su forma cristalina (por ejemplo, monoclinica o hexagonal) y su grado de cristalinidad. Este método es ampliamente utilizado en el campo de la investigación del tungsteno, especialmente en el estudio del óxido de tungsteno formado por la descomposición térmica del paratungstato de amonio. Además, la XRD puede detectar impurezas en la muestra, como residuos de wolframita.

La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) se centran en la morfología microscópica y el análisis del tamaño de partícula del óxido de tungsteno. SEM proporciona información sobre la topografía de la superficie, mientras que TEM proporciona información sobre las estructuras a nanoescala. Esto es particularmente importante para el estudio del óxido de tungsteno producido por la oxidación del polvo de tungsteno esférico, ya que el tamaño de partícula y la morfología afectan directamente sus propiedades. Además, en combinación con la espectroscopia de energía (EDS), es posible cuantificar la distribución elemental.

En el campo del análisis químico, también se utilizan métodos gravimétricos y de valoración para la detección de óxido de tungsteno. El método gravimétrico convierte el metatungstato de amonio en óxido de tungsteno mediante tostado a alta temperatura y luego pesa su masa. Este método es simple y directo, pero requiere una alta pureza de la muestra. El método de valoración determina el contenido de tungsteno por reacción con tungstato de sodio, que es adecuado para el análisis en sistemas de solución.

El mérito de estos métodos radica en su diversidad y complementariedad. Por ejemplo, la espectroscopia es adecuada para el cribado rápido, mientras que la XRD y el SEM proporcionan información estructural. Sin embargo, a menudo son menos sensibles que los métodos electroquímicos, y algunas técnicas (por ejemplo, TEM) requieren equipos costosos y un tratamiento previo complejo, que a menudo se cita en las noticias de tungsteno como un cuello de botella para aplicaciones industriales.

Al elegir un método de detección, hay un equilibrio entre el estado de la muestra y el objetivo de la prueba. Por ejemplo, el óxido de tungsteno oxidado en la superficie de los filamentos de tungsteno es más adecuado para el análisis SEM, mientras que el óxido de tungsteno en solución es más adecuado para la valoración química. Además, la diversificación de la demanda del mercado de tungsteno también ha impulsado innovaciones en las tecnologías de detección, como el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desarrollo de espectrómetros portátiles.

### 8.3.1 Detección de óxido de tungsteno: análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica de detección basada en el cambio de masa que se usa ampliamente en la investigación de la estabilidad térmica del óxido de tungsteno, el comportamiento de la descomposición y la determinación del contenido. Proporciona información detallada sobre las propiedades fisicoquímicas del óxido de tungsteno midiendo el cambio en la masa de la muestra en función de la temperatura o el tiempo bajo un programa de temperatura controlada. Este método tiene importantes aplicaciones en el campo de la tecnología del tungsteno, especialmente en el análisis de su proceso de síntesis y propiedades de tratamiento térmico.

El principio básico del análisis termogravimétrico es aprovechar el cambio en la masa de una sustancia durante el calentamiento. Por ejemplo, el óxido de tungsteno puede ser ingravido debido a la volatilización del agua, la transición de la forma cristalina o la descomposición química. Los experimentos generalmente se realizan en un analizador termogravimétrico, donde la muestra se coloca en una microbalanza y se calienta a una velocidad constante en una atmósfera de nitrógeno o aire. Al registrar el perfil masa-temperatura (curva TG), se puede analizar el comportamiento térmico del óxido de tungsteno.

Al detectar óxido de tungsteno, el análisis termogravimétrico se usa comúnmente en los siguientes escenarios. En primer lugar, determina los componentes volátiles de la muestra. Por ejemplo, el óxido de tungsteno púrpura puede liberar agua ligada cuando se calienta, y la curva TG mostrará los pasos de ingravidez correspondientes. En segundo lugar, el método puede estudiar la reacción redox del óxido de tungsteno. Por ejemplo, en una atmósfera reductora (por ejemplo, hidrógeno), el óxido de tungsteno se puede convertir en metal de tungsteno, y el grado de reducción de masa se puede usar para calcular su pureza.

La ventaja del análisis termogravimétrico es su alta precisión y no destructividad. Para la detección de trióxido de tungsteno, TGA puede medir con precisión pequeños cambios de masa con una sensibilidad en el rango de microgramos. Además, se puede utilizar junto con la calorimetría diferencial de barrido (DSC) para analizar más a fondo los efectos térmicos del óxido de tungsteno, como las temperaturas de fusión o cambio de fase. Esta técnica con guiones es particularmente común en los estudios de datos de tungsteno.

El control de las condiciones experimentales es fundamental para el análisis termogravimétrico. Por ejemplo, la tasa de aumento afectará la resolución de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reacción de descomposición, y generalmente se eligen 5-10 ° C / min para equilibrar la precisión y la eficiencia. La elección de la atmósfera también es crucial: en el aire, el óxido de tungsteno puede permanecer estable, mientras que en una atmósfera inerte puede cambiar de manera diferente. Además, el tamaño de la muestra (normalmente de 5 a 10 mg) debe ser moderado para evitar una transferencia de calor desigual.

En aplicaciones prácticas, el análisis termogravimétrico se utiliza a menudo para el análisis de calidad del óxido de tungsteno producido por la oxidación del polvo de tungsteno. Por ejemplo, al medir la pérdida de peso de la muestra de tungsteno a altas temperaturas, se puede estimar la cantidad de óxido de tungsteno que contiene. Además, la estabilidad térmica de los calentadores de tungsteno también depende del TGA para garantizar su rendimiento en entornos de alta temperatura.

Sin embargo, el análisis termogravimétrico tiene limitaciones. Por ejemplo, no puede distinguir directamente la contribución de óxido de tungsteno de otras sustancias inorgánicas, por lo que a menudo se verifica en combinación con XRD o espectroscopia. Además, las altas temperaturas pueden provocar la volatilización de la muestra o la contaminación del equipo, lo que afecta a la fiabilidad a largo plazo. Para resolver estos problemas, los pasos de pretratamiento, como el secado a baja temperatura, se utilizan a menudo en la investigación de productos de tungsteno.

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 9 Campos de aplicación del óxido de tungsteno

Como material multifuncional, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) ha mostrado una amplia gama de aplicaciones en muchos campos debido a sus propiedades físicas y químicas únicas, como la alta estabilidad química, las excelentes propiedades eléctricas y la actividad fotocatalítica. Desde la energía hasta la protección del medio ambiente y los dispositivos electrónicos, la aplicación del óxido de tungsteno continúa expandiéndose, promoviendo la innovación y el desarrollo de industrias relacionadas. En este capítulo se analizarán en detalle sus principales áreas de aplicación, centrándose en su uso específico en el sector energético.

### 9.1 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo energético

La energía es el núcleo del desarrollo social moderno, y la aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la energía se centra principalmente en el almacenamiento de energía, la conversión de energía y el desarrollo de energías renovables. Sus propiedades polivalentes, sus propiedades semiconductoras y su gran superficie lo convierten en un material ideal para baterías, condensadores y fotocatalisis. A continuación se analizarán sus aplicaciones concretas en el sector energético desde diferentes perspectivas.

El óxido de tungsteno se utiliza para obtener energía gracias a sus excelentes propiedades electroquímicas. Por ejemplo, como semiconductor de tipo n, tiene una banda prohibida moderada (alrededor de 2,6–3,0 eV) que puede absorber la luz

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

visible y participar en las reacciones de transferencia de electrones. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que las nanoestructuras de óxido de tungsteno (como las nanovarillas o las nanoláminas) pueden aumentar significativamente su superficie específica y su reactividad, proporcionando una mayor eficiencia a los dispositivos energéticos.

En el campo del almacenamiento de energía, el óxido de tungsteno se usa comúnmente en baterías y supercondensadores de iones de litio, y su alta capacidad teórica y su rápida capacidad de transporte de iones han atraído mucha atención. En términos de conversión de energía, las propiedades fotocatalíticas del óxido de tungsteno le dan potencial en la producción de hidrógeno a partir de la división del agua. Además, los avances en la tecnología del tungsteno también han impulsado su exploración en células solares y pilas de combustible.

En la práctica, la optimización del rendimiento del óxido de tungsteno depende del proceso de síntesis. Por ejemplo, mediante la descomposición térmica del paratungstato de amonio o el metatungstato de amonio, el óxido de tungsteno con diferentes formas de cristal se puede preparar para satisfacer las necesidades de dispositivos de energía específicos. Además, la fluctuación de los precios del tungsteno también afecta a su proceso de comercialización en el ámbito energético, por lo que el control de costes se ha convertido en el foco de la investigación.

### 9.1.1 Aplicación de óxido de tungsteno en baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio (LIB) son la tecnología central de almacenamiento de energía de los dispositivos electrónicos portátiles modernos y los vehículos eléctricos. Óxido de tungsteno Como material de electrodo de alto rendimiento, tiene ventajas significativas para mejorar la capacidad de la batería y la estabilidad del ciclo. Su alta capacidad teórica (alrededor de 693 mAh/g) y su capacidad de transferencia de múltiples electrones lo convierten en una opción popular para los materiales de ánodo para baterías de iones de litio.

En las baterías de iones de litio, el óxido de tungsteno almacena iones de litio a través de una reacción redox reversible. El mecanismo de reacción se puede expresar como:  $WO_3 + 6Li^+ + 6e^- \rightleftharpoons W + 3Li_2O$ . Esta reacción no solo proporciona una alta capacidad, sino que también mejora la conductividad eléctrica debido a la formación de metal tungsteno. Sin embargo, la expansión de volumen y la baja conductividad del óxido de tungsteno puro limitan su aplicación práctica, por lo que el rendimiento a menudo se optimiza mediante materiales compuestos o nanologización.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El óxido de tungsteno nanoestructurado, como las nanopartículas o los nanohilos, mejora significativamente sus propiedades. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno generadas por la oxidación del polvo de tungsteno pueden aliviar eficazmente el cambio de volumen durante la carga y descarga debido a su alta área superficial y su corta ruta de difusión. Además, la composición con materiales de carbono como el grafeno o el cobre tungsteno puede mejorar aún más la conductividad y la estabilidad estructural.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un efecto significativo en sus propiedades. Por ejemplo, las nanovarillas de óxido de tungsteno sintetizadas por método hidrotermal exhiben un excelente rendimiento de ciclo en baterías de iones de litio, con una tasa de retención de capacidad de más del 80%. Además, la tecnología de dopaje desarrollada por el tungsteno (por ejemplo, el dopaje con molibdeno) puede ajustar su estructura electrónica y mejorar aún más la eficiencia de la célula.

La aplicación de óxido de tungsteno en las baterías de iones de litio también se refleja en el rendimiento de carga y descarga rápidas. Los estudios han demostrado que su comportamiento pseudocapacitivo le permite mantener una alta capacidad a altas velocidades, lo cual es esencial para las necesidades de carga rápida de los vehículos eléctricos. Además, el óxido de tungsteno tiene menor toxicidad y mayor estabilidad que otros óxidos de metales de transición, lo que está en línea con la tendencia de desarrollo de la energía verde.

Sin embargo, persisten los desafíos. Por ejemplo, el óxido de tungsteno tiene una gran pérdida de capacidad irreversible en el primer ciclo, que puede verse exacerbada por la formación de una membrana de interfaz electrolítica sólida (SEI). Para resolver este problema, los investigadores intentaron utilizar [plástico de tungsteno](#) como capa amortiguadora, o mediante tecnología de prelitación para mejorar la primera eficiencia. Además, [el mercado de tungsteno](#) La demanda está impulsando la investigación de métodos sintéticos de bajo costo, como la utilización [Wolframite](#) Preparación directa [Óxido de tungsteno](#).

### 9.1.2 Aplicación de óxido de tungsteno en supercondensadores

Los supercondensadores (SC) son la tecnología estrella en el almacenamiento de energía debido a su alta densidad de potencia y su largo ciclo de vida. El óxido de tungsteno ocupa una posición importante en los materiales de electrodos de los supercondensadores debido a su alto rendimiento de pseudocapacitancia y buena estabilidad química. En comparación con los materiales convencionales a base de carbono, el óxido de tungsteno puede proporcionar capacitancia adicional a través de la reacción de Faraday, lo que resulta en un aumento significativo en la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densidad de energía.

En los supercondensadores, el mecanismo de almacenamiento de energía del óxido de tungsteno combina capacitancia eléctrica de doble capa y pseudocapacitancia. Su pseudocapacitancia se deriva de una reacción redox rápida en la superficie o en la fase a granel, por ejemplo,  $WO_3 + H^+ + e^- \rightleftharpoons HWO_3$ . Esta reacción es particularmente pronunciada en electrolitos ácidos, donde el óxido de tungsteno exhibe una capacitancia específica de hasta 500–700 F / g. Además, su estructura porosa, como el óxido de tungsteno preparado a partir de polvo de tungsteno esférico, aumenta el área de contacto con el electrolito y mejora aún más el rendimiento.

La nanotransformación del óxido de tungsteno es la clave para mejorar el rendimiento de sus supercondensadores. Por ejemplo, las nanoláminas de óxido de tungsteno producidas por oxidación de filamentos de tungsteno pueden aumentar significativamente la tasa de carga-descarga debido a su alta área de superficie específica y su rápida ruta de difusión de iones. Además, la composición con plata-tungsteno o ferro-tungsteno puede mejorar la conductividad eléctrica y compensar los defectos inherentes de baja conductividad del óxido de tungsteno.

En la práctica, el método de preparación del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en sus propiedades. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno generadas en la superficie de las agujas de tungsteno por deposición electroquímica tienen una excelente estabilidad de ciclo y pueden durar decenas de miles de ciclos. Además, los avances en la tecnología de tungsteno también han llevado al desarrollo de supercondensadores asimétricos, en los que el óxido de tungsteno se combina con material de carbono como electrodo negativo, ampliando significativamente la ventana de voltaje de funcionamiento.

Las ventajas del óxido de tungsteno en los supercondensadores también incluyen su respeto por el medio ambiente. En comparación con los materiales que contienen níquel o cobalto, el óxido de tungsteno está disponible en una amplia gama de materias primas (por ejemplo, scheelita) y se produce de forma respetuosa con el medio ambiente. Además, Tungsten News señala que está surgiendo su potencial de aplicación en dispositivos electrónicos flexibles, como fuentes de alimentación para dispositivos portátiles.

Sin embargo, la baja conductividad del óxido de tungsteno y la degradación estructural durante el ciclo siguen siendo cuellos de botella. Para ello, los investigadores intentaron mejorar sus propiedades mediante el dopaje de tungsteno cesio o la introducción de tungstato de calcio. Además, los estudios de conocimiento del tungsteno han demostrado que las modificaciones de la superficie,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

como el recubrimiento de polímeros conductores, también pueden ser efectivas para mejorar su estabilidad.

En resumen, la aplicación de óxido de tungsteno en supercondensadores demuestra su potencial para una alta capacitancia y una larga vida útil. Con la optimización del diseño de materiales y la estructura del dispositivo, sus perspectivas en el campo del almacenamiento de energía de alta potencia serán más brillantes.

### 9.1.3 Aplicación de óxido de tungsteno en la división fotocatalítica del agua para producir hidrógeno

La división fotocatalítica del agua para producir hidrógeno es una forma importante de producir energía limpia a partir de la energía solar, y el óxido de tungsteno se ha convertido en un material estrella en este campo debido a su excelente rendimiento fotocatalítico y estabilidad química. Su banda prohibida moderada (2,6–2,8 eV) le permite absorber eficazmente la luz visible, lo que le da una ventaja significativa en las reacciones de división del agua impulsadas por la energía solar.

En el proceso fotocatalítico, el óxido de tungsteno actúa como fotocatalizador para absorber fotones y generar pares electrón–hueco. Los electrones participan en la reducción de las moléculas de agua para formar hidrógeno (H<sub>2</sub>), mientras que los agujeros oxidan el agua para producir oxígeno (O<sub>2</sub>). La reacción se puede expresar como:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ . Sin embargo, la alta tasa de recombinación de los portadores fotogenerados de óxido de tungsteno puro limita su eficiencia, por lo que el rendimiento a menudo se optimiza mediante modificación o recombinación.

El óxido de tungsteno nanoestructurado mejoró significativamente su actividad fotocatalítica. Por ejemplo, las nanovarillas de óxido de tungsteno sintetizadas por método solvotérmico pueden mejorar significativamente la eficiencia de la producción de hidrógeno debido a su alta área superficial y su ruta de transporte de portadores optimizada. Además, las películas de óxido de tungsteno preparadas por precursores de ácido tungstico funcionan bien en la división fotocatalítica del agua, especialmente con la ayuda de la presión de polarización.

La modificación del óxido de tungsteno es la clave para mejorar su rendimiento fotocatalítico. Por ejemplo, dopando oro de tungsteno o disulfuro de tungsteno, que puede reducir la banda prohibida y mejorar la eficiencia de la absorción de luz. Además, con TiO<sub>2</sub> o tungstato La heterojunción formada por la recombinación puede separar eficazmente los electrones fotogenerados y los huecos, mejorando así el rendimiento cuántico.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En aplicaciones prácticas, la estabilidad del óxido de tungsteno es una de sus ventajas. En comparación con otros fotocatalizadores (por ejemplo, CdS), el óxido de tungsteno es menos susceptible a la corrosión en ambientes ácidos u oxidantes. Además, los estudios de productos de tungsteno han demostrado que su combinación con materiales de protección contra la radiación también se puede utilizar en el diseño de reactores fotocatalíticos.

Sin embargo, el óxido de tungsteno tiene una banda de conducción sesgada, lo que limita su eficiencia en la reducción directa del agua. Para ello, los investigadores suelen introducir cocatalizadores como el Pt o las partículas de tungsteno para mejorar la producción de hidrógeno.

## 9.2 Aplicación del óxido de tungsteno en el ámbito del medio ambiente

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) muestra una amplia gama de aplicaciones potenciales en el campo ambiental debido a sus excelentes propiedades fotocatalíticas, estabilidad química y versatilidad. Ya sea que se trate de purificación de aire o tratamiento de aguas residuales, el óxido de tungsteno puede eliminar eficazmente los contaminantes a través de sus propiedades físicas y químicas únicas, proporcionando una solución eficiente para la protección del medio ambiente. A continuación se presenta una discusión detallada de sus aplicaciones específicas en el campo ambiental. En el campo ambiental, las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno son su principal fortaleza. Su banda prohibida (alrededor de 2,6-3,0 eV) le permite absorber la luz visible y excitar electrones y huecos fotogenerados, que desencadenan reacciones redox para descomponer los contaminantes. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que las nanoestructuras de óxido de tungsteno (como las nanopartículas o las películas delgadas) pueden aumentar significativamente su área de superficie específica y su actividad catalítica, lo que las hace excelentes en la gestión ambiental.

En la práctica, el método de preparación del óxido de tungsteno es crucial para sus propiedades. Por ejemplo, la forma cristalina y la morfología del óxido de tungsteno preparado por descomposición térmica de paratungstato de amonio o método hidrotermal se pueden optimizar de acuerdo con los requisitos ambientales específicos. Además, la fluctuación de los precios del tungsteno también afecta su proceso de comercialización en el campo de la protección del medio ambiente, por lo que la tecnología de síntesis de bajo costo ha atraído mucha atención.

### 9.2.1 Aplicación de óxido de tungsteno en la purificación del aire

La contaminación del aire es un problema global, y el óxido de tungsteno juega

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un papel importante en la purificación del aire debido a sus propiedades fotocatalíticas y propiedades sensibles a los gases. Puede descomponer eficazmente compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NOx) y otros gases nocivos, proporcionando apoyo técnico para la mejora de la calidad del aire interior y exterior.

En la purificación fotocatalítica del aire, el óxido de tungsteno absorbe la energía luminosa y forma pares electrón-hueco, que a su vez producen especies reactivas de oxígeno (p. ej.,  $\cdot\text{OH}$  y  $\text{O}_2^-$ ), estas especies pueden oxidar y descomponer los contaminantes en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$ . Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno producidas por la oxidación del polvo de tungsteno pueden descomponer eficazmente los COV como el formaldehído y el benceno bajo la irradiación ultravioleta o de luz visible. Además, los estudios de conocimiento del tungsteno han demostrado que el dopaje de molibdeno o cobre de tungsteno puede mejorar aún más su eficiencia fotocatalítica.

La estructura porosa del óxido de tungsteno es clave para su rendimiento de purificación del aire. Por ejemplo, las nanohojas de óxido de tungsteno sintetizadas por el método solvotérmico tienen una alta área de superficie, que puede adsorber más moléculas contaminantes, mejorando así la eficiencia de descomposición. Además, los materiales compuestos desarrollados por el tungsteno (como la heterounión del óxido de tungsteno y el  $\text{TiO}_2$ ) pueden prolongar la vida útil de los portadores fotogenerados y mejorar aún más el efecto de purificación.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se convierte en películas delgadas o recubrimientos para su uso en purificadores de aire o materiales de construcción. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno basados en la oxidación de filamentos de tungsteno pueden descomponer continuamente los contaminantes a la luz del sol y son adecuados para ventanas o paredes. Además, tungsteno News informó que también se está explorando su potencial en la purificación de gases de escape de automóviles, por ejemplo, mediante la combinación con ferrotungsteno para tratar los NOx.

Sin embargo, la actividad fotocatalítica del óxido de tungsteno está limitada por su banda prohibida y su tasa de recombinación de portadores. Para ello, los investigadores trataron de optimizar sus propiedades mediante el dopaje de tungsteno con cesio o la modificación de la superficie. Además, su baja actividad en condiciones de poca luz limita la amplia gama de aplicaciones en interiores, y se necesita un mayor desarrollo de variantes de óxido de tungsteno que respondan a la luz visible, como el óxido de tungsteno amarillo.

### 9.2.2 Aplicación de óxido de tungsteno en el tratamiento de aguas residuales

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El tratamiento de aguas residuales es una parte importante de la protección del medio ambiente, y el óxido de tungsteno tiene un excelente rendimiento en la eliminación de contaminantes orgánicos, iones de metales pesados y tintes en el agua debido a su capacidad de degradación fotocatalítica y rendimiento de adsorción. Brinda apoyo técnico para el uso sostenible de los recursos hídricos.

En el tratamiento fotocatalítico de aguas residuales, el óxido de tungsteno descompone los contaminantes orgánicos a través de una reacción inducida por la luz. Por ejemplo, sus nanopartículas pueden oxidar colorantes como la rodamina B o el azul de metileno a pequeñas moléculas inofensivas cuando se exponen a la luz. Los resultados mostraron que las nanovarillas de óxido de tungsteno preparadas a partir de precursores de ácido tungstico exhibieron una excelente eficiencia de degradación bajo luz visible. Además, los datos de tungsteno muestran que la actividad fotocatalítica puede aumentarse en más del 30% después de combinarse con disulfuro de tungsteno.

Las propiedades de adsorción del óxido de tungsteno también desempeñan un papel en el tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, su estructura porosa permite la adsorción eficiente de iones de metales pesados (por ejemplo,  $Pb^{2+}$  y  $Cd^{2+}$ ) y la eliminación por coordinación de superficie o intercambio iónico. Además, el compuesto de plástico de tungsteno y óxido de tungsteno puede mejorar aún más la capacidad de adsorción, que es adecuada para el tratamiento de aguas residuales de alta concentración.

En aplicaciones prácticas, la estabilidad del óxido de tungsteno es una de sus ventajas. Por ejemplo, el rendimiento fotocatalítico del óxido de tungsteno preparado a base de polvo esférico de tungsteno en aguas residuales ácidas puede durar varios ciclos. Sin embargo, la eficiencia fotocatalítica del óxido de tungsteno está limitada por la recombinación de portadores y el rango de absorción de luz. Con este fin, los investigadores intentaron mejorar sus propiedades mediante el dopaje de oro de tungsteno o la construcción de heterouniones de tungstato. Además, es difícil de reciclar y reutilizar, y es necesario desarrollar tecnologías de inmovilización, como la carga de óxido de tungsteno en un sustrato de aguja de tungsteno.

### 9.3 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de los materiales inteligentes

La aplicación del óxido de tungsteno en el campo de los materiales inteligentes se refleja principalmente en sus propiedades electrocrómicas y sensibles a los gases. Estas características los hacen valiosos en ventanas, sensores y pantallas inteligentes, lo que impulsa el desarrollo de tecnologías inteligentes.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En los materiales inteligentes, la versatilidad del óxido de tungsteno se deriva de su estructura electrónica ajustable y sus propiedades ópticas. Por ejemplo, su comportamiento electrocrómico permite cambios de color en respuesta a un campo eléctrico aplicado, mientras que sus propiedades de detección de gases lo hacen altamente sensible a gases específicos. Además, los estudios de productos de tungsteno han demostrado que la energía nanoquímica del óxido de tungsteno puede mejorar significativamente su velocidad de respuesta y estabilidad.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno es crucial para su rendimiento. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno preparadas por pulverización catódica o deposición química de vapor (CVD) tienen una excelente uniformidad y adherencia para dispositivos inteligentes. Además, los avances en la tecnología del tungsteno también han impulsado su exploración en electrónica flexible.

### 9.3.1 Aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos electrocrómicos

Los dispositivos electrocrómicos (ECD) se utilizan ampliamente en ventanas y pantallas inteligentes porque pueden cambiar de color bajo un campo eléctrico aplicado. El óxido de tungsteno se ha convertido en un material convencional en este campo debido a sus excelentes propiedades electrocrómicas. Su color puede cambiar de azul claro a azul oscuro, con un tiempo de respuesta corto y un ciclo de vida prolongado.

El mecanismo electrocrómico del óxido de tungsteno se basa en la intercalación de iones y la transferencia de electrones. Por ejemplo, cuando  $\text{Li}^+$  o  $\text{H}^+$  está incrustado, la reacción es:  $\text{WO}_3 + x\text{M}^+ + x\text{e}^- \rightleftharpoons \text{M}_x\text{WO}_3$  (M es Li o H). Esta reacción reversible le permite ajustar dinámicamente la transmitancia de luz en la ventana inteligente, ahorrando el consumo de energía del edificio. Además, los estudios académicos de tungsteno han demostrado que la estructura porosa del óxido de tungsteno puede acelerar la difusión de iones y mejorar la eficiencia de la decoloración.

En la práctica, la preparación de la película de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, el óxido de tungsteno, que se genera por deposición electroquímica sobre un sustrato metálico de tungsteno, tiene un alto contraste óptico. Además, el tratamiento térmico asistido por calentador de tungsteno puede optimizar su estructura cristalina y mejorar aún más su rendimiento.

Las ventajas del óxido de tungsteno también incluyen su estabilidad. En los electrolitos de tungstato de sodio, por ejemplo, los ciclos de cambio de color

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pueden llegar miles de veces. Además, Tungsten News señaló que está surgiendo su aplicación en ECD flexibles, como las pantallas portátiles.

Sin embargo, todavía hay margen de mejora en la velocidad de respuesta y la gama de colores del óxido de tungsteno. Con este fin, los investigadores intentaron optimizar sus propiedades dopando óxido de tungsteno púrpura o combinándolo con caucho de tungsteno.

### 9.3.2 Aplicación de óxido de tungsteno en sensores de gas

Los sensores de gas se utilizan para detectar gases nocivos en el medio ambiente, y el óxido de tungsteno tiene importantes aplicaciones en este campo debido a su alta sensibilidad y selectividad. Puede detectar eficazmente gases como  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{CO}$ , y es adecuado para la seguridad industrial y el control ambiental.

El mecanismo de detección de gas del óxido de tungsteno se basa en la adsorción de la superficie y los cambios de conductancia. Por ejemplo, cuando el  $\text{NO}_2$  se adsorbe en la superficie del óxido de tungsteno, sus electrones atrapados provocan un aumento de la resistencia, lo que da lugar a una señal detectable. Los estudios han demostrado que los nanocables de óxido de tungsteno azul pueden tener un límite de detección de  $\text{NO}_2$  hasta ppb debido a su alta superficie. En la práctica, la morfología del óxido de tungsteno tiene un efecto significativo en sus propiedades. Por ejemplo, los nanoarrays de óxido de tungsteno generados por deposición de vapor en filamentos de tungsteno tienen propiedades de respuesta y recuperación rápidas.

Las ventajas del óxido de tungsteno también incluyen la estabilidad a altas temperaturas. Por ejemplo, los sensores de óxido de tungsteno sobre un sustrato de partículas de tungsteno son estables a  $300^\circ\text{C}$  y son adecuados para entornos industriales. Además, los datos de tungsteno muestran que su resistencia a las perturbaciones de la humedad es mejor que la de muchos óxidos metálicos. Sin embargo, la deriva de referencia y la estabilidad a largo plazo del óxido de tungsteno aún deben mejorarse. Para ello, los investigadores intentan mejorar sus propiedades mediante la modificación de la superficie o en combinación con materiales de protección contra la radiación.

### 9.4 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la información electrónica

Como material con excelentes propiedades semiconductoras, el óxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ) ha demostrado una amplia gama de posibilidades de aplicación en el campo de la información electrónica. Su alta estabilidad química, banda prohibida moderada (2,6–3,0 eV) y buenas propiedades eléctricas lo hacen ideal para

transistores de efecto de campo, dispositivos de memoria y otros componentes electrónicos. Con el rápido desarrollo de la tecnología de la información, el papel del óxido de tungsteno en los dispositivos electrónicos de alto rendimiento se ha vuelto cada vez más prominente.

En el campo de la información electrónica, la versatilidad del óxido de tungsteno se deriva de su estructura electrónica sintonizable y sus capacidades de fabricación de película delgada. Por ejemplo, sus propiedades semiconductoras de tipo n le permiten transportar electrones de manera eficiente, mientras que las estructuras nanoestructuradas como los nanocables o las películas delgadas mejoran significativamente el rendimiento del dispositivo. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que la tecnología de dopaje y composición de óxido de tungsteno puede optimizar aún más su conductividad y estabilidad para cumplir con los altos requisitos de los dispositivos electrónicos.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en sus propiedades. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno producidas por deposición química de vapor o pulverización catódica son adecuadas para dispositivos microelectrónicos debido a su alta uniformidad y compacidad. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han impulsado su exploración en electrónica flexible y dispositivos portátiles, y el precio fluctuante del tungsteno también ha llevado a los investigadores a desarrollar métodos de síntesis de bajo costo.

#### 9.4.1 Aplicación de óxido de tungsteno en transistores de efecto de campo

Los transistores de efecto de campo (FET) son los componentes principales de los dispositivos electrónicos modernos y se utilizan ampliamente en amplificadores, interruptores y circuitos integrados. Debido a sus excelentes propiedades semiconductoras y su alta movilidad de portadores, el óxido de tungsteno ha demostrado un potencial significativo como material de canal o medio de puerta en transistores de efecto de campo. Sus aplicaciones no solo mejoran el rendimiento de los dispositivos, sino que también impulsan el desarrollo de dispositivos electrónicos de bajo consumo y altamente integrados.

En los transistores de efecto de campo, el papel del óxido de tungsteno se refleja principalmente en su capacidad para actuar como una capa de canal. Como semiconductor de tipo n, tiene una banda prohibida moderada y puede regular eficazmente el flujo de electrones cuando se aplica un voltaje de puerta, lo que permite una función de conmutación. Por ejemplo, las películas delgadas de óxido de tungsteno generadas por el óxido de tungsteno metálico térmico pueden tener

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una movilidad portadora de  $10\text{--}20\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ , que es mucho mayor que la del silicio amorfo tradicional. Además, los estudios de conocimiento de tungsteno han demostrado que la estructura de nanocables del óxido de tungsteno puede reducir significativamente el efecto de dispersión y mejorar aún más la movilidad debido a sus características de transporte unidimensionales.

El uso de óxido de tungsteno en transistores de efecto de campo también se beneficia de su alta constante dieléctrica (alrededor de 20–50), lo que permite su uso como dieléctrico de puerta para reemplazar el  $\text{SiO}_2$  convencional. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno preparadas por deposición de capa atómica (ALD) tienen baja corriente de fuga y alto voltaje de ruptura, lo que puede reducir el grosor de la puerta y mejorar la velocidad de conmutación del dispositivo y la eficiencia energética. Además, la tecnología de dopaje desarrollada por el tungsteno (por ejemplo, el dopaje con molibdeno) puede optimizar aún más sus propiedades dieléctricas.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno es crucial para su rendimiento. Por ejemplo, las nanovarillas de óxido de tungsteno sintetizadas por el método solvotérmico exhiben excelentes relaciones de encendido/apagado (hasta más de  $10^6$ ) en transistores de efecto de campo, gracias a su alta cristalinidad y baja densidad de defectos. Además, la estructura porosa del óxido de tungsteno generada por la oxidación del polvo de tungsteno puede aumentar el área superficial del canal y mejorar aún más la respuesta actual.

La ventaja del óxido de tungsteno también se refleja en su compatibilidad con los procesos existentes. Por ejemplo, las películas delgadas se pueden depositar sobre un sustrato de silicio por pulverización catódica o evaporación, integrándose perfectamente con el proceso CMOS. Además, los datos de tungsteno muestran que el óxido de tungsteno conserva un excelente rendimiento en preparaciones a baja temperatura, lo que lo hace potencial en el campo de la electrónica flexible, como los transistores flexibles basados en plástico de tungsteno.

En casos específicos, el óxido de tungsteno se ha utilizado para desarrollar transistores de película delgada (TFT) de alto rendimiento. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno basadas en la oxidación de filamentos de tungsteno exhiben una respuesta rápida y una alta estabilidad en las placas posteriores de la pantalla. Además, [tungsten news](#) informó que su aplicación en dispositivos electrónicos transparentes, como FET totalmente transparentes, también está en aumento, para la próxima generación de tecnología de visualización.

Sin embargo, el óxido de tungsteno todavía enfrenta algunos desafíos en los transistores de efecto de campo. Por ejemplo, su conductividad inherentemente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

baja puede provocar altas pérdidas resistivas, lo que afecta la eficiencia del dispositivo. Para ello, los investigadores intentaron mejorar la conductividad mediante el dopaje de tungsteno, cobre o tungsteno plateado. Además, los defectos de la interfaz pueden inducir una deriva de voltaje umbral, que debe mejorarse mediante pasivación superficial o combinación con tungstato de calcio.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la nanoestructura de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los nanoarrays de óxido de tungsteno cultivados en el sustrato de agujas de tungsteno pueden mejorar significativamente la capacidad de manipular campos eléctricos debido a su alta relación de aspecto. Además, los avances en la tecnología de tungsteno están impulsando su uso en dispositivos de alta frecuencia, como los FET de RF, para las comunicaciones 5G.

La aplicación de óxido de tungsteno en transistores de efecto de campo también es respetuosa con el medio ambiente. En comparación con los materiales que contienen elementos raros, sus materias primas son abundantes (como la wolframita) y el proceso de producción es más respetuoso con el medio ambiente. Además, la creciente demanda de tungsteno ha llevado a los investigadores a explorar métodos de preparación de bajo costo, como la síntesis directa de películas de óxido de tungsteno utilizando paratungstato de amonio. En el futuro, con la mejora de la miniaturización e integración de dispositivos, el papel del óxido de tungsteno en los transistores de efecto de campo será más prominente. Su potencial en dispositivos electrónicos de alto rendimiento y baja potencia ofrece nuevas oportunidades de desarrollo en el campo de la información electrónica.

#### 9.4.2 Aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos de memoria

Los dispositivos de memoria están en el corazón del campo de la información electrónica, abarcando tanto la memoria no volátil (por ejemplo, la memoria flash) como las tecnologías de memoria emergentes (por ejemplo, la memoria resistiva). El óxido de tungsteno tiene un importante potencial de aplicación en dispositivos de memoria debido a sus características de conmutación de resistencia, respuesta rápida y alta estabilidad. Sus propiedades fisicoquímicas únicas lo convierten en un material candidato para la próxima generación de tecnología de almacenamiento de alta densidad.

En los dispositivos de memoria, el óxido de tungsteno se utiliza principalmente en la memoria resistiva de acceso aleatorio (RRAM). RRAM cambia entre estados de alta y baja resistencia en función del estado de resistencia del material para permitir el almacenamiento de datos. El mecanismo de cambio de resistencia del óxido de tungsteno se debe a la migración de vacantes de oxígeno y la formación

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de filamentos conductores. Por ejemplo, bajo un campo eléctrico aplicado, los iones de oxígeno se mueven en una película delgada de óxido de tungsteno, formando una ruta conductora que permite una operación de "escritura". Los resultados muestran que el óxido de tungsteno preparado por precursor de ácido tungstico tiene una relación de conmutación estable (hasta más de  $10^3$ ).

La nanoestructura del óxido de tungsteno mejora significativamente su rendimiento de almacenamiento. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno generadas por deposición electroquímica pueden aumentar la concentración de vacantes de oxígeno debido a su alta área superficial y densidad de defectos, mejorando así la velocidad de conmutación y la durabilidad. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que la película porosa de óxido de tungsteno presenta un bajo voltaje de funcionamiento ( $<1$  V) en la RRAM, lo que la hace adecuada para aplicaciones de baja potencia.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en sus propiedades. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno depositadas en electrodos de metal de tungsteno por pulverización catódica con magnetrón tienen una alta uniformidad y bajas tasas de defectos, y sus ventanas de almacenamiento se pueden mantener durante miles de ciclos. Además, la tecnología compuesta desarrollada por el tungsteno (por ejemplo, en combinación con ferrotungsteno) puede mejorar la estabilidad de los filamentos conductores.

Las ventajas del óxido de tungsteno en los dispositivos de memoria también incluyen su estabilidad a altas temperaturas. Por ejemplo, las unidades de almacenamiento de óxido de tungsteno basadas en sustratos de grano de tungsteno pueden funcionar a  $200$  ° C y son adecuadas para entornos hostiles. Además, los datos de tungsteno muestran que tiene una velocidad de borrado más rápida ( $<10$  ns) y una mayor densidad de almacenamiento que la memoria flash tradicional.

En casos específicos, el óxido de tungsteno se ha utilizado para desarrollar matrices RRAM de alta densidad. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno preparadas por recocido asistido por calentador de tungsteno exhiben una excelente capacidad antiinterferente en estructuras de matriz cruzada. Además, Tungsten News informa de que está surgiendo su potencial en la computación neuromórfica, como los dispositivos sinápticos analógicos para chips de inteligencia artificial.

Sin embargo, el óxido de tungsteno todavía enfrenta desafíos en los dispositivos de memoria. Por ejemplo, la aleatoriedad de su conmutación de resistencia puede dar lugar a inconsistencias en el almacenamiento de datos. Para ello, los investigadores intentaron optimizar el rendimiento dopando cesio tungsteno o

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

introduciendo una capa tampón de tungstato. Además, puede producirse fatiga después de un ciclo a largo plazo, que debe mejorarse mediante ingeniería de interfaz (por ejemplo, compuesto con oro de tungsteno).

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de estructura multicapa de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, las heterouniones de óxido de tungsteno/disulfuro de tungsteno preparadas por ALD pueden mejorar significativamente la consistencia de la conmutación. Además, los avances en la tecnología de tungsteno han impulsado su uso en el almacenamiento tridimensional, como la RRAM vertical, para el almacenamiento de ultra alta densidad.

La aplicación de óxido de tungsteno en dispositivos de memoria también tiene ventajas económicas. Sus fuentes de materias primas son abundantes (como la scheelita) y el costo de producción es controlable. Además, la creciente demanda de tungsteno ha llevado a los investigadores a explorar métodos de preparación industrial, como la síntesis directa de capas de almacenamiento de óxido de tungsteno utilizando metatungstato de amonio.

## 9.5 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la fabricación de maquinaria

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) es un material con excelentes propiedades que muestra su valor único en el campo de la ingeniería mecánica. Su alta dureza, resistencia a altas temperaturas y estabilidad química lo hacen ideal para recubrimientos de herramientas y componentes resistentes al desgaste. A medida que aumenta la demanda de herramientas de alta eficiencia y larga vida útil en la fabricación moderna, el uso de óxido de tungsteno se está expandiendo gradualmente, proporcionando un apoyo importante para mejorar la maquinabilidad y la durabilidad del equipo.

En ingeniería mecánica, la aplicación de óxido de tungsteno depende principalmente de sus propiedades fisicoquímicas. Como óxido de metal de transición, su estructura cristalina le confiere una alta resistencia mecánica y resistencia a la corrosión. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que las propiedades del óxido de tungsteno pueden optimizarse aún más para satisfacer las necesidades de los entornos industriales exigentes mediante tecnologías de dopaje o compuestos. Ya sea como material de recubrimiento o como aditivo funcional, el óxido de tungsteno puede mejorar significativamente la durabilidad y la eficiencia de procesamiento de los componentes mecánicos.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un impacto significativo en sus propiedades. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno producidos por pulverización térmica o deposición química de vapor

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(CVD) tienen una alta adherencia y homogeneidad, lo que los hace adecuados para cortes de alta velocidad y condiciones de trabajo pesado. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han llevado a su uso en la fabricación de precisión, y la fluctuación de los precios del tungsteno ha llevado a los investigadores a desarrollar métodos de síntesis más económicos, como la preparación directa de óxido de tungsteno utilizando paratungstato de amonio.

### 9.5.1 Aplicación de óxido de tungsteno en recubrimientos de herramientas

El recubrimiento de herramientas es una tecnología clave en la fabricación de máquinas para mejorar el rendimiento de corte y prolongar la vida útil de la herramienta, y el óxido de tungsteno tiene ventajas significativas en esta área debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad térmica. Puede reducir efectivamente la fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo, reducir la temperatura de corte y, por lo tanto, mejorar la eficiencia del mecanizado y la calidad de la superficie.

En los recubrimientos de herramientas, el óxido de tungsteno generalmente se aplica como una película delgada a un sustrato de carburo o acero de alta velocidad. Su alta dureza (cercana a 9 en la escala de Mohs) lo hace resistente al desgaste y a la deformación durante el corte. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno depositados en herramientas de metal de tungsteno por deposición física de vapor (PVD) tienen una dureza superficial de 2000–2500 HV, que es mucho más alta que la de las herramientas sin recubrimiento. Además, los estudios de conocimiento de tungsteno han demostrado que el bajo coeficiente de fricción del óxido de tungsteno (alrededor de 0.4–0.6) puede reducir significativamente las fuerzas de corte y prolongar la vida útil de la herramienta.

La resistencia a altas temperaturas del óxido de tungsteno es otra ventaja en los recubrimientos de herramientas. En el corte a alta velocidad, la temperatura de la superficie de la herramienta puede alcanzar más de 800 ° C, mientras que el punto de fusión del óxido de tungsteno es de hasta 1473 ° C y puede mantener la estabilidad estructural a altas temperaturas. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno producidos por la oxidación del polvo de tungsteno son eficaces para resistir la fatiga térmica y el desgaste oxidativo al mecanizar aleaciones de titanio o aceros inoxidable.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se combina con otros materiales para optimizar el rendimiento. Por ejemplo, un recubrimiento compuesto con cobre de tungsteno o ferrotungsteno no solo conserva la alta dureza del óxido de tungsteno, sino que también mejora la conductividad térmica y reduce la acumulación de calor en la zona de corte. Además, la tecnología de dopaje

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desarrollada por el tungsteno (por ejemplo, molibdeno) puede mejorar aún más la dureza del recubrimiento y evitar fracturas frágiles.

El proceso de preparación del recubrimiento de óxido de tungsteno es fundamental para su rendimiento. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno generadas por pulverización catódica de magnetrón tienen una alta compacidad y uniformidad, y su grosor se puede controlar con precisión entre 1 y 5  $\mu\text{m}$ , lo que las hace adecuadas para el mecanizado de precisión. Además, el recubrimiento de óxido de tungsteno generado por la oxidación del filamento de tungsteno exhibe excelentes propiedades antiadherentes durante el torneado y el fresado, lo que reduce la adherencia del material de la pieza de trabajo.

En casos específicos, las herramientas recubiertas de óxido de tungsteno se han utilizado ampliamente en la fabricación aeroespacial y automotriz. Por ejemplo, al mecanizar aleaciones de aluminio, las herramientas recubiertas de óxido de tungsteno basadas en sustratos de agujas de tungsteno pueden reducir la rugosidad de la superficie en más del 20%. Además, tungsteno news informó que está surgiendo su aplicación en el corte en seco a alta velocidad, reduciendo la dependencia del refrigerante, en línea con la tendencia de la fabricación ecológica.

Sin embargo, los recubrimientos de óxido de tungsteno también presentan algunos desafíos. Por ejemplo, es frágil y puede despegarse durante el corte pesado. Con este fin, los investigadores intentaron mejorar la resistencia mediante el dopaje de plata, [tungsteno](#) o la introducción de una capa tampón de plástico de tungsteno. Además, su adhesión al sustrato debe optimizarse aún más, y la pulverización térmica o la deposición asistida por haz de iones pueden mejorar eficazmente la adhesión.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de estructura multicapa de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los recubrimientos compuestos de óxido de tungsteno/disulfuro de tungsteno combinan alta dureza y autolubricación para aumentar significativamente la vida útil de la herramienta. Además, los datos de tungsteno muestran que sobresale en el procesamiento de materiales superduros, como la cerámica, lo que impulsa su uso en la fabricación de alta gama.

El uso de óxido de tungsteno en los recubrimientos de herramientas también ofrece ventajas económicas. Sus materias primas son abundantes (como la wolframita) y el costo de producción es controlable. Con el crecimiento de la demanda del mercado de tungsteno, la posición de las herramientas recubiertas de óxido de tungsteno en la construcción de máquinas se consolidará aún más, proporcionando un soporte confiable para un mecanizado eficiente.

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

### 9.5.2 Aplicación de óxido de tungsteno en piezas resistentes al desgaste

Los componentes resistentes al desgaste son componentes clave en la construcción de máquinas que están sujetos a una alta fricción y desgaste, como los rodamientos, los engranajes y los sellos. El óxido de tungsteno tiene un importante potencial de aplicación en piezas resistentes al desgaste debido a su alta dureza, resistencia a la corrosión y resistencia a la fatiga. Prolonga significativamente la vida útil de los componentes, reduce los costos de mantenimiento y es adecuado para maquinaria pesada y condiciones extremas.

En componentes resistentes al desgaste, el óxido de tungsteno se utiliza a menudo en forma de revestimientos o compuestos. Su alta dureza y sus propiedades de baja fricción lo hacen resistente al desgaste abrasivo y al desgaste adhesivo. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno, que se crean mediante pulverización de plasma sobre un sustrato metálico de tungsteno, son de 3 a 5 veces más resistentes al desgaste que los aceros convencionales. Además, los estudios académicos de tungsteno han demostrado que la estructura cristalina del óxido de tungsteno puede permanecer estable bajo alta tensión, evitando la descamación de la superficie.

La resistencia a la corrosión del óxido de tungsteno es otra gran ventaja en las piezas resistentes al desgaste. En ambientes húmedos o ácidos, su resistencia a la oxidación y al ataque químico es superior a la de muchos materiales metálicos. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno producidos por oxidación de partículas de tungsteno funcionan bien en equipos en alta mar y son efectivos para resistir la corrosión por niebla salina. Además, el óxido de tungsteno recocido con un calentador de tungsteno asistido por un calentador de tungsteno tiene una mayor densidad, lo que mejora aún más la resistencia a la corrosión.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se combina con otros materiales para optimizar el rendimiento. Por ejemplo, un recubrimiento compuesto con tungstato de calcio exhibe una excelente resistencia al impacto en piezas resistentes al desgaste y es adecuado para dientes de excavadoras. Además, la mezcla de óxido de tungsteno/polvo de tungsteno esférico desarrollada por Tungsten se prepara mediante pulvimetalurgia, que tiene alta densidad y uniformidad, y es adecuada para rodamientos de alta resistencia.

El proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un efecto significativo en su resistencia al desgaste. Por ejemplo, un recubrimiento de óxido de tungsteno generado por el revestimiento láser forma una unión metalúrgica al sustrato con una fuerza de unión de más de 500 MPa. Además, se puede sinterizar una mezcla de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

masilla de tungsteno y óxido de tungsteno para hacer un revestimiento resistente al desgaste que sea adecuado para su uso dentro del molino.

En casos concretos, el óxido de tungsteno se ha utilizado para mejorar la durabilidad de la maquinaria de construcción. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno basados en sustratos de oro de tungsteno prolongan la vida útil en más del 50% en los engranajes de los equipos de minería. Además, las noticias de tungsteno informan que su uso en componentes resistentes al desgaste a alta temperatura, como los álabes de las turbinas, está en aumento para satisfacer las necesidades de la industria aeroespacial.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también presenta desafíos en los componentes resistentes al desgaste. Por ejemplo, su fragilidad puede provocar grietas en impactos elevados. Para ello, los investigadores intentaron mejorar la resistencia mediante el dopaje de tungstato o la introducción de una capa tampón de caucho de tungsteno. Además, su costo de procesamiento es alto y el proceso de preparación debe optimizarse para lograr una aplicación a gran escala.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la microestructura del óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los recubrimientos compuestos de óxido de tungsteno/tungstato de sodio se tratan térmicamente para formar una estructura de gradiente, lo que mejora significativamente la resistencia a la fatiga. Además, los datos de tungsteno muestran que su resistencia al desgaste en condiciones lubricadas es mejor que la de muchos materiales cerámicos, lo que impulsa su uso en piezas deslizantes.

La aplicación de óxido de tungsteno en piezas resistentes al desgaste también es respetuosa con el medio ambiente. Sus materias primas son abundantes (como la scheelita) y el proceso de producción es controlable. Con la expansión del mercado de tungsteno, el óxido de tungsteno aumentará aún más su posición en la construcción de máquinas, proporcionando una solución confiable para componentes altamente duraderos.

## 9.6 Óxido de tungsteno en aplicaciones biomédicas

Como material multifuncional, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) muestra un potencial de aplicación cada vez más importante en el campo biomédico. Sus propiedades fisicoquímicas únicas, como la alta biocompatibilidad, la capacidad de respuesta óptica y la actividad electroquímica, le otorgan ventajas significativas en biosensores, terapia fototérmica y otras tecnologías médicas. Con la creciente demanda de materiales altamente sensibles y poco invasivos en biomedicina, la investigación y aplicación del óxido de tungsteno se está expandiendo rápidamente.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En biomedicina, las propiedades semiconductoras del óxido de tungsteno son su principal fortaleza. Su banda prohibida (alrededor de 2,6-3,0 eV) le permite absorber la luz visible y participar en reacciones fotoeléctricas, mientras que las nanoestructuras como las nanopartículas o las películas delgadas aumentan significativamente su área superficial y reactividad. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que las superficies de óxido de tungsteno pueden funcionalizarse para mejorar la biocompatibilidad, lo que lo hace adecuado para aplicaciones in vitro e in vivo.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en sus propiedades. Por ejemplo, los nanomateriales de óxido de tungsteno sintetizados por métodos hidrotermales o solvotérmicos son adecuados para las necesidades biomédicas debido a su alta pureza y morfología controlable. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han impulsado su exploración en dispositivos médicos portátiles, y la fluctuación del precio del tungsteno ha llevado a los investigadores a desarrollar métodos de síntesis de bajo costo, como la preparación directa de óxido de tungsteno utilizando paratungstato de amonio.

### 9.6.1 Aplicación del óxido de tungsteno en biosensores

Los biosensores son herramientas importantes en el campo biomédico para detectar biomarcadores, monitorear estados de enfermedad y respaldar la medicina personalizada. Debido a su alta sensibilidad, respuesta rápida y estabilidad electroquímica, el óxido de tungsteno ha demostrado un excelente rendimiento como material sensible en biosensores. Puede detectar eficazmente una variedad de biomoléculas como la glucosa, las enzimas y el ADN, proporcionando un apoyo fiable para el diagnóstico de enfermedades y la gestión de la salud.

En los biosensores, el papel del óxido de tungsteno se basa principalmente en sus propiedades electroquímicas y optoelectrónicas. Como semiconductor de tipo n, la transferencia de carga se produce en su superficie cuando entra en contacto con el analito de interés, lo que resulta en un cambio en la conductividad o la señal óptica. Por ejemplo, las nanopelículas de óxido de tungsteno generadas por deposición electroquímica en electrodos metálicos de tungsteno pueden tener límites de detección de hasta el nivel  $\mu\text{M}$ . Además, los estudios de conocimiento de tungsteno han demostrado que la estructura de nanocables del óxido de tungsteno puede mejorar significativamente la sensibilidad de los sensores debido a su alta área de superficie y rápida capacidad de transporte de electrones.

La estructura porosa del óxido de tungsteno es su ventaja clave en los biosensores.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno sintetizadas por método solvotérmico tienen abundantes sitios activos que pueden adsorber eficazmente moléculas de enzimas (por ejemplo, glucosa oxidasa) para una detección altamente selectiva. Además, la película porosa de óxido de tungsteno generada por la oxidación del polvo de tungsteno exhibe una excelente velocidad de respuesta al detectar  $H_2O_2$ , lo que se debe a su rápida reacción redox.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se combina con otros materiales para optimizar el rendimiento. Por ejemplo, el electrodo compuesto formado con cobre de tungsteno no solo conserva la alta sensibilidad del óxido de tungsteno, sino que también mejora la conductividad eléctrica, lo que lo hace adecuado para el monitoreo en tiempo real. Además, la tecnología de dopaje desarrollada por el tungsteno (por ejemplo, dopada con tungsteno plateado) puede mejorar aún más sus capacidades antiinterferentes y reducir las señales de falsos positivos en matrices biológicas complejas.

El proceso de preparación de los biosensores de óxido de tungsteno es fundamental para su rendimiento. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno preparadas por pulverización sobre sustratos de filamentos de tungsteno tienen una alta uniformidad y estabilidad, y su rango de detección puede cubrir concentraciones de biomoléculas de nM a mM. Además, los datos de tungsteno muestran que el óxido de tungsteno permanece activo en ambientes ácidos o neutros, lo que lo hace adecuado para el análisis de sangre o fluidos corporales.

En casos concretos, el óxido de tungsteno se ha utilizado en el desarrollo de sensores de glucosa portátiles. Por ejemplo, los sensores de óxido de tungsteno basados en electrodos de aguja de tungsteno muestran una respuesta rápida (<5 segundos) y una alta repetibilidad en el control de la diabetes. Además, Tungsten News informó que su potencial en la detección de marcadores de células cancerosas, como CEA, está emergiendo, proporcionando una nueva vía para el diagnóstico temprano.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también enfrenta desafíos en los biosensores. Por ejemplo, la superficie puede bioincrustarse con el tiempo, lo que afecta la precisión de la inspección. Con este fin, los investigadores intentaron mejorar la resistencia a la contaminación mediante la modificación de la superficie (por ejemplo, la PEGificación) o la composición con plástico de tungsteno. Además, su selectividad puede ser insuficiente en entornos biológicos complejos, y necesita ser optimizada mediante el dopaje de tungstato de calcio o la construcción de heterouniones.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la nanoestructura de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los nanoarrays compuestos de óxido de tungsteno/disulfuro de tungsteno pueden mejorar significativamente el límite de detección y la velocidad de respuesta debido a su alta área de superficie específica y efecto sinérgico. Además, el crecimiento de la demanda de tungsteno está impulsando su uso en sensores portátiles, como dispositivos de bajo costo basados en materia prima de wolframita.

La aplicación de óxido de tungsteno en biosensores también tiene ventajas de bioseguridad. Su baja toxicidad y degradabilidad lo hacen adecuado para su uso in vivo, como dispositivos de monitorización implantables. Con el avance de la tecnología biomédica, el óxido de tungsteno desempeñará un papel más importante en la medicina de precisión y el monitoreo de la salud.

### 9.6.2 Aplicación de óxido de tungsteno en la terapia fototérmica

La terapia fototérmica (PTT) es una terapia no invasiva que utiliza los efectos fototérmicos para matar las células cancerosas, y el óxido de tungsteno tiene un importante potencial de aplicación en este campo debido a su excelente eficiencia de conversión fototérmica y su capacidad de absorción en el infrarrojo cercano (NIR). Puede convertir la energía luminosa en energía térmica bajo la exposición a la luz y alcanzar una temperatura alta local para matar tumores, lo que proporciona una opción eficiente para el tratamiento del cáncer.

En la terapia fototérmica, las propiedades fototérmicas del óxido de tungsteno se deben a sus fuertes propiedades de absorción NIR (700–1100 nm). Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno sintetizadas por método hidrotermal pueden lograr una eficiencia de conversión fototérmica del 40–50% bajo irradiación láser de 808 nm, que es mucho mayor que la de los nanomateriales de oro tradicionales. Además, los estudios académicos de tungsteno han demostrado que el defecto de oxígeno del óxido de tungsteno puede mejorar su efecto de resonancia de plasmón de superficie local (LSPR), lo que puede mejorar aún más el rendimiento fototérmico.

La nanoestructura del óxido de tungsteno es su ventaja clave en la terapia fototérmica. Por ejemplo, las nanovarillas de óxido de tungsteno producidas por oxidación de partículas de tungsteno pueden aumentar rápidamente a 50–60 °C debido a su alta relación de aspecto y actividad superficial, que es suficiente para inducir la apoptosis de las células tumorales. Además, las nanoláminas de óxido de tungsteno preparadas por precursores de ácido tungstico mostraron una buena dispersión y estabilidad fototérmica in vivo.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se modifica en la superficie para

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizar la biocompatibilidad. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno recubiertas con polietilenglicol (PEG) o caucho de tungsteno pueden circular en la sangre durante largos períodos de tiempo sin una eliminación rápida. Además, el óxido de tungsteno sintetizado con la ayuda de un calentador de tungsteno tiene una mayor cristalinidad, lo que mejora aún más la eficiencia fototérmica.

Las ventajas del óxido de tungsteno en la terapia fototérmica también incluyen su versatilidad. Por ejemplo, los nanocompuestos de óxido de tungsteno formados por cesio dopante y tungsteno no solo tienen excelentes propiedades fototérmicas, sino que también se pueden utilizar como agentes de contraste en imágenes de TC, logrando la integración del diagnóstico y el tratamiento. Además, los estudios de los productos de tungsteno han demostrado que su combinación con materiales de protección contra la radiación puede utilizarse para mejorar los efectos de la radioterapia.

En casos concretos, el óxido de tungsteno se ha utilizado en experimentos de terapia fototérmica en modelos de ratón. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno basadas en polvo de tungsteno esférico pueden elevar la temperatura del sitio del tumor a 55 ° C bajo irradiación NIR, lo que puede inhibir significativamente el crecimiento tumoral.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también enfrenta desafíos en la terapia fototérmica. Por ejemplo, su penetración de la luz en los tejidos profundos es limitada y requiere una combinación de tecnología de fibra óptica o láseres de mayor longitud de onda. Además, sus vías metabólicas in vivo a largo plazo no se comprenden completamente, y es necesario evaluar más la bioseguridad. Para ello, los investigadores trataron de optimizar sus propiedades dopando tungstato o combinándolo con oro de tungsteno.

Cuando se trata de la optimización del rendimiento, el control de la topografía del óxido de tungsteno es clave. Por ejemplo, las estructuras nanoflorales de óxido de tungsteno pueden mejorar significativamente la eficiencia de conversión fototérmica debido a su porosidad y alta absorción. Además, el crecimiento de la demanda del mercado del tungsteno ha impulsado su comercialización en dispositivos de terapia fototérmica, como nanomateriales de bajo coste basados en materia prima de scheelita.

La aplicación de óxido de tungsteno en la terapia fototérmica también tiene potencial sinérgico. Por ejemplo, en combinación con fármacos de quimioterapia (como la doxorubicina), su efecto fototérmico puede mejorar la eficiencia de liberación del fármaco y lograr una terapia combinada de calor y quimioterapia.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Con el desarrollo de la nanomedicina, el óxido de tungsteno ocupará una posición importante en el tratamiento de precisión del cáncer.

## 9.7 Aplicación del óxido de tungsteno en el campo de la visualización óptica

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) muestra una amplia gama de posibilidades de aplicación en el campo de la visualización óptica debido a sus excelentes propiedades ópticas y propiedades electrocrómicas. Sus propiedades fisicoquímicas únicas, como la transmitancia de luz sintonizable, el alto contraste óptico y la capacidad de respuesta rápida, lo convierten en un material importante para pantallas, ventanas inteligentes y otros dispositivos ópticos. Con el desarrollo de la tecnología de visualización en la dirección de la alta definición, el bajo consumo de energía y la inteligencia, el papel del óxido de tungsteno es cada vez más importante.

En el campo de la pantalla óptica, óxido de tungsteno, la fuerza central son sus propiedades electrocrómicas. Al aplicar un campo eléctrico, su color se puede cambiar de forma reversible entre transparente y azul oscuro, una propiedad que se deriva de los procesos de intercalación de iones y transferencia de electrones. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que las nanoestructuras de óxido de tungsteno, como las nanopelículas o las nanopartículas, pueden mejorar significativamente la velocidad y la estabilidad de la respuesta óptica, cumpliendo con los altos requisitos de los dispositivos de visualización modernos.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en sus propiedades. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno producidas por pulverización catódica o deposición química de vapor (CVD) tienen una alta uniformidad y transparencia óptica, lo que las hace adecuadas para dispositivos de visualización de área grande. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han promovido su exploración en pantallas flexibles, y la fluctuación del precio del tungsteno ha llevado a los investigadores a desarrollar métodos de síntesis de bajo costo, como la preparación directa de óxido de tungsteno utilizando paratungstato de amonio.

### 9.7.1 Aplicación de óxido de tungsteno en pantallas

Las pantallas son una aplicación central en el campo de las pantallas ópticas, incluidas las pantallas de cristal líquido (LCD), las pantallas de diodos emisores de luz orgánica (OLED) y las pantallas electrocrómicas emergentes. El óxido de tungsteno es valioso como capa de atenuación o material de píxeles en las pantallas debido a sus propiedades electrocrómicas y alto contraste óptico. Permite el ajuste dinámico del color y el ahorro de energía, proporcionando una

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

solución innovadora para la próxima generación de tecnología de visualización.

En las pantallas, el mecanismo electrocrómico del óxido de tungsteno se basa en una reacción de intercalación iónica reversible. Por ejemplo, cuando  $\text{Li}^+$  o  $\text{H}^+$  está incrustado, la reacción es:  $\text{WO}_3 + x\text{M}^+ + x\text{e}^- \rightleftharpoons \text{M}_x\text{WO}_3$  (M es Li o H). Este proceso reduce su transmitancia de luz de más del 80% a menos del 10%, lo que resulta en un contraste óptico extremadamente alto. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno generadas por deposición electroquímica en sustratos metálicos de tungsteno pueden tener un tiempo de respuesta de cambio de color tan bajo como milisegundos, lo que las hace adecuadas para pantallas de alta velocidad. Además, los estudios de conocimiento de tungsteno han demostrado que la estructura porosa del óxido de tungsteno puede acelerar la difusión de iones y mejorar aún más la eficiencia de conmutación.

El uso de óxido de tungsteno en las pantallas también se beneficia de su amplia capacidad de respuesta espectral. Su banda prohibida (2.6–3.0 eV) le da una buena transparencia en el rango visible, mientras que aparece oscuro después de la inserción, lo que lo hace adecuado para la atenuación o la protección de la privacidad. Por ejemplo, las nanopelículas de óxido de tungsteno producidas por la oxidación del polvo de tungsteno pueden ajustar dinámicamente el brillo en pantallas inteligentes, reduciendo el deslumbramiento y mejorando la comodidad visual.

En la práctica, el óxido de tungsteno a menudo se combina con otros materiales para optimizar el rendimiento. Por ejemplo, la película compuesta formada con cobre de tungsteno no solo retiene el alto contraste del óxido de tungsteno, sino que también mejora la conductividad eléctrica y es adecuada para pantallas de gran superficie. Además, la tecnología de dopaje desarrollada por Tungsten (por ejemplo, dopaje con molibdeno) puede ajustar su gama de cambio de color y aumentar la variedad de colores de visualización, como el azul al verde o al gris.

El proceso de preparación de las pantallas de óxido de tungsteno es fundamental para su rendimiento. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno depositadas sobre sustratos de filamentos de tungsteno por pulverización catódica con magnetron tienen una alta adherencia y uniformidad, y su grosor se puede controlar con precisión entre 50 y 200 nm, lo que las hace adecuadas para pantallas de alta resolución. Además, los datos de tungsteno muestran que el óxido de tungsteno conserva sus propiedades ópticas en condiciones de preparación a baja temperatura, lo que lo hace potencial en pantallas flexibles, como pantallas flexibles basadas en plástico de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En casos concretos, el óxido de tungsteno se ha utilizado en el desarrollo de pantallas electrocrómicas. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno basados en sustratos de agujas de tungsteno exhiben una excelente velocidad de cambio de píxeles y un bajo consumo de energía en el papel electrónico. Además, Tungsten News informa de que su uso en pantallas transparentes, como pantallas holográficas o dispositivos de realidad aumentada (RA), va en aumento.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también presenta desafíos en las pantallas. Por ejemplo, su vida útil del ciclo de cambio de color puede reducirse por la fatiga de intercalación iónica y la estabilidad se puede mejorar mediante el dopaje de tungstato de calcio u optimización de un electrolito como la solución de tungstato de sodio. Además, su transparencia inicial puede ser insuficiente en algunas aplicaciones y debe mejorarse mediante la modificación de la superficie o la composición con plata-tungsteno.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la nanoestructura de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los nanoarrays de óxido de tungsteno pueden mejorar significativamente las frecuencias de actualización de la pantalla debido a su alta área de superficie y sus rápidas capacidades de transporte de iones. Además, la creciente demanda de tungsteno está impulsando su uso en láminas traseras OLED flexibles, como la preparación de películas delgadas de bajo costo a partir de materias primas de wolframita.

La aplicación de óxido de tungsteno en las pantallas también tiene ventajas de ahorro de energía. Su capacidad de atenuación dinámica reduce el consumo de energía de la retroiluminación y prolonga la vida útil del dispositivo. Con el desarrollo de la tecnología de visualización para la inteligencia y la flexibilidad, el óxido de tungsteno desempeñará un papel más importante en el campo de la visualización óptica.

## 9.8 Aplicación de óxido de tungsteno en soporte catalítico

El óxido de tungsteno tiene un importante valor de aplicación en el campo del soporte catalítico, y su alta área de superficie, estabilidad química y sitio ácido lo convierten en un excelente material de soporte para catalizadores compatibles. En los sectores químico, energético y medioambiental, el óxido de tungsteno proporciona una plataforma fiable para una amplia gama de reacciones al apoyar los componentes activos para mejorar la eficiencia catalítica.

Entre los portadores catalíticos, la estructura porosa y la actividad superficial del óxido de tungsteno son sus principales ventajas. Su área de superficie específica puede alcanzar 50–200 m<sup>2</sup> / g, lo que puede dispersar eficazmente la

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase activa de metales u óxidos y mejorar la actividad y la selectividad del catalizador. Además, los estudios de tungsteno han demostrado que los sitios ácidos del óxido de tungsteno, como el ácido de Lewis y el ácido de Brønsted, pueden promover una variedad de reacciones catalizadas por ácido, como la alquilación y la isomerización.

En la práctica, el proceso de preparación del óxido de tungsteno tiene un impacto significativo en sus propiedades. Por ejemplo, el óxido de tungsteno producido por descomposición solvotérmica o térmica del metatungstato de amonio tiene una alta porosidad y estabilidad térmica, lo que lo hace adecuado para entornos catalíticos de alta temperatura. Además, la investigación de productos de tungsteno ha llevado a su aplicación en la catálisis industrial, como la refinación de petróleo y el tratamiento de gases residuales.

### 9.8.1 Aplicación de óxido de tungsteno en catalizadores soportados

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) tiene un importante valor de aplicación en el campo de los catalizadores soportados debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas. Como material portador multifuncional, el óxido de tungsteno puede soportar eficazmente los componentes activos y mejorar la actividad, la selectividad y la estabilidad de los catalizadores debido a su alta área superficial, estabilidad química y sitios ácidos superficiales. Es ampliamente utilizado en una variedad de reacciones catalíticas en la producción química, la conversión de energía y la gobernanza ambiental, proporcionando un soporte eficiente para los procesos industriales.

Entre los catalizadores compatibles, las principales ventajas del óxido de tungsteno son su estructura porosa y su alta capacidad de dispersión. Su superficie específica suele oscilar entre 50 y 200  $m^2/g$ , lo que proporciona suficientes sitios de fijación para componentes activos como metales preciosos u óxidos de metales de transición, evitando la aglomeración y aumentando la utilización. Además, la investigación del tungsteno ha demostrado que los sitios de ácido de Lewis y ácido de Brønsted del óxido de tungsteno pueden sinergizar con la actividad para promover reacciones catalizadas por ácido, como la alquilación, la isomerización y la deshidratación. Esta propiedad lo hace muy buscado en petroquímica y síntesis orgánica.

La estabilidad térmica del óxido de tungsteno es otro punto a destacar del catalizador soportado. Su estructura permanece intacta a altas temperaturas (hasta 600–700 °C) y es adecuada para condiciones catalíticas adversas. Por ejemplo, los portadores de óxido de tungsteno preparados por descomposición térmica de metatungstato de amonio exhiben una excelente resistencia a la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sinterización en reacciones de hidrogenación a alta temperatura. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han impulsado sus controles topográficos, como las estructuras de nanovarillas o nanoláminas, mejorando aún más sus propiedades catalíticas.

En aplicaciones prácticas, el óxido de tungsteno a menudo se combina con el componente activo mediante impregnación, coprecipitación o método solvotérmico. Por ejemplo, un catalizador cargado con Pt o Pd en óxido de tungsteno exhibe una alta conversión y resistencia al envenenamiento por azufre en reacciones de hidrodesulfuración (HDS). Esto se debe a la fuerte interacción entre el óxido de tungsteno y el metal (SMSI), que estabiliza el sitio activo y prolonga la vida útil del catalizador. Además, el portador de óxido de tungsteno generado por la oxidación del polvo de tungsteno puede mejorar significativamente la eficiencia de difusión de las moléculas de gas debido a su alta porosidad, que es adecuada para reacciones catalíticas en fase gaseosa.

En casos específicos, los catalizadores soportados con óxido de tungsteno se han utilizado ampliamente en la refinación de petróleo. Por ejemplo, los catalizadores de óxido de níquel/tungsteno pueden convertir el petróleo pesado en fracciones ligeras en el craqueo de hidrocarburos con una tasa de conversión de más del 90%. Además, los datos de tungsteno muestran que el soporte preparado por óxido de tungsteno y ferrowolframio exhibe una excelente resistencia a la deposición de carbono en el reformado seco de metano, que se debe a la inhibición de la deposición de carbono por su acidez superficial.

El óxido de tungsteno también tiene aplicaciones importantes en la catálisis ambiental. Por ejemplo, el catalizador de óxido de tungsteno/Pd puede convertir completamente el tolueno en  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}$  en la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV), con una tasa de conversión de más del 95%. La alta homogeneidad del portador de óxido de tungsteno generado sobre un sustrato de filamento de tungsteno por pulverización garantiza una distribución uniforme de los componentes activos. Además, las noticias de tungsteno informan que está surgiendo su potencial en la reducción catalítica selectiva (SCR) de  $\text{NO}_x$ , como la combinación con cobre de tungsteno para mejorar la actividad a baja temperatura.

Sin embargo, también existen algunos desafíos para el óxido de tungsteno como portador. Por ejemplo, una superficie excesivamente ácida puede desencadenar reacciones secundarias que reduzcan la selectividad. Para hacer esto, los investigadores trataron de ajustar la fuerza y la distribución de los sitios ácidos mediante el dopaje con cesio, tungsteno o metales alcalinos. Además, su área de superficie específica puede reducirse a altas temperaturas a largo plazo, y la estructura de los poros debe mantenerse mediante la combinación con disulfuro

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de tungsteno o la optimización de las condiciones de calcinación.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la topografía microscópica del óxido de tungsteno es crucial. Por ejemplo, los nanotubos de óxido de tungsteno preparados por el método de plantilla pueden mejorar significativamente la dispersión y la accesibilidad de los componentes activos debido a su alta porosidad y canales direccionales. Además, el portador compuesto de óxido de tungsteno/tungstato desarrollado por Tungsten Company se prepara mediante un proceso de prensado en caliente, que tiene una alta resistencia mecánica y es adecuado para reactores de lecho fijo.

El proceso de preparación del catalizador soportado por óxido de tungsteno tiene un profundo impacto en su rendimiento. Por ejemplo, la cristalinidad y la porosidad de los portadores de óxido de tungsteno calcinados por calentadores de tungsteno se pueden controlar con precisión para garantizar la estabilidad del catalizador a altas temperaturas y presiones. Además, el óxido de tungsteno producido por oxidación de partículas de tungsteno también tiene aplicaciones en el campo de la fotocatalisis, como el apoyo al  $TiO_2$  para la degradación de contaminantes orgánicos, y su efecto sinérgico mejora significativamente la eficiencia fotocatalítica.

En el campo de la química verde, los catalizadores soportados con óxido de tungsteno muestran el potencial para el desarrollo sostenible. Por ejemplo, el catalizador de óxido de Cu/tungsteno exhibe una alta selectividad (>80%) en la hidrogenación de  $CO_2$  a metanol, lo que proporciona un nuevo enfoque para la captura y utilización de carbono.

El óxido de tungsteno tiene abundantes materias primas y costos de producción controlables, lo que sienta las bases para su aplicación a gran escala. Además, la creciente demanda del mercado de tungsteno ha llevado a los investigadores a explorar nuevos portadores compuestos, como la combinación de óxido de tungsteno y oro de tungsteno, para reacciones de oxidación eficientes.

En la industrialización real, la durabilidad de los catalizadores soportados por óxido de tungsteno es clave. El portador de óxido de tungsteno preparado por plástico de tungsteno como aglutinante exhibe una excelente resistencia al desgaste en el funcionamiento a largo plazo. Además, el óxido de tungsteno preparado a partir de precursores de ácido tungstico puede retener más sitios activos y mejorar la eficiencia catalítica a través del proceso de síntesis a baja temperatura.

La aplicación de óxido de tungsteno en catalizadores soportados también es

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

respetuosa con el medio ambiente. El proceso de producción evita el uso de portadores tradicionales altamente tóxicos y está en línea con los principios de la química verde. Con el avance continuo de la tecnología catalítica, el óxido de tungsteno desempeñará un papel más importante en los campos de la industria química, la energía y la protección del medio ambiente, proporcionando opciones diversificadas para una catálisis eficiente.

## 9.9 Aplicación de óxido de tungsteno en el campo de los tejidos ignífugos

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) ofrece un potencial único en el campo de los tejidos resistentes al fuego debido a su excelente estabilidad térmica y su inercia química. Como óxido de metal de transición, el óxido de tungsteno es capaz de mantener la integridad estructural a altas temperaturas y mejorar las propiedades ignífugas de los tejidos a través de sus propiedades superficiales. Con la creciente demanda de materiales ignífugos en la seguridad industrial, la vida cotidiana y el transporte público, el óxido de tungsteno está ganando gradualmente atención como aditivo funcional o material de recubrimiento.

En los tejidos ignífugos, el papel del óxido de tungsteno se refleja principalmente en su alto punto de fusión ( $1473\text{ }^\circ\text{C}$ ) y su resistencia a la oxidación, lo que le permite ralentizar la velocidad de combustión de los tejidos en condiciones de incendio. Además, se ha demostrado que el tungsteno es eficaz para dispersar el calor e inhibir la propagación de la llama en su forma de nanopartículas debido a su alta área superficial y conductividad térmica. Ya sea compuesto con un sustrato de fibra o utilizado como recubrimiento, el óxido de tungsteno mejora el rendimiento al fuego de las telas.

En aplicaciones prácticas, el proceso de preparación del óxido de tungsteno es crucial para su efecto. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno sintetizadas por síntesis solvotérmica se dispersan uniformemente en las fibras de los tejidos, mientras que las películas delgadas preparadas por deposición química de vapor (CVD) son adecuadas para recubrimientos de superficies. Además, los avances en la tecnología del tungsteno han promovido su aplicación en tejidos flexibles, mientras que la fluctuación del precio del tungsteno ha llevado a los investigadores a explorar vías sintéticas de bajo costo, como la preparación directa con paratungstato de amonio.

### 9.9.1 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en el ámbito industrial

La demanda de tejidos ignífugos es especialmente aguda en el sector industrial, especialmente en industrias de alto riesgo como la petroquímica, la metalúrgica

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y la energética. Debido a su resistencia a altas temperaturas y propiedades ignífugas, los tejidos ignífugos de óxido de tungsteno muestran importantes ventajas como material para ropa de protección, ropa de trabajo o cubiertas de equipos en estos escenarios. No solo protege a los trabajadores de chispas y altas temperaturas, sino que también prolonga la vida útil del equipo.

En aplicaciones industriales, la estabilidad térmica del óxido de tungsteno es su principal ventaja. Por ejemplo, en una acería o un taller de soldadura, las telas pueden exponerse a temperaturas instantáneas de hasta 1000 ° C. La resistencia al calor del recubrimiento de óxido de tungsteno creado por oxidación sobre un sustrato metálico de tungsteno puede reducir significativamente la tasa de descomposición térmica de la tela. Además, la investigación del conocimiento del tungsteno ha demostrado que las nanopartículas de óxido de tungsteno forman una capa densa de óxido a altas temperaturas, que puede aislar eficazmente el oxígeno e inhibir la combustión.

La preparación de los tejidos ignífugos de óxido de tungsteno se suele conseguir combinándolos con fibras como la aramida o el algodón. Por ejemplo, la oxidación del polvo de tungsteno mediante la impregnación de nanopartículas de óxido de tungsteno en la superficie de la fibra puede aumentar el índice de oxígeno limitante (LOI) de la tela, haciendo que cumpla o supere el estándar de la industria (por ejemplo, LOI > 28%). Además, la tecnología de compuestos desarrollada por Tungsten Company, como el molibdeno dopado, puede mejorar aún más la resistencia al choque térmico del tejido.

En escenarios específicos, las telas ignífugas de óxido de tungsteno se usan ampliamente en ropa protectora. Por ejemplo, en las plataformas petrolíferas, las telas recubiertas de óxido de tungsteno basadas en la oxidación de filamentos de tungsteno pueden resistir los incendios de petróleo y su conductividad térmica ayuda a dispersar rápidamente las altas temperaturas locales y evitar quemaduras. Además, las noticias de tungsteno informaron que se utiliza en la industria energética como material de envoltura de cables, lo que puede prevenir eficazmente los incendios causados por arcos eléctricos.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también tiene limitaciones en los tejidos industriales resistentes al fuego. Por ejemplo, su peso puede aumentar la carga sobre la tela y afectar la comodidad de uso. Para ello, los investigadores trataron de reducir el peso mediante la combinación con cobre de tungsteno ligero u optimizando el tamaño de las nanopartículas. Además, su costo de preparación es alto y es necesario reducir el costo a través de la producción a gran escala.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de estructura multicapa

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, los nanorrecostrucciones de óxido de tungsteno cultivados en el sustrato de agujas de tungsteno permanecen intactos después de una exposición repetida a altas temperaturas debido a su alta adherencia. Además, los datos de tungsteno muestran que todavía tiene una excelente estabilidad en ambientes ácidos o aceitosos, lo que está impulsando su uso en la industria petroquímica. Los tejidos ignífugos de óxido de tungsteno también tienen ventajas de sostenibilidad en aplicaciones industriales. Su materia prima se puede extraer de la wolframita y tiene un gran potencial de reciclaje. Con el crecimiento de la demanda del mercado de tungsteno, su posición en la protección de la seguridad industrial se mejorará aún más, proporcionando una garantía confiable para operaciones de alto riesgo.

### 9.9.2 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en la vida diaria

En el campo de la vida diaria, la aplicación de telas ignífugas cubre textiles para el hogar, ropa y materiales decorativos, y las telas ignífugas de óxido de tungsteno han atraído la atención debido a su resistencia al fuego y seguridad. Puede reducir eficazmente el riesgo de incendio en el hogar y mejorar el factor de seguridad del entorno de vida, especialmente para materiales inflamables como cortinas, alfombras y ropa de cama.

En las aplicaciones cotidianas, el mecanismo ignífugo del óxido de tungsteno se basa en sus capacidades de blindaje térmico y aislamiento de oxígeno. Por ejemplo, en las primeras etapas de un incendio, el recubrimiento puede formar una capa protectora en la superficie de la tela, lo que ralentiza la propagación de las llamas. El valor LOI del precursor de tungsteno se puede aumentar a más del 30% rociando el precursor de ácido tungstico en un nanorecubrimiento de óxido de tungsteno, que puede cumplir con los requisitos de protección contra incendios de los textiles para el hogar. Además, los estudios académicos del tungsteno han demostrado que sus nanopartículas pueden absorber parte de la radiación térmica y reducir el punto de ignición del tejido.

La preparación de los tejidos ignífugos de óxido de tungsteno debe tener en cuenta la comodidad y la funcionalidad. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno se incrustan en las fibras de algodón mediante el método sol-gel, que conserva la suavidad y la transpirabilidad al tiempo que proporciona efectos ignífugos. Además, el recubrimiento de óxido de tungsteno producido por la oxidación de partículas de tungsteno se puede adherir a la tela de la cortina mediante el proceso de prensado en caliente, mejorando su durabilidad.

En escenarios específicos, las telas ignífugas de óxido de tungsteno se utilizan en artículos para el hogar. Por ejemplo, las alfombras recubiertas de óxido de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno basadas en el proceso de calentamiento de tungsteno pueden autoextinguirse rápidamente cuando un cigarrillo o una chispa entran en contacto para evitar la propagación del fuego. Además, los estudios de productos de tungsteno han demostrado que su uso en pijamas para niños puede reducir significativamente el riesgo de quemaduras y cumplir con estrictos estándares de seguridad de textiles para el hogar.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también presenta desafíos en las telas resistentes al fuego de uso diario. Por ejemplo, su color (generalmente amarillo o azul) puede afectar la estética de la tela, y debe combinarse con plástico de tungsteno. Además, su lavabilidad debe mejorarse aún más para adaptarse a la limpieza frecuente, y los investigadores están tratando de mejorar este problema mediante la silanización de la superficie.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la microestructura del óxido de tungsteno es crucial. Por ejemplo, las nanofibras de óxido de tungsteno se combinan con tejidos de algodón mediante la tecnología de electrohilado, que combina resistencia al fuego y suavidad. Además, la creciente demanda de tungsteno está impulsando su uso en textiles para el hogar de bajo costo, como el uso de materias primas scheelitas para preparar recubrimientos económicos.

La aplicación de telas ignífugas de óxido de tungsteno en la vida diaria también tiene potencial de protección del medio ambiente. Su proceso de producción puede evitar el problema de toxicidad de los retardantes de llama halógenos tradicionales, lo que está en línea con la tendencia de los textiles ecológicos para el hogar. Con la creciente conciencia de seguridad de los consumidores, el óxido de tungsteno ocupará un lugar en el campo de la protección diaria contra incendios.

### 9.9.3 Aplicación de tejidos ignífugos de óxido de tungsteno en el ámbito del transporte público

La demanda de tejidos ignífugos es especialmente estricta en el sector del transporte público, donde los materiales de tapicería y asientos se utilizan en vehículos como aviones, trenes y automóviles. Debido a su alta resistencia al fuego y durabilidad, los tejidos ignífugos de óxido de tungsteno muestran un gran potencial como material de seguridad en este campo. Puede reducir eficazmente el riesgo de incendio y proteger la vida de los pasajeros.

En aplicaciones de transporte público, el rendimiento al fuego del óxido de tungsteno se basa en su estabilidad a altas temperaturas. Por ejemplo, en las telas de los asientos de los aviones, el recubrimiento forma una capa carbonizada

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bajo la exposición a las llamas a corto plazo, lo que evita la propagación del fuego. El valor LOI del nano-recubrimiento que convierte el tungstato en óxido de tungsteno mediante el método de pulverización puede alcanzar más del 35%, lo que cumple con los estándares de aviación (como FAR 25.853). Además, los datos de tungsteno muestran que sus emisiones de baja toxicidad en entornos de gases de combustión de alta temperatura mejoran aún más la seguridad.

La preparación de telas ignífugas de óxido de tungsteno debe tener en cuenta la ligereza y la resistencia a la abrasión. Por ejemplo, las películas de óxido de tungsteno producidas por deposición de vapor en un sustrato esférico de polvo de tungsteno pueden adherirse a las fibras de poliéster con menos del 10% más de peso, lo que las hace adecuadas para interiores de aviones. Además, el recubrimiento compuesto de ferrotungsteno y óxido de tungsteno se prepara mediante un proceso de prensado en caliente, que tiene una alta resistencia al desgaste y es adecuado para asientos de trenes.

En escenarios específicos, las telas ignífugas de óxido de tungsteno se utilizan en el interior de los vehículos. Por ejemplo, las cortinas recubiertas de óxido de tungsteno basadas en la tecnología de oro de tungsteno pueden resistir las fuentes de ignición en el ferrocarril de alta velocidad, y su efecto de protección térmica reduce significativamente la temperatura de la cabina.

Sin embargo, el óxido de tungsteno también tiene limitaciones en los tejidos ignífugos para el transporte público. Por ejemplo, su rigidez puede afectar la suavidad de la tela, que debe mejorarse mediante la combinación con caucho de tungsteno. Además, es necesario verificar aún más su estabilidad de rendimiento en condiciones de humedad extrema, y los investigadores intentaron optimizarla dopando tungsteno con cesio.

En términos de optimización del rendimiento, el diseño de la estructura porosa del óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, las nanorredes de óxido de tungsteno se preparan mediante el método de plantilla, que es ligero y altamente ignífugo. Además, el crecimiento de la demanda del mercado de tungsteno está impulsando sus aplicaciones a gran escala en el sector aeroespacial, como el uso de precursores de ácido de tungsteno para recubrimientos de bajo costo.

La aplicación de telas ignífugas de óxido de tungsteno en el transporte público también tiene adaptabilidad regulatoria. Cumple con las normas internacionales de protección contra incendios (por ejemplo, IMO FTPC) y promueve su promoción en el sector del transporte mundial. A medida que las normas de seguridad se vuelvan más estrictas, el óxido de tungsteno desempeñará un papel más importante en la seguridad del transporte público.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 9.10 Aplicación de óxido de tungsteno en películas agrícolas

Como óxido de metal de transición multifuncional, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) ha demostrado una amplia gama de potencial de aplicación en muchos campos debido a sus propiedades físicas y químicas únicas, incluida la preparación y la optimización del rendimiento de películas agrícolas (denominadas películas agrícolas). Como material importante en la agricultura moderna, la película agrícola se utiliza principalmente para el acolchado de invernaderos, el acolchado de películas plásticas y la protección de cultivos, y su rendimiento afecta directamente la eficiencia del crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Con la intensificación del cambio climático global y la escasez de recursos, el desarrollo de películas agrícolas sostenibles y de alto rendimiento se ha convertido en el foco de la investigación en tecnología agrícola. En los últimos años, el óxido de tungsteno ha atraído la atención por su aplicación en películas agrícolas debido a sus características de absorción de luz, estabilidad térmica y potencial nanotecnológico. En este artículo, discutiremos en detalle el mecanismo, el método de preparación, las ventajas de rendimiento y las perspectivas de aplicación práctica del óxido de tungsteno en películas agrícolas, y analizaremos exhaustivamente su potencial y desafíos basados en datos científicos y prácticas industriales.

### 1. Las características básicas del óxido de tungsteno están en línea con las necesidades de las películas agrícolas

El óxido de tungsteno es un semiconductor de banda prohibida ancha (banda prohibida 2.6–3.0 eV) con buena capacidad de absorción de luz (especialmente en la región del infrarrojo cercano, 700–2500 nm), conductividad térmica (alrededor de 1.6 W / m·K) y estabilidad química. Estas propiedades les otorgan ventajas naturales para regular la luz y el calor, bloquear los rayos ultravioleta y mejorar la durabilidad de los materiales. Las funciones principales de la película agrícola incluyen la conservación del calor, el control de la luz, la protección UV, el antienvejecimiento y antibacteriano, etc., y las características del óxido de tungsteno son altamente compatibles con estas necesidades.

- La película agrícola de control de luz y calor necesita ajustar la transmitancia de luz y el rendimiento del aislamiento térmico de acuerdo con las necesidades de los cultivos. La fuerte absorción de luz infrarroja cercana (NIR) del óxido de tungsteno lo convierte en un material de conversión fototérmica ideal. Por ejemplo, los estudios han demostrado que la película agrícola de polietileno (PE) dopada con óxido de tungsteno

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puede convertir la luz infrarroja en calor, elevando la temperatura nocturna en el invernadero entre 2 y 5 ° C y prolongando el ciclo de crecimiento del cultivo.

- Los rayos ultravioleta (UV) son dañinos para el ADN de los cultivos y los materiales de las películas agrícolas. La banda prohibida del óxido de tungsteno lo hace eficaz para absorber los rayos UV-B (280–315 nm) y parte de los rayos UV-A (315–400 nm), protegiendo los cultivos y retrasando el envejecimiento de las películas agrícolas. Los experimentos han demostrado que un recubrimiento de óxido de tungsteno de 50 nm de espesor puede reducir la transmitancia UV en aproximadamente un 95%.
- La actividad fotocatalítica del óxido de tungsteno antimicrobiano y duradero puede producir especies reactivas de oxígeno (ROS) en respuesta a la luz, lo que tiene un efecto antibacteriano y reduce la propagación de plagas y enfermedades. Al mismo tiempo, su alta dureza (8,5–9 en la escala de Mohs) y su estabilidad química mejoran la resistencia a la intemperie de la película agrícola y prolongan la vida útil.

Estas características muestran que el óxido de tungsteno no solo puede optimizar la función de la película agrícola, sino también mejorar su adaptabilidad ambiental, lo que está en línea con las necesidades de desarrollo sostenible de la agricultura moderna.

## 2. Preparación y aplicación de óxido de tungsteno en películas agrícolas

El óxido de tungsteno se aplica a las películas agrícolas, generalmente incorporándolo a materiales de la matriz (por ejemplo, polietileno, ácido poliláctico (PLA), etc.) en forma de nanopartículas, películas delgadas o compuestos. La elección del método de preparación afecta directamente su rendimiento y costo.

- **El dopaje de nanopartículas** permite la preparación de películas agrícolas compuestas mediante la dispersión de óxido de tungsteno a nanoescala (tamaño de partícula 10–100 nm) en una matriz polimérica. Los métodos comúnmente utilizados incluyen la mezcla de fusión y la mezcla de solución. Por ejemplo, la investigación sobre el tungsteno informa que al mezclar nanopartículas de óxido de tungsteno (área de superficie específica de 50–200 m<sup>2</sup> / g) con PE mediante agitación a alta velocidad, la película agrícola preparada ha mejorado la tasa de blindaje del infrarrojo cercano en un 60% y ha mantenido una alta transmitancia de luz visible (alrededor del 70%). Este método es menos costoso y adecuado para la producción a gran escala.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Los recubrimientos de película delgada se depositan en la superficie de las películas agrícolas por deposición física de vapor (PVD) o deposición química de vapor (CVD) con un control preciso del espesor (25–100 nm) y la estructura. Por ejemplo, la permeabilidad al oxígeno (OP) de un recubrimiento de óxido de tungsteno de 50 nm sobre una película de sustrato de PLA se redujo a  $0,46 \times 10^{-16} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ . Por debajo de PA, la hermeticidad mejora significativamente. Este método es adecuado para películas agrícolas de alta gama, pero el costo del equipo es alto.
- Los materiales funcionales compuestos combinan óxido de tungsteno con otros materiales como  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZnO}$  o grafeno para mejorar aún más el rendimiento. Por ejemplo, el recubrimiento compuesto de óxido de tungsteno/ $\text{TiO}_2$  combina la actividad fotocatalítica de ambos y tiene una tasa de inhibición (contra E. coli) de más del 99%, al tiempo que conserva el efecto fototérmico del óxido de tungsteno. Esta forma compuesta tiene un futuro brillante en películas agrícolas funcionales.

Estos métodos de preparación tienen sus propias ventajas y desventajas, y es necesario elegir el proceso adecuado de acuerdo con el uso específico de la película agrícola (como película de invernadero, película plástica). El dopaje de nanopartículas es adecuado para escenarios sensibles a los costos, mientras que los recubrimientos de película delgada son más adecuados para las necesidades de alto rendimiento.

### 3. Ventajas de rendimiento del óxido de tungsteno en películas agrícolas

La aplicación de óxido de tungsteno en películas agrícolas ha mejorado significativamente una serie de propiedades clave, y los siguientes datos y estudios de casos se utilizan para analizar sus ventajas.

- La manipulación espectral y el efecto de resonancia de plasmón de superficie local (LSPR) del óxido de tungsteno aislado hacen que tenga una alta absorción en la región del infrarrojo cercano. Por ejemplo, la película agrícola dopada con nanopartículas de óxido de tungsteno dopado con cesio a 1100 nm fue del 90%, mientras que la transmitancia de la luz visible se mantuvo por encima del 75%. Esta manipulación espectral selectiva no solo garantiza la luz necesaria para la fotosíntesis, sino que también aumenta la temperatura nocturna a través de la conversión de calor, especialmente en regiones frías. Los experimentos muestran que en el invernadero de invierno del norte, la temperatura en el invernadero que utiliza una película agrícola de óxido de tungsteno es  $3-4^\circ \text{C}$  más alta que la de la película de PE ordinaria.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- La protección ultravioleta y la capacidad de absorción UV antienviejamiento del óxido de tungsteno reducen significativamente la tasa de envejecimiento de las películas agrícolas. En el caso de la película compuesta de PLA / óxido de tungsteno, la transmitancia en la región UV-B disminuyó del 90% al 5%, y después de 6 meses de exposición al aire libre, la resistencia mecánica (resistencia a la tracción) disminuyó solo en un 10%, mientras que la de la película de PLA puro disminuyó en más del 40%. Estos resultados indican que el óxido de tungsteno puede ralentizar eficazmente la degradación fotooxidativa y prolongar la vida útil de la película agrícola.
- El óxido de nanotungsteno puede catalizar la producción de ROS bajo la luz y destruir las membranas celulares bacterianas. El estudio demostró que la película de PE que contenía un 2% en peso de óxido de tungsteno tenía una tasa de eliminación de  $5 \log_{10}$  UFC/cm<sup>2</sup> contra E. coli en 24 horas, lo que redujo significativamente el riesgo de transmisión de patógenos. Esto es especialmente importante para la salud del suelo cubierto con mantillo.
- Barrera de oxígeno y conservación En la película adhesiva de frutas y verduras, la densa capa de óxido de tungsteno reduce la permeabilidad al oxígeno. Por ejemplo, el recubrimiento de óxido de tungsteno de 50 nm de espesor reduce la permeabilidad al oxígeno de las membranas de PLA en un 80%, retrasa la respiración de frutas y verduras y prolonga la vida útil de 1 a 2 semanas.

#### 4. Casos de aplicación práctica y efectos

La aplicación de óxido de tungsteno en películas agrícolas se ha verificado en muchos escenarios, y lo siguiente se combina con casos reales para analizar su efecto.

- Película de acolchado para invernadero En el noroeste de China, el uso de película de invernadero de PE dopada con nanopartículas de óxido de tungsteno aumentó la temperatura en el invernadero en 3,5 ° C en invierno y el rendimiento del tomate aumentó en un 15%. Al mismo tiempo, su función de bloqueo de rayos UV reduce la tasa de quemaduras solares de los cultivos y mejora la calidad de la fruta.
- La película de mantillo compuesta de óxido de tungsteno/TiO<sub>2</sub> se utilizó en la plantación de arroz en el sur de China para aumentar la temperatura del suelo en 2 ° C y promover el crecimiento de las plántulas. Su efecto bacteriostático redujo la incidencia de enfermedades de la raíz y aumentó el rendimiento del arroz en aproximadamente un 10%.
- Película adhesiva para frutas y verduras En el empaque de frutas de exportación, la película compuesta de PLA / óxido de tungsteno extiende

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la vida útil de las fresas a 20 días (la película ordinaria es de solo 12 días), reduce la tasa de putrefacción y es bien recibida por el mercado. Estos casos muestran que el óxido de tungsteno puede mejorar significativamente el valor práctico de la película agrícola en la producción agrícola real, especialmente en la mejora del rendimiento y la calidad.

## 5. Desafíos y soluciones en la aplicación

Aunque el óxido de tungsteno tiene ventajas significativas en las películas agrícolas, su aplicación aún enfrenta algunos desafíos y debe abordarse.

- **Problema de costo** La preparación de óxido de tungsteno (como nanopartículas o deposición de película delgada) es costosa, y el precio de mercado actual es de aproximadamente 20-30 dólares estadounidenses / kg, mientras que la película agrícola de PE ordinaria es de solo 1-2 dólares estadounidenses / kg. Las soluciones incluyen la optimización de los procesos de producción (por ejemplo, el proceso hidrotérmico criogénico para reducir el consumo de energía a 1 kWh/kg) y la utilización de recursos reciclados del mercado del tungsteno (por ejemplo, alambre de chatarra de tungsteno).
- **Dispersión y compatibilidad** Las nanopartículas de óxido de tungsteno son fáciles de aglomerar en la matriz polimérica, lo que afecta a la uniformidad de la película. La compatibilidad puede mejorarse mediante la modificación de la superficie (por ejemplo, agente de acoplamiento de silano) o la adición de dispersantes (por ejemplo, PVP), y los experimentos han demostrado un aumento del 50% en la dispersión después de la modificación.
- **Impactos ambientales** Es necesario evaluar la ecotoxicidad potencial del óxido de nanotungsteno. Los estudios han demostrado que su acumulación en el suelo < 10 mg/kg no tiene un efecto significativo sobre los microorganismos, pero es necesario controlar su uso a largo plazo. El uso de sustratos biodegradables reduce el riesgo de arrastre.

A través de mejoras técnicas y evaluaciones ambientales, estos desafíos se pueden superar gradualmente, lo que lleva a la aplicación generalizada de películas agrícolas de óxido de tungsteno.

## 6. Perspectivas de desarrollo futuro

La aplicación del óxido de tungsteno en películas agrícolas tiene amplias perspectivas, especialmente en las siguientes direcciones:

- **Película agrícola inteligente:** Combinada con las características electrocromáticas del óxido de tungsteno, se desarrolla una película agrícola inteligente que puede ajustar dinámicamente la transmitancia de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

luz para adaptarse a diferentes condiciones de iluminación.

- Sostenibilidad: Aproveche la tecnología de reciclaje de chatarra del tungsteno para reducir costos y lograr una economía circular.
- Integración multifuncional: Combinada con la tecnología de detección, la película agrícola que integra control de temperatura, bacteriostático y monitoreo está preparada para mejorar el nivel de agricultura de precisión.

Con el progreso de la tecnología de tungsteno y el crecimiento de la demanda del mercado, se espera que el óxido de tungsteno se convierta en el material central de una nueva generación de películas agrícolas y promueva el proceso de modernización agrícola.

## CTIA GROUP LTD Yellow Tungsten Trioxide (YTO, WO<sub>3</sub>) Product Introduction

### 1. Product Overview

CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide is produced by high-temperature calcination process of ammonium paratungstate, which meets the requirements of GB/T 3457-2013 "Tungsten Oxide" first-class product. WO<sub>3</sub> is widely used in the preparation of tungsten powder, cemented carbide, tungsten wire and ceramic colorants. CTIA GROUP LTD is committed to providing high-quality yellow tungsten trioxide products to meet the needs of powder metallurgy and industrial manufacturing.

### 2. product characteristics

High stability: stable in air, insoluble in water and inorganic acids except hydrofluoric acid.

Reactivity: It can be reduced to tungsten powder by hydrogen (>650°C) or carbon.

Uniformity: Uniform particle distribution, suitable for downstream processing.

### 3. Product specifications

index	CTIA GROUP LTD yellow tungsten trioxide first-class product standard
WO <sub>3</sub> content (wt%)	≥99.95
Impurities ( wt% , max.)	Fe≤0.0010, Mo≤0.0020, Si≤0.0010, Al≤0.0005, Ca≤0.0010, Mg≤0.0005, K≤0.0010, Na≤0.0010, S≤0.0005, P≤0.0005
Particle size	1-10 (μm, FSSS)
Loose density	2.0-2.5 (g/cm <sup>3</sup> )
Customization	Particle size or impurity limits can be customized according to customer requirements

### 4. Packaging and warranty

Packing: Inner sealed plastic bag, outer iron drum or woven bag, net weight 50kg or 100kg, moisture-proof design.

Warranty: Each batch comes with a quality certificate, including WO<sub>3</sub> content, impurity analysis, particle size (FSSS method), loose density and moisture data.

### 5. Procurement information

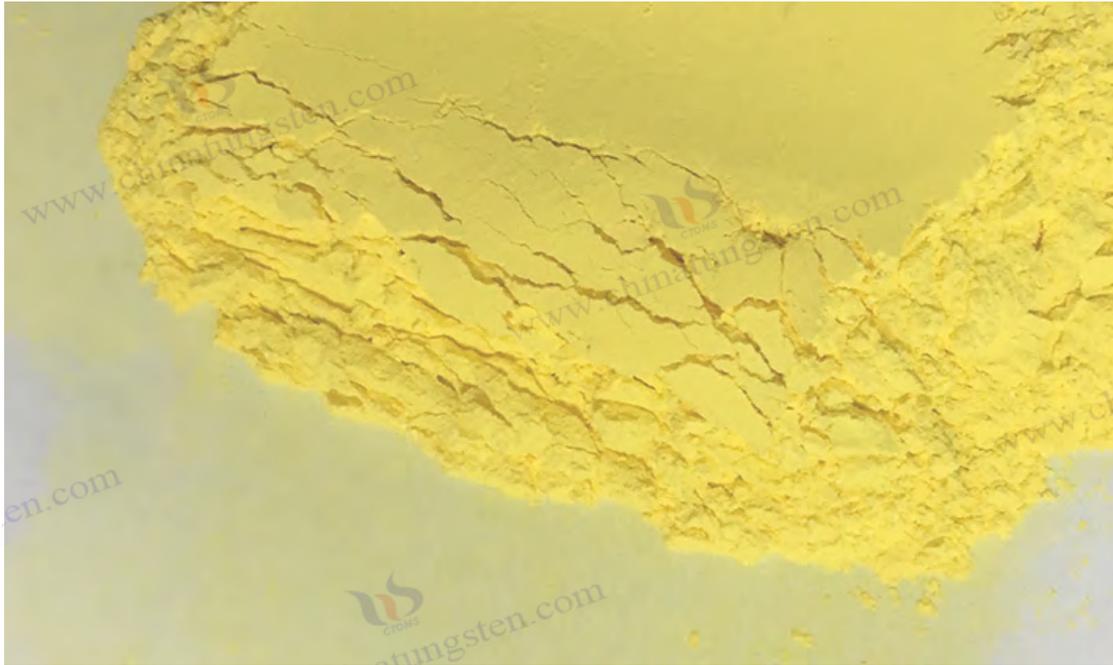
Email: sales@chinatungsten.com

Phone: +86 592 5129696

For more [yellow tungsten oxide](http://www.tungsten-powder.com) information, please visit the China Tungsten online website [www.tungsten-powder.com](http://www.tungsten-powder.com). For more market and real-time information, please follow the WeChat public account "China Tungsten Online".



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 10 Seguridad y protección ambiental del óxido de tungsteno

El óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) es un material ampliamente utilizado que exhibe un excelente rendimiento en los campos de la energía, el medio ambiente, la electrónica y la biomedicina. Sin embargo, no se pueden ignorar las cuestiones de seguridad y medio ambiente relacionadas con su producción, uso y eliminación. Desde los riesgos potenciales para la salud hasta los impactos ambientales, la seguridad y la sostenibilidad del óxido de tungsteno se han convertido en una consideración importante para la investigación y la industrialización. En este capítulo se analizarán estas cuestiones en detalle y se proporcionarán orientaciones para su correcta aplicación.

En el campo de la seguridad y la protección del medio ambiente, las propiedades físicas y químicas del óxido de tungsteno son ventajas y desafíos. Su alta estabilidad y baja solubilidad reducen parte del riesgo de toxicidad, pero el óxido de tungsteno a nanoescala puede tener efectos específicos en los seres humanos y el medio ambiente debido a su alta superficie y actividad biológica potencial. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que el consumo de energía y las emisiones de residuos en el proceso de producción también deben optimizarse para cumplir con los principios de la química verde.

En aplicaciones prácticas, la seguridad y la gestión ambiental del óxido de tungsteno se basan en la evaluación científica y las medidas de control. Por ejemplo, las emisiones de subproductos pueden reducirse mejorando el proceso de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

síntesis de la tecnología de tungsteno, mientras que las fluctuaciones en los precios del tungsteno están impulsando el desarrollo de métodos de producción de bajo costo y respetuosos con el medio ambiente, como la conversión eficiente de paratungstato de amonio.

### 10.1 Seguridad del óxido de tungsteno

Las preocupaciones de seguridad del óxido de tungsteno están relacionadas principalmente con su posible impacto en la salud humana durante la producción, el transporte y el uso. Como óxido metálico, su seguridad está estrechamente relacionada con la forma física (por ejemplo, polvo, película o nanopartículas), la vía de exposición (inhalación, contacto con la piel o ingestión) y la dosis. Comprender estos riesgos y tomar las precauciones adecuadas es clave para garantizar la seguridad de las aplicaciones.

En su forma macroscópica, el óxido de tungsteno generalmente existe en forma de polvo amarillo o azul, que tiene una alta estabilidad química y una baja toxicidad aguda para los humanos. Por ejemplo, el polvo de óxido de tungsteno, que se produce por oxidación térmica del metal de tungsteno, tiene una solubilidad muy baja ( $<0,1$  g/L) y no se absorbe fácilmente a través de la piel o el tracto digestivo. Sin embargo, los estudios de conocimiento del tungsteno han demostrado que la inhalación en forma de polvo puede causar irritación respiratoria, especialmente cuando se expone a altas concentraciones (por ejemplo, en una planta de producción), lo que puede provocar una inflamación pulmonar leve.

El óxido de tungsteno a nanoescala es más complejo debido a su alta superficie y actividad biológica. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno (tamaño de partícula  $< 100$  nm) sintetizadas por métodos hidrotermales pueden penetrar en las membranas celulares y desencadenar estrés oxidativo o respuestas inflamatorias. Los experimentos in vitro mostraron que las dosis altas ( $>100$   $\mu$ g/mL) de nanopartículas de óxido de tungsteno eran tóxicas para las células pulmonares (por ejemplo, las células A549) y pueden inducir apoptosis a través de la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS). Además, los datos sugieren que su acumulación a largo plazo en la sangre puede afectar a la función hepática y renal, aunque los datos actuales de investigación in vivo siguen siendo limitados.

En entornos industriales, los riesgos de seguridad del óxido de tungsteno también involucran el proceso de producción. Por ejemplo, cuando el polvo de tungsteno se oxida para producir óxido de tungsteno, si el polvo no se controla adecuadamente, puede provocar el riesgo de inhalación por parte de los trabajadores. Para ello, se recomienda el uso de ventilación y equipo de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protección personal (p. ej., mascarillas N95 y guantes). Además, las empresas de tungsteno exigen rutinariamente un control regular de las concentraciones de partículas en el aire en los procedimientos operativos para garantizar el cumplimiento de los límites de exposición ocupacional (por ejemplo, 5 mg/m<sup>3</sup> según lo establecido por OSHA).

En términos de transporte y almacenamiento, el óxido de tungsteno es una sustancia no inflamable y no explosiva, y es relativamente segura. Sin embargo, si el empaque está dañado y el polvo tiene fugas, lo que puede contaminar el ambiente o ser inhalado, use un recipiente hermético con una advertencia. Además, tungsteno news informó que se debe tener especial cuidado cuando se transporta en su forma nano para evitar la difusión debido a la electricidad estática o el viento.

Para la bioseguridad del óxido de nano-tungsteno, los investigadores intentaron reducir la toxicidad a través de la modificación de la superficie. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno compuestas con plástico de tungsteno o PEG han reducido significativamente la citotoxicidad. Además, el crecimiento de la demanda del mercado de tungsteno está impulsando el desarrollo de evaluaciones de seguridad, como el desarrollo de vías de síntesis de baja toxicidad (utilizando materias primas de wolframita).

En aplicaciones prácticas, como biosensores o terapia fototérmica, la seguridad del óxido de tungsteno debe evaluarse sobre una base de aplicación específica. Por ejemplo, el óxido de tungsteno en los dispositivos implantables debe garantizar la biocompatibilidad a largo plazo y evitar reacciones inmunitarias. Los estudios han demostrado que su toxicidad es mucho menor que la de los óxidos de metales pesados (por ejemplo, CdO), pero aún se necesitan más datos clínicos.

## 10.2 Protección ambiental del óxido de tungsteno

Los problemas ambientales del óxido de tungsteno abarcan el impacto en el ecosistema durante las fases de producción, uso y eliminación. A pesar de su baja toxicidad, el consumo de energía, las aguas residuales y las emisiones de escape durante la producción, así como la forma en que se eliminan después de la eliminación, pueden ser una carga para el medio ambiente. Abordar estos problemas es esencial para lograr su aplicación sostenible.

En la fase de producción, la preparación del óxido de tungsteno suele implicar un tostado a alta temperatura o reacciones químicas. Por ejemplo, la descomposición térmica del ácido tungstico para producir óxido de tungsteno requiere una gran cantidad de energía (alrededor de 500–800 ° C) y emisiones de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CO<sub>2</sub>. Además, el académico de tungsteno señaló que si el óxido de tungsteno se extrae utilizando solventes ácido-base como HCl o NaOH, se pueden generar aguas residuales que contienen tungsteno, lo que conducirá a la contaminación del suelo y el agua si se descarga directamente sin tratamiento. Los estudios han demostrado que las concentraciones de tungsteno superiores a 10 mg/L pueden ser tóxicas para organismos acuáticos como los peces.

El impacto ambiental de la producción de nano-óxido de tungsteno es aún más significativo. Por ejemplo, las nanopartículas de óxido de tungsteno sintetizadas por procesos solvotérmicos pueden utilizar disolventes orgánicos (como etanol o DMF) en el proceso, que pueden volatilizarse en la atmósfera o entrar en los sistemas de agua si no se recuperan. Además, cuando las partículas de tungsteno se oxidan para formar óxido de nano-tungsteno, si el polvo no se controla adecuadamente, puede propagarse con el viento y afectar la calidad del aire.

En la fase de uso, el óxido de tungsteno tiene menos impacto ambiental porque es químicamente estable y no se disuelve ni se descompone fácilmente. Por ejemplo, como portador catalítico o recubrimiento ignífugo, casi no libera sustancias nocivas durante su uso. Sin embargo, si las nanopartículas de óxido de tungsteno se liberan al medio ambiente (por ejemplo, a través de la abrasión o el lavado), pueden entrar en el suelo o en las masas de agua, y la acumulación a largo plazo puede perturbar el equilibrio ecológico. Los estudios han demostrado que su deposición en el suelo puede afectar la actividad microbiana, pero el mecanismo específico debe explorarse más a fondo.

La etapa de eliminación es el foco de los problemas de protección ambiental del óxido de tungsteno. Si no se recicla y se deposita en vertederos, los recursos de tungsteno se desperdiciarán y las nanopartículas pueden migrar con el lixiviado. Por ejemplo, los recubrimientos de óxido de tungsteno producidos por la oxidación del filamento de tungsteno pueden ingresar al medio ambiente con desechos si se despegan. Con este fin, la investigación de productos de tungsteno sugiere que el tungsteno se puede recuperar a través de la lixiviación ácida o la reducción a alta temperatura, como la conversión de óxido de tungsteno residual en cobre de tungsteno para lograr el reciclaje.

En términos de optimización ambiental, la producción verde de óxido de tungsteno es la clave. Por ejemplo, la síntesis a baja temperatura con calentadores de tungsteno puede reducir el consumo de energía, mientras que el tungsteno en las aguas residuales se puede recuperar por precipitación.

La protección del medio ambiente del óxido de tungsteno sigue necesitando apoyo político. Por ejemplo, el establecimiento de estándares de emisión y normas de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reciclaje puede reducir eficazmente su huella ecológica. A medida que crezca la demanda de tungsteno, los procesos respetuosos con el medio ambiente, como la extracción directa de la scheelita, se convertirán en una tendencia.

### 10.3 Hoja de datos de seguridad (MSDS) para óxido de tungsteno

La hoja de datos de seguridad (MSDS) es un documento importante para la gestión de la seguridad química, que proporciona información de seguridad estandarizada para la producción, el transporte y el uso de óxido de tungsteno. La siguiente es una lista detallada de los contenidos clave de MSDS para óxido de tungsteno de acuerdo con su naturaleza y prácticas internacionales para garantizar que los operadores y las partes relevantes comprendan sus riesgos y medidas de protección.

#### 1. Etiquetado de productos químicos

- Nombre: Trióxido de tungsteno,  $WO_3$ )
- Número CAS: 1314-35-8
- Aspecto: Polvo amarillo o azul, partículas finas de tamaño nanométrico.

#### 2. Descripción general de los peligros

- Peligros para la salud: La inhalación puede causar irritación respiratoria y la exposición prolongada a altas concentraciones de polvo puede causar molestias pulmonares. El nanoóxido de tungsteno puede ser potencialmente citotóxico.
- Peligros ambientales: Si entra en el agua o en el suelo, puede afectar el ecosistema y debe evitarse.
- Peligros físicos: No inflamables ni explosivos, pero el polvo puede representar un ligero riesgo de incendio.

#### 3. Composición/información de composición

- Pureza: >99% (industrial o nanoescala).
- Impurezas: Puede contener trazas de tungstato o metal de tungsteno sin reaccionar.

#### 4. Medidas de primeros auxilios

- Inhalación: Muévase a un lugar ventilado y busque atención médica de inmediato si tiene problemas para respirar.
- Contacto con la piel: Lavar con agua jabonosa y retirar la ropa contaminada.
- Contacto con los ojos: Enjuague con abundante agua durante al menos 15

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

minutos y busque atención médica si la irritación persiste.

- Ingestión: Enjuáguese la boca, diluya con agua y busque atención médica si es necesario.

## 5. Medidas de protección contra incendios

- Método de extinción de incendios: use polvo seco o arena, no inflamable, pero evite que el polvo vuele.
- Riesgo especial: Los vapores de óxido de tungsteno pueden liberarse a altas temperaturas.

## 6. Tratamiento de emergencia de fugas

- Método: Limpie con una aspiradora o un método húmedo para evitar el polvo fugitivo y recóloquelo en un recipiente sellado.
- Protección: Use una mascarilla contra el polvo y guantes.

## 7. Manipulación y almacenamiento

- Operación: Evite la generación de polvo, use equipo de ventilación local y use equipo de protección.
- Almacenamiento: Almacene en un lugar fresco y seco, lejos de ácidos y oxidantes fuertes, en un recipiente hermético.

## 8. Control de exposición/protección personal

- Límites de exposición: OSHA PEL es de 5 mg/m<sup>3</sup> (en tungsteno).
- Equipo de protección: mascarillas N95, gafas protectoras, guantes y ropa antipolvo si es necesario.

## 9. Propiedades fisicoquímicas

- Punto de fusión: 1473 ° C; Densidad: 7,16 g/cm<sup>3</sup>; Solubilidad: ligeramente soluble en agua (<0,1 g/L).
- Estabilidad: Químicamente estable, no es fácil de descomponer.

## 10. Información toxicológica

- Toxicidad aguda: DL50 (rata, oral) > 2000 mg/kg, baja toxicidad.
- Efectos crónicos: la inhalación a largo plazo puede causar irritación pulmonar, y la citotoxicidad debería ser una preocupación a nanoescala.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## 11. Información ecológica

- Ecotoxicidad: Baja toxicidad para los organismos acuáticos, pero altas concentraciones (>10 mg/L) pueden ser perjudiciales.
- Persistente: No es fácilmente biodegradable y puede acumularse en el medio ambiente.

## 12. Eliminación

- Método: Priorizar el reciclaje, o el vertedero de acuerdo con las regulaciones locales para evitar la descarga directa.
- Nota: Para evitar que el polvo se propague, utilice un embalaje hermético.

## 13. Información de envío

- Clasificación: mercancías no peligrosas, pero deben ser a prueba de humedad y estanqueidad.
- Requisitos de transporte: Marcado con "óxido de tungsteno" e indicado con sugerencias de protección.

## 14. Información reglamentaria

- De conformidad con OSHA, REACH y otras regulaciones, el riesgo a nanoescala debe evaluarse más a fondo de acuerdo con la aplicación.

## 15. Otra información

- Fecha de elaboración: 29 de marzo de 2025 (asumiendo la fecha actual).
- Nota: La MSDS se actualiza periódicamente para garantizar que la información sea coherente con las últimas investigaciones.

Al seguir MSDS, óxido de tungsteno, la gestión de seguridad se puede estandarizar para reducir los riesgos potenciales. Además, las empresas de tungsteno pueden complementar las recomendaciones de seguridad específicas para aplicaciones específicas (por ejemplo, recubrimientos a base de aguja de tungsteno) para garantizar un uso seguro en diversos campos.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



CTIA GROUP LTD óxido de tungsteno amarillo

## Capítulo 11 Normas nacionales y extranjeras para el óxido de tungsteno

Como importante materia prima industrial y material funcional, el óxido de tungsteno ( $WO_3$ ) se utiliza ampliamente en la producción de carburo cementado, catalizadores, dispositivos electrónicos y pantallas ópticas en todo el mundo. Con el fin de garantizar su calidad, rendimiento y seguridad, se han formulado una serie de normas en el país y en el extranjero. Estas normas estandarizan la composición química, las propiedades físicas, el proceso de producción y los métodos de prueba del óxido de tungsteno, y proporcionan una base unificada para la producción, el comercio y la aplicación. Este capítulo discutirá los requisitos y diferencias entre los estándares nacionales e internacionales chinos para el óxido de tungsteno.

En el proceso de estandarización, las propiedades del óxido de tungsteno, como la pureza, el tamaño de partícula y la morfología, son el foco de atención. Los países formulan normas de acuerdo con sus propias necesidades industriales y niveles técnicos, entre los cuales China, como mayor productor de tungsteno del mundo, tiene un sistema de normas relativamente completo, mientras que las normas internacionales prestan más atención a la universalidad del comercio mundial. Además, la investigación sobre el tungsteno ha demostrado que los factores de seguridad y protección del medio ambiente deben tenerse en cuenta en la formulación de normas para cumplir con los requisitos del desarrollo sostenible moderno.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la práctica, la implementación de los estándares de óxido de tungsteno depende del progreso de la tecnología de prueba y la tecnología de producción. Por ejemplo, la optimización de la tecnología de tungsteno puede mejorar la calidad del producto para cumplir con los estándares, mientras que las fluctuaciones en los precios del tungsteno están impulsando el desarrollo de procesos de bajo costo que cumplan con las normas, como la producción eficiente de óxido de tungsteno a partir de paratungstato de amonio.

## 11.1 Normas nacionales chinas

Como el país con las reservas y producción de tungsteno más grandes del mundo, China tiene una base profunda para la producción y aplicación de óxido de tungsteno, y su sistema estándar nacional ha desempeñado un papel clave para garantizar la calidad del producto y promover el desarrollo industrial. La Norma Nacional China (GB/T) tiene disposiciones detalladas sobre la clasificación, los requisitos de calidad y los métodos de prueba del óxido de tungsteno, que es formulado y gestionado principalmente por el Comité Técnico Nacional de Normalización de Metales No Ferrosos (TC243).

### Norma principal: GB/T 3457-2013 "Óxido de tungsteno"

El principal estándar en China es GB/T 3457-2013 "Óxido de tungsteno", que es una revisión de la edición de 1998 (GB/T 3457-1998) y se emitió e implementó en 2013. Divide el óxido de tungsteno en dos tipos: trióxido de tungsteno (tungsteno amarillo,  $WO_3$ ) y óxido de tungsteno azul (tungsteno azul,  $W_{20}O_{58}$ ), que son adecuados para diferentes usos industriales.

- **Clasificación y especificaciones**
  - Tungsteno amarillo ( $WO_3$ ): polvo cristalino de color amarillo claro con requisitos de alta pureza, utilizado principalmente en la producción de polvo metálico de tungsteno y carburo cementado. La norma estipula que el contenido de tungsteno (en  $WO_3$ ) no es inferior al 99,9% (producto de primera clase), y existen límites estrictos para el contenido de impurezas (como Fe, Mo, S, etc.). Por ejemplo, el contenido de hierro (Fe) no debe superar el 0,001%.
  - Tungsteno azul ( $W_{20}O_{58}$ ): polvo cristalino de color azul oscuro o azul-negro, es un estado de oxidación mixto del compuesto de tungsteno, a menudo utilizado para la reducción para preparar polvo de tungsteno. La norma exige un contenido de tungsteno no inferior al 98,5% y tiene disposiciones específicas para el índice de oxígeno y la distribución del tamaño de las partículas.
- Se estandarizaron las propiedades físicas: pares estándar: óxido de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno, el tamaño de partícula, la densidad suelta y la morfología. Por ejemplo, el tamaño de partícula promedio del tungsteno amarillo debe controlarse a 5-25  $\mu\text{m}$  y la densidad suelta debe ser de 1,5-3,0  $\text{g}/\text{cm}^3$  para garantizar su idoneidad para el procesamiento posterior. Además, el polvo de tungsteno, el óxido de tungsteno producido por oxidación, debe pasar la prueba de tamizado para garantizar la uniformidad del tamaño de partícula.

- La composición química GB/T 3457-2013 enumera una tabla detallada de los límites de impurezas. Por ejemplo, el contenido de arsénico (As) en el tungsteno amarillo no debe exceder el 0,0005% y el fósforo (P) no debe exceder el 0,001%. Estos requisitos reflejan la demanda de óxido de tungsteno de alta pureza en China, especialmente en aplicaciones de alta gama, como materiales electrónicos.
- La norma de métodos de ensayo especifica los métodos específicos de análisis químico y pruebas físicas. Por ejemplo, el contenido de tungsteno se determina mediante métodos gravimétricos y espectrofotométricos, y los elementos atrapados se analizan mediante espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente con filamento de tungsteno (ICP-OES). Además, la distribución del tamaño de partícula se puede determinar mediante un analizador láser de tamaño de partícula para garantizar resultados precisos y reproducibles.

#### Otras normas pertinentes

- GB/T 4196-2011 "Ácido tungstónico": Especifica los requisitos de calidad del ácido tungstico como precursor del óxido de tungsteno, ya que a menudo se utiliza en la preparación de óxido de tungsteno de alta pureza.
- GB/T 26038-2010 "Condiciones técnicas para el polvo de tungsteno": involucra indirectamente óxido de tungsteno, porque es la principal materia prima del polvo de tungsteno, los requisitos estándar están estrechamente relacionados con la pureza del óxido de tungsteno.

**Características y aplicación:** La norma nacional china se centra en la viabilidad industrial, con especial énfasis en el control de calidad del óxido de tungsteno en la producción de productos de carburo cementado y tungsteno. Por ejemplo, las empresas de tungsteno como Zhuzhou Cemented Carbide Group siguen estrictamente GB / T 3457-2013 en producción para garantizar que los productos satisfagan las necesidades de los mercados nacionales y extranjeros. Además, Tungsten News informó que la revisión de las normas de China también tiene en cuenta los requisitos de protección del medio ambiente, como la reducción de la descarga de aguas residuales ácidas de la producción.

**Tendencia de desarrollo:** Con el desarrollo de la nanotecnología, China está

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

formulando estándares para el óxido de nano-tungsteno. Por ejemplo, debido al potencial del óxido de tungsteno en el campo de la fotocatalisis, es necesario agregar la detección de la distribución del tamaño de partícula (<100 nm) y el área de superficie específica. Además, la globalización del mercado del tungsteno ha impulsado los esfuerzos para alinearse con los estándares internacionales.

## 11.2 Normas internacionales

Las normas internacionales proporcionan un marco unificado para el comercio mundial y la aplicación del óxido de tungsteno, desarrollado principalmente por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y otros organismos autorizados. Estas normas suelen ser más genéricas y se centran en la coherencia y la compatibilidad técnica entre países para adaptarse a las necesidades industriales y a los requisitos reglamentarios de los diferentes países.

### Norma principal: ISO 10477-1 Especificación general para compuestos de tungsteno

ISO no tiene un estándar independiente para el óxido de tungsteno, pero sus compuestos relacionados, como el tungstato y el polvo de tungsteno, están indirectamente cubiertos por la Especificación General ISO 10477-1 para compuestos de tungsteno. Esta norma fue desarrollada por ISO/TC 119 (Comité Técnico de Pulvimetalurgia) y se aplica a los materiales a base de tungsteno, incluido el óxido de tungsteno.

- Clasificación y especificación La norma ISO 10477-1 considera el óxido de tungsteno como material precursor para la producción de polvo de tungsteno, que se clasifica como grado industrial y grado de alta pureza. Los requisitos de contenido de  $WO_3$  de grado industrial son  $\geq 98\%$ , el grado de alta pureza  $\geq 99,95\%$  y el límite de impurezas (por ejemplo,  $Fe \leq 0,005\%$ ) es ligeramente más ancho que el estándar chino, lo que refleja el equilibrio entre costo y aplicabilidad en el comercio internacional.
- Los estándares de propiedades físicas requieren un tamaño de partícula flexible de óxido de tungsteno, generalmente de 1-50  $\mu m$ , y una densidad aparente de 1,0-3,5  $g/cm^3$ , que se puede ajustar según la aplicación. Además, la película de óxido de tungsteno producida por la oxidación del sustrato de la aguja de tungsteno debe cumplir con los requisitos de claridad óptica y uniformidad.
- Métodos de detección La norma ISO utiliza métodos analíticos aceptados internacionalmente, como la espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) para determinar la composición química y la difracción láser para determinar el tamaño de las partículas. Estos métodos están alineados con la última tecnología de Tungsten Academic, lo que garantiza la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

comparabilidad global de los resultados.

### Otras normas internacionales

- ASTM B771-11 Método de prueba para materiales de tungsteno: Un estándar desarrollado por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM) para probar la pureza y las propiedades físicas del óxido de tungsteno. Por ejemplo, el contenido de oxígeno se prueba mediante una reducción de calentadores de tungsteno.
- JIS H 1403 "Método de análisis de polvo de tungsteno y óxido de tungsteno": La Norma Industrial Japonesa (JIS) tiene regulaciones detalladas para el análisis químico del óxido de tungsteno, enfatizando las aplicaciones de alta pureza (como los semiconductores).

### Características y aplicaciones:

Las normas internacionales se centran más en la similitud y la compatibilidad. Por ejemplo, las normas ISO tienen límites de impurezas laxos para una variedad de usos industriales, mientras que las normas ASTM y JIS están sesgadas hacia aplicaciones de alta gama, como la producción de compuestos de tungsteno y oro.

### Diferencias con los estándares chinos

- **Requisitos de pureza:** Los requisitos de pureza del estándar chino para el tungsteno amarillo ( $\geq 99.9\%$ ) son más altos que los del grado industrial ISO ( $\geq 98\%$ ), lo que refleja la posición de liderazgo de China en el campo de los productos de tungsteno de alta gama.
- **Métodos de detección:** Las normas internacionales utilizan instrumentos más automatizados (como XRF), mientras que las normas chinas tienen en cuenta los métodos químicos tradicionales (como el método gravimétrico), que son adecuados para laboratorios de diferentes niveles técnicos.
- **Consideraciones ambientales:** las normas internacionales tienen requisitos más estrictos para la protección ambiental del proceso de producción, como ISO 14001, debe evaluarse el óxido de tungsteno, el impacto ambiental del ciclo de vida, y las normas chinas aún se están mejorando en este sentido.

### Tendencias

Con el auge del óxido de nanotungsteno en el campo de la optoelectrónica y la biomedicina, las normas internacionales se están acercando a las propiedades de los nanomateriales. Por ejemplo, el ISO/TC 229 (Consejo de Nanotecnología) planea

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

agregar requisitos específicos de pruebas de área de superficie y toxicidad. Además, la globalización del mercado del tungsteno ha promovido la unificación de estándares, como la integración gradual de los estándares chinos GB/T y los estándares ISO.



**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**



CTIA GRUPO LTD WO<sub>3</sub>

## Capítulo 12 Datos y cifras sobre el óxido de tungsteno

Como material industrial importante y compuesto funcional, el óxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>) ha demostrado una amplia gama de aplicaciones en muchos campos debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. El propósito de este capítulo es clasificar sistemáticamente los hechos básicos y los datos detallados del óxido de tungsteno, incluidas sus propiedades físicas y químicas, parámetros de producción e indicadores técnicos de aplicación, y proporcionar una referencia completa para investigadores, ingenieros y profesionales de la industria. La exactitud de los datos se basa en la literatura científica actual y la práctica industrial, lo que garantiza la autoridad y utilidad del contenido.

Al recopilar datos y cifras, la versatilidad del óxido de tungsteno es un enfoque central. Su alta estabilidad, propiedades semiconductoras y propiedades ópticas lo han convertido en una fuente de interés en los campos de la energía, la electrónica y la catálisis. Además, el progreso de la investigación del tungsteno continúa enriqueciendo su sistema de datos, y la optimización de la tecnología de tungsteno promueve la precisión de la producción y la aplicación. La volatilidad de los precios del tungsteno también refleja su demanda en el mercado, proporcionando un telón de fondo económico para el análisis de datos.

### 12.1 ¿Cuáles son los principales hechos del óxido de tungsteno?

Como miembro importante de la familia de compuestos de tungsteno, los hechos

básicos del óxido de tungsteno cubren la composición química, la forma física, los antecedentes históricos y el uso industrial. Estos son los datos clave sobre el óxido de tungsteno que están destinados a proporcionar una comprensión completa de su naturaleza.

- La composición química y la estructura del óxido de tungsteno existen principalmente en forma de trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), con un peso molecular de 231,84 g / mol, que se compone de un átomo de tungsteno y tres átomos de oxígeno. Su estructura cristalina es diversa, incluyendo monoclinica, ortorrómbica y cúbica, siendo la monoclinica la más estable a temperatura ambiente. Además, el óxido de tungsteno azul ( $W_{20}O_{58}$ ) y el óxido de tungsteno amarillo también son comunes en aplicaciones específicas como variantes. El óxido de tungsteno azul es un óxido mixto no estequiométrico que contiene las partes  $W^{5+}$  y  $W^{6+}$ .
- La forma física del óxido de tungsteno generalmente viene en forma de polvo o película delgada. El tungsteno amarillo de grado industrial es un polvo cristalino de color amarillo claro, y el grado nanométrico es una partícula fina (<100 nm). El óxido de tungsteno azul es un polvo de color azul oscuro o azul-negro con un tamaño de partícula ligeramente mayor. Las morfologías de película delgada se preparan principalmente mediante técnicas de deposición para aplicaciones ópticas y electrónicas.
- El descubrimiento y la historia del tungsteno fue descubierto por primera vez en 1781 por el químico sueco Carl Wilhelm Scherer, y el óxido de tungsteno, como su compuesto importante, comenzó a producirse industrialmente a principios del siglo XIX. En los primeros días, se preparaba mediante la descomposición térmica del ácido tungstico y se utilizaba en las industrias de pigmentos y cerámica. Hoy en día, el proceso de producción ha evolucionado para derivarse de la oxidación del metal de tungsteno o de minerales como la wolframita.
- Las principales fuentes de óxido de tungsteno son principalmente minerales de tungsteno, como la scheelita ( $CaWO_4$ ) y la wolframita ( $FeMnWO_4$ ). China es el mayor productor mundial de tungsteno, representando alrededor del 80% de la producción mundial, junto con Rusia, Canadá y Australia. Además, el polvo o chatarra de tungsteno reciclado (por ejemplo, filamento de tungsteno) también es una fuente importante.
- El óxido de tungsteno para uso industrial es un intermediario clave en la producción de productos de tungsteno, como el tungsteno, el cobre y el carburo cementado. En el sector energético, se utiliza en baterías de iones de litio y fotocátalisis; En el campo de la electrónica, se utiliza para transistores y memorias de efecto de campo; En el sector medioambiental, se utiliza para catalizadores y tejidos ignífugos. Además, las empresas de tungsteno lo aplican a dispositivos electrocrómicos, como

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ventanas inteligentes.

- Seguridad y protección del medio ambiente El óxido de tungsteno tiene una baja toxicidad aguda (DL50 >2000 mg/kg, rata oral), pero la inhalación de polvo puede causar irritación respiratoria. El óxido de tungsteno a nanoescala es motivo de especial preocupación debido a su potencial citotoxicidad. En términos de protección del medio ambiente, su consumo de energía de producción es alto (como 500–800 ° C para tostado) y la descarga de aguas residuales debe controlarse estrictamente.
- Mercado y economía Según las noticias de tungsteno, el mercado mundial de óxido de tungsteno tiene una demanda anual de aproximadamente 5–70,000 toneladas, impulsada principalmente por las industrias de carburo cementado y electrónica. China domina la oferta, y se espera que los precios fluctúen a 20–30 dólares/kg en 2025, lo que refleja su equilibrio entre la oferta y la demanda y los costes de producción.
- Avances tecnológicos La nanotransformación del óxido de tungsteno ha sido un foco de investigación en los últimos años, al igual que las nanopartículas generadas por la oxidación de partículas de tungsteno para la terapia fototérmica. Además, la globalización del mercado del tungsteno ha promovido su aplicación en nuevas energías y materiales inteligentes, como la composición con plástico de tungsteno para mejorar la flexibilidad.

Estos hechos han establecido el óxido de tungsteno en la ciencia y la industria, y su diversidad y potencial de desarrollo lo han convertido en un objeto clave de investigación interdisciplinaria.

## 12.2 Todos los datos del óxido de tungsteno (propiedades fisicoquímicas, parámetros técnicos de producción y aplicación)

A continuación se muestran datos completos del óxido de tungsteno, que cubren sus propiedades fisicoquímicas, parámetros técnicos de producción e indicadores clave en la aplicación. Los datos se basan en las últimas investigaciones y estándares de la industria (por ejemplo, GB/T 3457–2013 e ISO 10477-1) y se organizan en combinación con escenarios de aplicación del mundo real.

### Propiedades fisicoquímicas

- Fórmula molecular:  $WO_3$  (principalmente trióxido de tungsteno, el óxido de tungsteno azul es  $W_{20}O_{58}$ ).
- Peso molecular: 231.84 g/mol
- Aspecto: el tungsteno amarillo es polvo amarillo claro, el tungsteno azul es polvo azul oscuro, el nivel nano es partículas finas
- Estructura cristalina: monoclinica (estable a temperatura ambiente, grupo

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

espacial  $P2_1/n$ ), ortorrómbica (fase de alta temperatura), cristal cúbico (común en nanoformas).

- Punto de fusión: 1473 ° C (unos 1700 K).
- Punto de ebullición: alrededor de 1700 ° C (se descompone a W y O<sub>2</sub>).
- Densidad: 7,16 g/cm<sup>3</sup> (tungsteno amarillo), 7,0-7,2 g/cm<sup>3</sup> (tungsteno azul).
- solubilidad: Ligeramente soluble en agua (<0,1 g/L, 25 ° C), soluble en álcali fuerte (como NaOH) para formar tungstato
- Dureza: alrededor de 8,5-9 en la escala de Mohs (cerca de la alúmina).
- Energía de banda prohibida: 2,6-3,0 eV (semiconductor de tipo n, respuesta a la luz visible).
- Conductividad térmica: aproximadamente 1,6 W/m · K (temperatura ambiente)
- Superficie específica: 50-200 m<sup>2</sup>/g en nanómetro y 5-20 m<sup>2</sup>/g en grado industrial
- Tamaño de partícula: grado industrial 5-25 μm, nanoescala 10-100 nm
- Densidad suelta: 1,5-3,0 g/cm<sup>3</sup> (dependiendo del tamaño de partícula).
- Índice de refracción: 2,2-2,5 (rango visible).
- Constante dieléctrica: 20-50 (estado de película delgada, dependiente de la frecuencia).

#### Parámetros técnicos de producción

- **Ingredientes:**

- Mineral: Wolframita, scheelita
- Precursores: Ácido tungstático, Metatungstato de amonio
- Reciclado: aguja de tungsteno, calentador de tungsteno

- **Método de producción:**

- **Método de tostado:**

- Materia prima: polvo de tungsteno o ácido tungstico
- Temperatura: 500-800° C
- Atmósfera: Aire u oxígeno
- Rendimiento: >95%
- Consumo de energía: aprox. 1,5-2 kWh/kg

- **Química húmeda:**

- Materia prima: tungstato de sodio
- Proceso: precipitación ácida + calcinación (400-600° C)
- Pureza: >99.9%
- Aguas residuales: Contienen iones de tungsteno, que deben reciclarse

- **Nanosíntesis:**

- Métodos: método solvotérmico, método hidrotermal
- Temperatura: 150-250° C
- Disolventes: agua, etanol

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Control de tamaño de partícula: 10-100 nm
- **Requisitos de pureza:**
  - Grado industrial:  $WO_3 \geq 98\%$
  - Grado de alta pureza:  $WO_3 \geq 99.95\%$
  - Límites de impurezas (Fe como ejemplo):  $\leq 0.001\%$  (estándar chino),  $\leq 0.005\%$  (ISO)
- **Equipamiento:**
  - Tostador, calentador de tungsteno, autoclave (nanoescala)
  - Detección: XRF, ICP-OES, medidor de tamaño de partícula láser

## Aplicación de parámetros técnicos

### 1. Sector energético

- **Ánodo de batería de iones de litio:**
  - Capacidad teórica: 693 mAh/g
  - Ciclo de vida: 500-1000 veces (80% de capacidad retenida)
  - Voltaje de funcionamiento: 0,01-3,0 V vs. Li/Li<sup>+</sup>
- **Supercondensadores:**
  - Condensador específico: 500-700 F/g
  - Estabilidad del ciclo: > 10.000 ciclos
  - Densidad de potencia: 5-10 kW/kg
- **División fotocatalítica del agua:**
  - Eficiencia fototérmica: 20-40% (808 nm)
  - Tasa de producción de hidrógeno: 100-500  $\mu\text{mol/h} \cdot \text{g}$

### 2. Campo de información electrónica

- **FETs:**
  - Movilidad del portador: 10-20  $\text{cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$
  - Relación de encendido/apagado:  $10^5-10^6$
  - Frecuencia de funcionamiento: Rango MHz-GHz
- **Dispositivo de memoria (RRAM):**
  - Relación de conmutación de resistencia:  $10^3-10^4$
  - Velocidad de borrado: <10 ns
  - Durabilidad: > $10^5$  veces

### 3. En el campo de la ingeniería mecánica

- **Recubrimiento de herramientas:**
  - Dureza: 2000-2500 HV
  - Coeficiente de fricción: 0,4-0,6
  - Resistencia a la temperatura: >800 °C
- **Piezas resistentes al desgaste:**

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Fuerza de unión: >500 MPa
- Tasa de desgaste: <0,01 mm<sup>3</sup>/N·m

#### 4. Campo biomédico

##### ○ Biosensores:

- Límite de detección: grado  $\mu\text{M}$ -nM (por ejemplo, glucosa)
- Tiempo de respuesta: <5 segundos
- Sensibilidad: 10-50  $\mu\text{A}/\text{mM} \cdot \text{cm}^2$

##### ○ Terapia fototérmica:

- Eficiencia de conversión térmica de luz: 40-50% (NIR)
- Rango de calentamiento: 50-60° C
- Biocompatibilidad: Se requiere modificación de PEG

#### 5. Campo de visualización óptica

##### ○ Dispositivos electrocrómicos:

- Cambio de transmitancia: 80%→10%
- Tiempo de respuesta: milisegundos-segundos
- Ciclo de vida: >10<sup>4</sup> veces

#### 6. Portadores catalíticos

##### ○ Catalizadores compatibles:

- Superficie específica: 50-200 m<sup>2</sup>/g
- Tasa de conversión de hidrogenación: >90%
- Resistencia a la temperatura: 500-700 ° C

#### 7. Tejidos ignífugos

- LOI: 28-35%
- Resistencia al calor: >1000 ° C (corto tiempo)
- Conductividad térmica: 1,5-2 W/m·K

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice: Glosario multilingüe de términos de óxido de tungsteno (chino, inglés, japonés, coreano)

categoria	Chino	Inglés	Japonés	Coreano
El nombre de la base	氧化钨	Trióxido de tungsteno	三酸化タングステン	삼산화텨스텐
	三氧化钨	Trióxido de tungsteno	三酸化タングステン	삼산화텨스텐
	钨	Tungsteno	タングステン	텨스텐
	黄钨	Óxido de tungsteno Amarillo	黄色酸化タングステン	황색산화텨스텐
	蓝钨	Óxido de tungsteno azul	青色酸化タングステン	청색산화텨스텐
Forma física	纳米氧化钨	Nano trióxido de tungsteno	ナノ三酸化タングステン	나노삼산화텨스텐
	粉末	Polvo	粉末	분말
	薄膜	Película delgada	薄膜	박막
	晶体	Cristal	結晶	결정
	颗粒	Partícula	粒子	입자
Proceso de producción	焙烧	Calcinación	焼成	소성
	水热法	Método hidrotermal	水熱法	수열법
	溶剂热法	Método solvotérmico	溶媒熱法	용매열법
	化学气相沉积	Deposición química de vapor (CVD)	化学気相蒸着	화학기상증착
	钨酸	Ácido tungstico	タングステン酸	텨스텐산
Campos de aplicación	锂离子电池	Batería de iones de litio	リチウムイオン電池	리튬이온배터리
	超级电容器	Supercondensador	スーパーキャパシタ	슈퍼커패시터
	光催化	Fotocatálisis	光触媒	광촉매
	场效应晶体管	Transistor de efecto de campo (FET)	電界効果トランジスタ	전계효과트랜지스터
	存储器件	Dispositivo de memoria	メモリデバイス	메모리디바이스
	刀具涂层	Recubrimiento de herramientas	工具コーティング	공구코팅
	生物传感器	Biosensor	バイオセンサー	바이오센서
	光热治疗	Terapia fototérmica	光熱療法	광열치료

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

	电致变色器件	Dispositivo electrocrómico	電気変色デバイス	전기변색디바이스
	催化载体	Soporte de Catalyst	触媒担体	촉매지지체
	防火面料	Tejido ignífugo	防火ファブリック	방화직물
Otros términos relacionados	钨粉	Polvo de tungsteno	タングステン粉末	텅스텐분말
	钨丝	Alambre de tungsteno	タングステンワイヤー	텅스텐와이어
	钨铜	Cobre de tungsteno	タングステン銅	텅스텐구리
	硬质合金	Aleación dura	硬質合金	경질합금
	纳米颗粒	Nanopartícula	ナノ粒子	나노입자

### ilustrar

1. **Chino:** Basado en los estándares nacionales chinos (como GB/T 3457-2013) y las prácticas de la industria, para garantizar la estandarización de la terminología.
2. **Español:** Adopta terminología internacional, se ajusta a las normas ISO y ASTM y es ampliamente utilizado en la literatura científica.
3. **Japonés:** Consulte las normas industriales japonesas (por ejemplo, JIS H 1403) y la literatura técnica, y preste atención a los hábitos de pronunciación y escritura.
4. **Coreano:** Basado en las expresiones comúnmente utilizadas en el campo de la química y los materiales coreanos, para garantizar la coherencia con las aplicaciones prácticas.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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