

# Enciclopedia del electrodo de tungsteno puro

中钨智造科技有限公司  
CTIA GROUP LTD

CTIA GRUPO LTD

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

## Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved  
Standard document version number CTIAQCD -MA-E/P 2024 version  
[www.ctia.com.cn](http://www.ctia.com.cn)

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 total 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.



### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## Directorio

### Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Definición y descripción general del electrodo de tungsteno puro
- 1.2 La importancia del electrodo de tungsteno puro en la industria de la soldadura
- 1.3 Antecedentes de la investigación y aplicación de electrodos de tungsteno puro

### Capítulo 2 Características del electrodo de tungsteno puro

- 2.1 Propiedades físicas del electrodo de tungsteno puro
  - 2.1.1 Puntos de fusión y ebullición del electrodo de tungsteno puro
  - 2.1.2 Densidad del electrodo de tungsteno puro
  - 2.1.3 Conductividad térmica y eléctrica del electrodo de tungsteno puro
  - 2.1.4 Coeficiente de expansión térmica del electrodo de tungsteno puro
  - 2.1.5 Presión de vapor del electrodo de tungsteno puro
- 2.2 Propiedades químicas del electrodo de tungsteno puro
  - 2.2.1 Estabilidad química del electrodo de tungsteno puro
  - 2.2.2 Resistencia a la oxidación del electrodo de tungsteno puro
  - 2.2.3 Reactividad del electrodo de tungsteno puro con otros elementos
- 2.3 Características eléctricas del electrodo de tungsteno puro
  - 2.3.1 Trabajo electrónico del electrodo de tungsteno puro
  - 2.3.2 Estabilidad del arco del electrodo de tungsteno puro
  - 2.3.3 Tasa de consumo de electrodo de tungsteno puro
- 2.4 Propiedades mecánicas del electrodo de tungsteno puro
  - 2.4.1 Dureza y fragilidad del electrodo de tungsteno puro
  - 2.4.2 Ductilidad del electrodo de tungsteno puro
  - 2.4.3 Resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia del electrodo de tungsteno puro
- 2.5 Comparación del electrodo de tungsteno puro con otro electrodo de tungsteno
  - 2.5.1 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de cerio
  - 2.5.2 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de lantano
  - 2.5.3 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno Thoriado
  - 2.5.4 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de itrio
  - 2.5.5 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de circonio
- 2.6 Electrodo de tungsteno puro MSDS de CTIA GROUP LTD

### Capítulo 3 Tecnología de preparación y producción de electrodos de tungsteno puro

- 3.1 Preparación de materias primas para electrodos de tungsteno puro
  - 3.1.1 Extracción y purificación de mineral de tungsteno
  - 3.1.2 Preparación de polvo de tungsteno de alta pureza
- 3.2 Proceso de metalurgia en polvo del electrodo de tungsteno puro
  - 3.2.1 Moldeo por prensado de polvo de tungsteno
  - 3.2.2 Proceso de sinterización
  - 3.2.3 Tratamiento térmico y recocido

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 3.3 Procesamiento a presión de electrodo de tungsteno puro
  - 3.3.1 Forja y laminación
  - 3.3.2 Dibujo y dibujo
  - 3.3.3 Conformación de barras de electrodos
- 3.4 Tratamiento superficial del electrodo de tungsteno puro
  - 3.4.1 Limpieza y pulido
  - 3.4.2 Marcas verdes de frotis
- 3.5 Control de calidad del electrodo de tungsteno puro
  - 3.5.1 Inspección de calidad de la materia prima
  - 3.5.2 Supervisión del proceso de producción
  - 3.5.3 Inspección del producto terminado
- 3.6 Dificultades técnicas e innovaciones del electrodo de tungsteno puro
  - 3.6.1 Control de alta pureza
  - 3.6.2 Optimización de la estructura del grano
  - 3.6.3 Mejora de la eficiencia de la producción
  - 3.6.4 Protección del medio ambiente y desarrollo sostenible

#### **Capítulo 4 Usos del electrodo de tungsteno puro**

- 4.1 Aplicaciones de soldadura
  - 4.1.1 Soldadura con gas inerte de tungsteno (TIG)
  - 4.1.2 Aplicaciones en soldadura AC (AC)
  - 4.1.3 Soldadura de magnesio, aluminio y sus aleaciones
- 4.2 Otras aplicaciones industriales
  - 4.2.1 Electrodo de soldadura por resistencia
  - 4.2.2 Corte y pulverización por plasma
  - 4.2.3 Materiales emisores de termoelectrones
  - 4.2.4 Objetivos de pulverización catódica
  - 4.2.5 Contrapesos y elementos calefactores
- 4.3 Aplicaciones de campo especiales
  - 4.3.1 Industria aeroespacial
  - 4.3.2 Industria militar
  - 4.3.3 Industria nuclear
- 4.4 Limitaciones de la aplicación
  - 4.4.1 Deficiencias en la soldadura DC (DC)
  - 4.4.2 Desgaste de los electrodos y problemas de vida útil

#### **Capítulo 5 Equipo de producción para electrodos de tungsteno puro**

- 5.1 Equipo de procesamiento de materia prima para electrodo de tungsteno puro
  - 5.1.1 Equipo de trituración y molienda de mineral de tungsteno
  - 5.1.2 Equipos de purificación química
- 5.2 Equipo de metalurgia en polvo para electrodo de tungsteno puro
  - 5.2.1 Prensas

#### **Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**

- 5.2.2 Sintering Furnaces
- 5.2.3 Hornos de tratamiento térmico al vacío
- 5.3 Equipo de procesamiento a presión para electrodo de tungsteno puro
  - 5.3.1 Máquinas de forja
  - 5.3.2 Trenes de laminación
  - 5.3.3 Máquinas de trefilado
- 5.4 Equipo de tratamiento de superficie para electrodo de tungsteno puro
  - 5.4.1 Equipo de limpieza
  - 5.4.2 Máquinas pulidoras
  - 5.4.3 Equipo aplicador
- 5.5 Equipo de prueba y control de calidad para electrodos de tungsteno puro
  - 5.5.1 Analizadores de composición química
  - 5.5.2 Equipos de análisis de microestructuras
  - 5.5.3 Equipo de prueba de rendimiento físico
- 5.6 Automatización y equipo inteligente para electrodos de tungsteno puro
  - 5.6.1 Aplicación de líneas de producción automatizadas
  - 5.6.2 Sistema de Monitoreo Inteligente

## **Capítulo 6 Normas nacionales y extranjeras para electrodos de tungsteno puro**

- 6.1 Estándares internacionales para electrodos de tungsteno puro
  - 6.1.1 AWS A5.12 (Estándar del Instituto Americano de Soldadura)
  - 6.1.2 ISO 6848 (Organización Internacional de Normalización)
  - 6.1.3 EN 26848 (norma europea)
- 6.2 Estándar nacional chino para electrodos de tungsteno puro
  - 6.2.1 GB/T 4190 (estándar de electrodo de tungsteno)
  - 6.2.2 Estándares relevantes de la industria
- 6.3 Otros estándares nacionales para electrodos de tungsteno puro
  - 6.3.1 JIS Z 3233 (Norma industrial japonesa)
  - 6.3.2 DIN EN ISO 6848 (norma alemana)
- 6.4 Comparación estándar y diferencias del electrodo de tungsteno puro
  - 6.4.1 Requisitos de composición química
  - 6.4.2 Dimensiones y tolerancias
  - 6.4.3 Métodos de prueba de rendimiento
- 6.5 La tendencia de desarrollo de los estándares de electrodos de tungsteno puro
  - 6.5.1 Requisitos medioambientales y de seguridad
  - 6.5.2 Patrones de electrodos de alto rendimiento

## **Capítulo 7 Métodos y tecnologías de detección de electrodos de tungsteno puro**

- 7.1 Detección de composición química de electrodo de tungsteno puro
  - 7.1.1 Análisis espectroscópico (ICP-OES)
  - 7.1.2 Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF)
  - 7.1.3 Valoración química

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 7.2 Propiedades físicas del electrodo de tungsteno puro
  - 7.2.1 Medición de la densidad
  - 7.2.2 Ensayos de dureza
  - 7.2.3 Ensayo de conductividad
- 7.3 Análisis de la microestructura del electrodo de tungsteno puro
  - 7.3.1 Observación con microscopía óptica
  - 7.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)
  - 7.3.3 Análisis granulométrico
- 7.4 Prueba de rendimiento de soldadura del electrodo de tungsteno puro
  - 7.4.1 Prueba de rendimiento del arco
  - 7.4.2 Ensayo de estabilidad del arco
  - 7.4.3 Prueba de tasa de consumo de electrodos
- 7.5 Pruebas ambientales y de seguridad del electrodo de tungsteno puro
  - 7.5.1 Detección de radiactividad (comparación de electrodos de torio-tungsteno)
  - 7.5.2 Detección de polvo y emisiones de escape
- 7.6 Calibración y estandarización de equipos de prueba de electrodos de tungsteno puro
  - 7.6.1 Métodos de calibración de equipos
  - 7.6.2 Normas internacionales de ensayo

## **Capítulo 8 Análisis de las ventajas y desventajas del electrodo de tungsteno puro**

- 8.1 Ventajas del electrodo de tungsteno puro
  - 8.1.1 Bajo costo
  - 8.1.2 Estabilidad a alta temperatura
  - 8.1.3 Adecuado para soldadura de CA
- 8.2 Desventajas del electrodo de tungsteno puro
  - 8.2.1 Mal rendimiento de la soldadura de CC
  - 8.2.2 Alta tasa de consumo de electrodos
  - 8.2.3 Dificultad en arco y arco inestable
- 8.3 Dirección de mejora del electrodo de tungsteno puro
  - 8.3.1 Optimización de procesos
  - 8.3.2 Estudios de aleación
  - 8.3.3 Desarrollo de nuevos materiales de electrodos

## **Capítulo 9 Tendencia de mercado y desarrollo del electrodo de tungsteno puro**

- 9.1 Descripción general del mercado global de electrodos de tungsteno
  - 9.1.1 Principales países productores
  - 9.1.2 Tamaño del mercado y demanda
- 9.2 Análisis del mercado de electrodos de tungsteno de China
  - 9.2.1 Capacidad de producción nacional
  - 9.2.2 Demanda del mercado y campos de aplicación
- 9.3 Tendencia de desarrollo de la tecnología de electrodos de tungsteno puro
  - 9.3.1 Tecnología de producción eficiente

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

- 9.3.2 Proceso de producción respetuoso con el medio ambiente
- 9.3.3 Investigación y desarrollo de un nuevo electrodo de tungsteno
- 9.4 Desafíos del electrodo de tungsteno puro
  - 9.4.1 Fluctuaciones en el precio de las materias primas
  - 9.4.2 Presión regulatoria ambiental
  - 9.4.3 Competencia internacional

## Capítulo 10 Conclusiones

- 10.1 Evaluación completa del electrodo de tungsteno puro
- 10.2 Perspectivas de desarrollo futuro del electrodo de tungsteno puro
- 10.3 Sugerencias de investigación y aplicación del electrodo de tungsteno puro

## Apéndice

- A. Glosario
- B. Referencias

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1 Definición y descripción general del electrodo de tungsteno puro

El electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) es un material de electrodo de soldadura hecho de tungsteno de alta pureza (contenido de tungsteno  $\geq 99.5\%$ ) como materia prima principal, generalmente dopado con óxidos de tierras raras u otros elementos de aleación, producido por un proceso avanzado de pulvimetalurgia, y su superficie está recubierta con marcas verdes para cumplir con las especificaciones de identificación estándar internacional. Como metal raro, el tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto ( $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), alta densidad ( $19,3\text{ g/cm}^3$ ), excelente conductividad eléctrica (alrededor del 30% IACS), conductividad térmica ( $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) y una excelente estabilidad química, lo que hace que el electrodo de tungsteno puro sea uno de los primeros tipos de electrodos utilizados en la soldadura por arco de argón de tungsteno (soldadura TIG). Su alto trabajo de electrones (alrededor de  $4.52\text{ eV}$ ) le da una buena capacidad de emisión de electrones térmicos a altas temperaturas, pero su aplicación es limitada debido a la dificultad de inicio del arco y la insuficiente estabilidad del arco en la soldadura de CC (CC), y se utiliza principalmente para la soldadura de CA (CA), especialmente para la soldadura de aluminio, magnesio y sus aleaciones.

El proceso de preparación de electrodos de tungsteno puro es complejo y preciso, e implica múltiples pasos, desde la purificación del mineral de tungsteno hasta los electrodos terminados. Primero, el polvo de tungsteno de alta pureza se extrae químicamente del mineral de tungsteno (como wolframita o scheelita), y luego se fabrican barras de electrodos mediante prensado y conformado, sinterización, forja, trefilado y pulido de superficies. Los electrodos terminados están disponibles en una variedad de tamaños, que generalmente van de  $0.5$  a  $6.4\text{ mm}$  de diámetro y  $75$  a  $600\text{ mm}$  de longitud, con tamaños comunes que incluyen  $1.0$ ,  $1.6$ ,  $2.4$ ,  $3.2$  y  $4.0\text{ mm}$  para satisfacer diferentes necesidades de equipos y procesos de soldadura. Además, la calidad de la superficie y la tolerancia dimensional de los electrodos de tungsteno puro son fundamentales para el rendimiento de la soldadura, por lo que el contenido de impurezas y la estructura del grano deben controlarse estrictamente durante el proceso de producción para garantizar la estabilidad y durabilidad del electrodo en entornos de arco de alta temperatura.

### 1.2 La importancia del electrodo de tungsteno puro en la industria de la soldadura

El electrodo de tungsteno puro tiene una posición insustituible en la industria de la soldadura, especialmente en la soldadura por arco de argón y tungsteno (soldadura TIG), debido a sus propiedades físicas y químicas únicas, se ha convertido en el material preferido para la soldadura de CA. En primer lugar, el alto punto de fusión y la excelente estabilidad a alta temperatura de los electrodos de tungsteno puro les permiten mantener la integridad estructural en entornos de alta corriente (normalmente  $100\text{--}300\text{ A}$ ) y arco de alta temperatura (alrededor de  $6000\text{--}7000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), lo que reduce significativamente el consumo de electrodos y prolonga la vida útil, mejorando así la eficiencia y la calidad de la soldadura. En segundo lugar, en la soldadura de CA, el electrodo de tungsteno puro puede formar un electrodo hemisférico estable, que ayuda a distribuir uniformemente la energía del arco, eliminar eficazmente la película de óxido en la superficie de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

metales ligeros como el aluminio y el magnesio y sus aleaciones, y formar una soldadura suave y densa para satisfacer las necesidades de soldadura de alta precisión.

En comparación con los electrodos de tungsteno dopados con óxidos de tierras raras (como el electrodo de tungsteno de cerio, el electrodo de tungsteno de lantano o el electrodo de tungsteno de torio), el electrodo de tungsteno puro tiene importantes ventajas de costo y características respetuosas con el medio ambiente. Dado que no contiene elementos radiactivos (por ejemplo, torio), los electrodos de tungsteno puro no tienen riesgo de radiación durante su uso y eliminación, y cumplen con los requisitos de las regulaciones modernas de fabricación ecológica y protección del medio ambiente. Esta característica lo hace muy deseable en industrias con altos requisitos de seguridad, como la aeroespacial y la fabricación de dispositivos médicos. Además, el proceso de producción de electrodo de tungsteno puro es maduro, las fuentes de materia prima son amplias y el precio es relativamente estable, lo que lo hace económico en la producción industrial a gran escala.

Los campos de aplicación de los electrodos de tungsteno puro cubren muchas industrias manufactureras de alta gama. En la industria automotriz, los electrodos de tungsteno puro se utilizan para soldar cuerpos y piezas de aluminio; En el campo aeroespacial, se utiliza para la soldadura de precisión de aleaciones de titanio y aleaciones de aluminio; En la industria eléctrica y electrónica, se utiliza para soldar metales de paredes delgadas y componentes en miniatura. Gracias a la transformación y actualización de la industria manufacturera mundial y la creciente demanda de procesos de soldadura de alta calidad, la demanda del mercado de electrodos de tungsteno puro continúa expandiéndose. Aunque algunas de sus limitaciones en la soldadura de CC han llevado a la sustitución de los electrodos dopados en algunas aplicaciones, los electrodos de tungsteno puro siguen siendo indispensables en la soldadura de CA, la soldadura por resistencia y algunos procesos de corte y pulverización por plasma.

### **1.3 Antecedentes de la investigación y aplicación de electrodos de tungsteno puro**

Como metal raro estratégico, el tungsteno ha sido ampliamente utilizado en campos industriales y militares desde finales del siglo XIX debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas. La investigación y el desarrollo y la aplicación del electrodo de tungsteno puro comenzaron a principios del siglo XX, lo que está estrechamente relacionado con el nacimiento y desarrollo de la tecnología de soldadura por arco de argón de tungsteno. En la década de 1910, los electrodos de tungsteno se utilizaron por primera vez en experimentos de soldadura, y su alto punto de fusión y capacidades de emisión térmica de electrones los convirtieron rápidamente en el material central para la soldadura TIG. Sin embargo, debido al alto trabajo de escape de electrones en el electrodo de tungsteno puro temprano, existen problemas de iniciación e inestabilidad del arco en la soldadura de CC, lo que limita su rango de aplicación. Para superar estas deficiencias, los investigadores han estado explorando electrodos de tungsteno dopados con óxidos de tierras raras (por ejemplo, óxido de cerio, óxido de lantano, óxido de torio) desde mediados del siglo XX para reducir el trabajo de electrones y mejorar el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco. Aunque los electrodos dopados funcionan bien en la soldadura de CC, los electrodos de tungsteno puro conservan una posición importante en el mercado debido a su no radiactividad, bajo costo e idoneidad para la

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

soldadura de CA.

A finales del siglo XX, con el rápido desarrollo de la industria aeroespacial, la fabricación de automóviles, la industria nuclear y las industrias electrónica y eléctrica, la demanda de materiales de soldadura de alto rendimiento aumentó significativamente, lo que promovió la mejora continua del proceso de producción de electrodos de tungsteno puro. Las tecnologías de producción modernas incluyen la preparación de polvo de tungsteno de alta pureza, la formación de prensa isostática, la sinterización al vacío, la forja de precisión y el trefilado automatizado, etc., que mejoran significativamente la pureza, la uniformidad del grano y las propiedades mecánicas del electrodo. Además, las normas internacionales (por ejemplo, AWS A5.12, ISO 6848) y las normas nacionales chinas (por ejemplo, GB/T 4190) especifican la composición química, la tolerancia dimensional, la calidad de la superficie y los métodos de prueba de rendimiento de los electrodos de tungsteno puro, lo que promueve su producción y aplicación estandarizadas en el mercado global.

Como país con las mayores reservas de recursos de tungsteno del mundo (alrededor de 1,9 millones de toneladas, lo que representa más del 50% del total mundial) y la producción (alrededor del 80% de la del mundo en 2024), China tiene una cadena industrial completa, desde la minería de tungsteno, la fundición hasta la fabricación de electrodos. A través de la innovación tecnológica y la producción a gran escala, las empresas nacionales han mejorado significativamente la competitividad internacional de los electrodos de tungsteno puro. Al mismo tiempo, las plataformas de información de la industria como Chinatungsten Online Technology Co., Ltd. publican tendencias del mercado, progreso técnico e información de precios a través del sitio web y la cuenta oficial de WeChat, proporcionando soluciones personalizadas para clientes globales y convirtiéndose en una fuente autorizada de información en la industria de productos de tungsteno.

En la actualidad, las direcciones de investigación de los electrodos de tungsteno puro incluyen la optimización de la estructura del grano para mejorar la resistencia al desgaste y la estabilidad del arco, el desarrollo de procesos de producción eficientes y respetuosos con el medio ambiente para reducir el consumo de energía y las emisiones, y la exploración de nuevos materiales de electrodos para satisfacer diversas necesidades de soldadura. Además, el énfasis mundial en la fabricación ecológica y el desarrollo sostenible ha promovido el desarrollo y la aplicación de electrodos no radiactivos, y los electrodos de tungsteno puro tienen una ventaja en esta tendencia debido a sus características respetuosas con el medio ambiente. En el futuro, con el mayor desarrollo de la fabricación de nuevos equipos energéticos, aeroespaciales y de alta gama, la perspectiva de aplicación del electrodo de tungsteno puro será más amplia.

**Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**



**electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD**

## **Capítulo 2 Características del electrodo de tungsteno puro**

### **2.1 Propiedades físicas del electrodo de tungsteno puro**

El electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) ocupa una posición importante en la industria de la soldadura debido a sus excelentes propiedades físicas. Su alto punto de fusión, alta densidad, excelente conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica y baja presión de vapor lo convierten en un material indispensable en la soldadura por arco de argón de tungsteno (soldadura TIG), especialmente en la soldadura AC (AC). La siguiente es una discusión detallada de las propiedades físicas de los electrodos de tungsteno puro.

#### **2.1.1 Puntos de fusión y ebullición del electrodo de tungsteno puro**

El tungsteno es el elemento con el punto de fusión más alto de todos los metales, con un punto de fusión de 3422 °C (aproximadamente 3695 K) y un punto de ebullición de 5660 °C (aproximadamente 5933 K) para los electrodos de tungsteno puro. Esta característica permite que los electrodos de tungsteno puro mantengan la integridad estructural en entornos de arco de alta temperatura (aproximadamente 6000-7000 °C), lo que reduce el riesgo de fusión del electrodo o quemado excesivo. En la soldadura TIG, el alto punto de fusión garantiza que el electrodo pueda mantener una forma de extremo estable a altas corrientes (100-300 A), especialmente cuando se sueldan metales ligeros de CA como el aluminio y el magnesio, el electrodo puede formar un extremo semiesférico, lo que contribuye a la distribución uniforme del arco. Sin embargo, el alto punto de fusión también significa que los electrodos de tungsteno puro requieren un mayor aporte de energía durante el procesamiento, lo que aumenta los costos de producción.

#### **Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 2.1.2 Densidad del electrodo de tungsteno puro

La densidad de los electrodos de tungsteno puro es de 19,3 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C, cercana al oro (19,32 g/cm<sup>3</sup>) y 2,5 veces superior a la del acero (7,8 g/cm<sup>3</sup>). La alta densidad le da al electrodo una excelente estabilidad mecánica y resistencia a las vibraciones, y puede soportar la fuerza de impacto generada por el arco durante el proceso de soldadura, lo que reduce el riesgo de deformación o rotura del extremo. Además, la alta densidad hace que los electrodos de tungsteno puro sean una aplicación potencial en contrapesos y aplicaciones aeroespaciales. Sin embargo, la alta densidad también aumenta el peso de los electrodos, lo que puede ser un desafío para algunos equipos de soldadura que requieren un diseño liviano.

### 2.1.3 Conductividad térmica y eléctrica del electrodo de tungsteno puro

El electrodo de tungsteno puro tiene buena conductividad térmica y eléctrica, su conductividad térmica es de aproximadamente 173 W / m·K (temperatura ambiente) y su conductividad eléctrica es de aproximadamente el 30% IACS (estándar internacional de cobre recocido). La excelente conductividad térmica permite que el electrodo disipe rápidamente el calor generado por el arco, lo que reduce el riesgo de sobrecalentamiento del electrodo y prolonga la vida útil. La buena conductividad eléctrica garantiza que el electrodo pueda transmitir corriente de manera eficiente durante el proceso de soldadura y mantener un arco estable. Sin embargo, el tungsteno puro tiene una conductividad eléctrica más baja en comparación con el cobre (conductividad térmica de aproximadamente 400 W/m·K y conductividad del 100% IACS), lo que puede hacer que el electrodo se sobrecaliente y afecte la estabilidad del arco en la soldadura de CC (CC) de alta corriente. Por lo tanto, los electrodos de tungsteno puro son más adecuados para escenarios de soldadura de CA.

### 2.1.4 Coeficiente de expansión térmica del electrodo de tungsteno puro

Los electrodos de tungsteno puro tienen un bajo coeficiente de expansión térmica de aproximadamente  $4,5 \times 10^{-6}/K$  (20-1000 °C). El bajo coeficiente de expansión térmica significa que el electrodo tiene poco cambio dimensional durante la soldadura a alta temperatura, manteniendo la forma y la estabilidad dimensional y reduciendo las grietas o deformaciones debidas al estrés térmico. Esto es especialmente importante en la soldadura de precisión, como los componentes aeroespaciales. Sin embargo, el bajo coeficiente de expansión térmica también hace posible que los electrodos de tungsteno puro generen tensiones interfaciales cuando el coeficiente de expansión térmica es bastante diferente al de un sustrato (por ejemplo, acero o aluminio), lo que debe mitigarse mediante la optimización del proceso (por ejemplo, precalentamiento).

### 2.1.5 Presión de vapor del electrodo de tungsteno puro

La presión de vapor de los electrodos de tungsteno puro a altas temperaturas es extremadamente baja, solo 0 Pa a 3000 °C [2]. La baja presión de vapor significa que el electrodo es extremadamente bajo en el entorno de arco de alta temperatura, lo que reduce la pérdida por vaporización del material del electrodo y prolonga la vida útil del electrodo. Esto es particularmente importante en la soldadura continua a largo plazo, como la soldadura automatizada en la producción industrial. Sin embargo, a temperaturas muy altas (por ejemplo, cerca del punto de ebullición), la presión de vapor aumenta

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

significativamente, lo que puede provocar ligeras pérdidas en el electrodo y afectar la estabilidad del arco.

## 2.2 Propiedades químicas del electrodo de tungsteno puro

Las propiedades químicas de los electrodos de tungsteno puro se reflejan principalmente en su estabilidad química, resistencia a la oxidación y reactividad con otros elementos. Estas características determinan la idoneidad y durabilidad del electrodo en diferentes entornos de soldadura.

### 2.2.1 Estabilidad química del electrodo de tungsteno puro

El tungsteno es extremadamente estable químicamente a temperatura ambiente y a temperaturas medias-bajas, no reacciona con la mayoría de los ácidos, bases o soluciones salinas, y solo se disuelve lentamente en ácidos fuertemente oxidantes como los ácidos nítrico o fluorhídrico concentrado. En la soldadura TIG, los electrodos de tungsteno puro suelen funcionar bajo la protección de un gas inerte como el argón o el helio, que es químicamente estable y le permite resistir la corrosión en el entorno de soldadura, manteniendo una superficie limpia y la estabilidad del arco. Sin embargo, en atmósferas de gas no inerte (por ejemplo, atmósferas que contienen oxígeno o vapor acuoso), la estabilidad química del tungsteno disminuye y se requiere un control del proceso para evitar la oxidación de la superficie del electrodo.

### 2.2.2 Resistencia a la oxidación del electrodo de tungsteno puro

Los electrodos de tungsteno puro tienen poca resistencia a la oxidación a altas temperaturas y comienzan a reaccionar con el oxígeno a aproximadamente 400 °C o más para formar trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ), y la tasa de oxidación se acelera significativamente a temperaturas más altas (por ejemplo, por encima de 800 °C) [21]. En la soldadura TIG, la protección con gas inerte puede prevenir eficazmente la oxidación del electrodo, pero si el flujo de gas protector es insuficiente o se interrumpe, se formará rápidamente una capa de óxido amarillo o azul en la superficie del electrodo, lo que provocará inestabilidad del arco o incluso la falla del electrodo. Por lo tanto, es necesario garantizar una protección estable del gas durante las operaciones de soldadura y comprobar regularmente el estado de la superficie de los electrodos. Además, los electrodos de tungsteno puro no son tan resistentes a la oxidación como los electrodos dopados con óxidos de tierras raras (como los electrodos de tungsteno de cerio o lantano), lo que limita su aplicación en algunos entornos hostiles.

### 2.2.3 Reactividad del electrodo de tungsteno puro con otros elementos

Los electrodos de tungsteno puro son menos reactivos con otros elementos (por ejemplo, carbono, nitrógeno, hidrógeno) a altas temperaturas, pero pueden reaccionar bajo ciertas condiciones. Por ejemplo, en atmósferas que contienen carbono como CO o CH<sub>4</sub>, el tungsteno puede formar carburo de tungsteno (WC), lo que resulta en una mayor dureza de la superficie pero una mayor fragilidad, lo que afecta la soldabilidad. En atmósferas que contienen nitrógeno, el tungsteno puede formar nitruro de tungsteno (WN), pero la velocidad de reacción es lenta y tiene un efecto limitado en el rendimiento del electrodo. Además, el tungsteno tiene poca reacción química con los metales en el

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

baño fundido (por ejemplo, aluminio, magnesio), lo que garantiza la pureza de la soldadura. Estas propiedades hacen que los electrodos de tungsteno puro sean adecuados para soldar materiales de alta pureza, pero evitan el contacto directo con la atmósfera activa.

### 2.3 Características eléctricas del electrodo de tungsteno puro

Las propiedades eléctricas de los electrodos de tungsteno puro afectan directamente su rendimiento en la soldadura TIG, incluido el rendimiento de iniciación del arco, la estabilidad del arco y la tasa de consumo de electrodos. Se analiza desde tres aspectos: derivación del trabajo de electrones, estabilidad del arco y tasa de consumo de electrodos.

#### 2.3.1 Trabajo electrónico del electrodo de tungsteno puro

El trabajo de electrones es una medida de la dificultad de emitir electrones calientes del material, y el trabajo de electrones del electrodo de tungsteno puro es relativamente alto, alrededor de 4.52 eV. El alto trabajo de electrones significa que el electrodo necesita un voltaje más alto para iniciar un arco en la etapa inicial de la soldadura, especialmente en la soldadura de CC, que tiene un rendimiento deficiente de iniciación del arco y es propensa a no formar arcos o saltar el arco. En corriente alterna (CA), el efecto alternante de los semiciclos positivos y negativos de corriente alterna puede aliviar parcialmente la dificultad de la formación de arcos, pero aún se requiere un voltaje de arco más alto. Por el contrario, los electrodos dopados con óxidos de tierras raras (como los electrodos de tungsteno de cerio, con un trabajo de electrones de aproximadamente 2,7-3,0 eV) tienen un mejor rendimiento de iniciación de arco, que es la razón principal de la aplicación limitada de electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CC.

#### 2.3.2 Estabilidad del arco del electrodo de tungsteno puro

La estabilidad del arco se refiere a la capacidad del arco para permanecer continuo y uniforme durante el proceso de soldadura. El electrodo de tungsteno puro tiene buena estabilidad de arco en la soldadura de CA, porque su alto punto de fusión y conductividad térmica pueden mantener una forma de electrodo estable (hemisférica) para garantizar una distribución uniforme de la energía del arco. Sin embargo, en la soldadura de CC, el arco es propenso a la deriva o interrupción debido al alto trabajo de electrones y la baja eficiencia de emisión de electrones térmicos, especialmente a bajas corrientes (<50 A) o altas frecuencias. Además, la contaminación de la superficie del electrodo (por ejemplo, óxido o aceite) puede reducir aún más la estabilidad del arco, por lo que es necesario afilar las piezas del electrodo con regularidad para mantenerlas limpias.

#### 2.3.3 Tasa de consumo de electrodo de tungsteno puro

La tasa de consumo de electrodo se refiere a la tasa a la que el electrodo se reduce debido a la fusión, evaporación o pérdida mecánica durante el proceso de soldadura. Los electrodos de tungsteno tienen una alta tasa de consumo de electrodos, especialmente a altas corrientes (>200 A) o soldadura continua a largo plazo, debido a su alto trabajo de escape de electrones, lo que conduce a una alta temperatura del electrodo, lo que acelera la volatilización y el quemado del material. En la soldadura de CA, la formación de extremos semiesféricos ralentiza parcialmente el consumo, pero en la conexión positiva de CC (DCSP), la tasa de consumo de electrodos es significativamente mayor que

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la de los electrodos dopados (por ejemplo, electrodos de cerio tungsteno o lantano tungsteno). Para reducir la tasa de consumo, es necesario optimizar los parámetros de soldadura (por ejemplo, corriente, flujo de gas) y afilar el electrodo con regularidad para mantener el ángulo de la punta.

## 2.4 Propiedades mecánicas de los electrodos de tungsteno puro

Las propiedades mecánicas de los electrodos de tungsteno puro incluyen dureza, fragilidad, ductilidad y resistencia a altas temperaturas, que determinan su rendimiento en la producción, el procesamiento y el uso.

### 2.4.1 Dureza y fragilidad del electrodo de tungsteno puro

Los electrodos de tungsteno puro tienen una dureza extremadamente alta, la dureza Vickers (HV) a temperatura ambiente es de aproximadamente 350-450, cerca del carburo de tungsteno (HV aproximadamente 500). Su alta dureza le confiere una excelente resistencia al desgaste y es capaz de soportar el impacto del arco y el desgaste mecánico. Sin embargo, la estructura cristalina del tungsteno (cubo centrado en el cuerpo) lo hace muy frágil, especialmente a temperatura ambiente, y es propenso a fracturas frágiles. Durante el proceso de producción, la fragilidad se reduce mediante la forja y el recocido a alta temperatura, pero el electrodo terminado aún debe manipularse con cuidado para evitar fracturas debido a caídas o impactos. En la soldadura, la alta dureza del electrodo ayuda a mantener la morfología del extremo, pero la fragilidad puede causar microfisuras en los extremos, lo que afecta la estabilidad del arco.

### 2.4.2 Ductilidad del electrodo de tungsteno puro

La ductilidad de los electrodos de tungsteno puro es pobre, casi no hay capacidad de deformación plástica a temperatura ambiente y el alargamiento a la rotura es cercano al 0%. A altas temperaturas (>1200 °C), el tungsteno tiene una ligera mejora en la ductilidad y se puede formar por forja o trefilado. Sin embargo, la ductilidad a altas temperaturas sigue siendo limitada, y la temperatura y la tasa de deformación deben controlarse estrictamente durante el procesamiento para evitar el agrietamiento. En las aplicaciones de soldadura, la poca ductilidad dificulta que los electrodos se adapten a las necesidades de soldadura de formas complejas, pero su alta dureza y estabilidad compensan esta carencia.

### 2.4.3 Resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia del electrodo de tungsteno puro

Los electrodos de tungsteno puro tienen una excelente resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia a altas temperaturas. A más de 2000 °C, su resistencia a la tracción aún puede alcanzar los 100-200 MPa, y su resistencia a la fluencia supera con creces la de la mayoría de los metales. Esta propiedad permite que el electrodo mantenga la estabilidad mecánica en un entorno de arco de alta temperatura, reduciendo la deformación o fractura debido al estrés térmico. La resistencia a la fluencia garantiza la estabilidad de la morfología terminal y prolonga la vida útil durante la soldadura continua a largo plazo. Sin embargo, el crecimiento del grano a altas temperaturas puede reducir la resistencia, y se requiere el refinamiento del grano a través de la optimización del proceso de producción, como el control de la temperatura de sinterización.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## 2.5 Comparación del electrodo de tungsteno puro con otro electrodo de tungsteno

Existen diferencias significativas en el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro y otros electrodos de tungsteno dopados (como los electrodos de tungsteno cerio, tungsteno de lantano, tungsteno de torio, tungsteno de itrio y tungsteno de circonio). La siguiente es una comparación de los aspectos del rendimiento de la soldadura, los escenarios de aplicación, las ventajas y las desventajas.

### 2.5.1 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de cerio y tungsteno

El electrodo de tungsteno de cerio (electrodo WC) está dopado con 2%-4% de óxido de cerio ( $\text{CeO}_2$ ) en una matriz de tungsteno), la escala de colores es gris. El trabajo electrónico del electrodo de cerio-tungsteno es menor (aproximadamente 2.7-3.0 eV) y el rendimiento de iniciación del arco es mejor que el del electrodo de tungsteno puro, especialmente en soldadura de CC de baja corriente (<100 A). Además, los electrodos de tungsteno de cerio tienen una alta estabilidad de arco y una baja tasa de consumo de electrodos, lo que es adecuado para la soldadura de CC de acero inoxidable, acero al carbono y otros materiales. Por el contrario, los electrodos de tungsteno puro son difíciles de arquear e inestables en la soldadura de CC, pero su costo es bajo y adecuado para la soldadura de CA de aleaciones de aluminio y magnesio. El electrodo de tungsteno de cerio no es radiactivo y cumple con los requisitos de protección del medio ambiente, pero en la soldadura de CA de alta corriente, el extremo es fácil de formar de forma irregular y la estabilidad del arco no es tan buena como la del electrodo de tungsteno puro.

### 2.5.2 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de lantano

Los electrodos de lantano y tungsteno (electrodos WL) están dopados con 1%-2% de óxido de lantano ( $\text{La}_2\text{O}_3$ ) y son de color azul o dorado. El trabajo electrónico del electrodo de tungsteno de lantano es de aproximadamente 2.8-3.2 eV, y el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco son mejores que los del electrodo de tungsteno puro, que es adecuado para la soldadura de CC y CA. Su baja tasa de consumo de electrodo y su morfología final estable a altas temperaturas lo hacen adecuado para la soldadura de alta precisión (por ejemplo, componentes aeroespaciales). El electrodo de tungsteno puro forma una forma hemisférica estable en el extremo en la soldadura de CA, que es adecuada para la soldadura de aleación de aluminio, pero su rendimiento es pobre en la soldadura de CC. Además, el costo de producción de los electrodos de tungsteno de lantano es más alto que el de los electrodos de tungsteno puro, lo que limita su promoción en aplicaciones de bajo costo.

### 2.5.3 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de wolframio toriado

Los electrodos de tungsteno de torio (electrodos WT) están dopados con 1%-2% de óxido de torio ( $\text{ThO}_2$ ) y son de color rojo o amarillo. Los electrodos de torio y tungsteno tienen el menor trabajo de electrones (aproximadamente 2,6 eV) y un excelente rendimiento de iniciación de arco y estabilidad del arco, y se utilizan ampliamente en la soldadura de CC de acero al carbono, acero inoxidable y aleaciones de níquel. Su baja tasa de consumo de electrodos permite una alta densidad de corriente permitida (>200 A). Sin embargo, el óxido de torio es radiactivo (dosis de radiación de aproximadamente  $3,60 \times 10^5$  Curie/kg) y es potencialmente dañino para los seres humanos y el medio

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

ambiente [17]. Los electrodos de tungsteno puro no son radiactivos, son de bajo costo y son adecuados para la soldadura de CA, pero su rendimiento en la soldadura de CC es muy inferior al de los electrodos de tungsteno toriado. En la actualidad, los electrodos de torio-tungsteno se reemplazan gradualmente por electrodos de cerio-tungsteno o lantano tungsteno en áreas con estrictos requisitos de protección ambiental.

#### 2.5.4 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de itrio

El electrodo de tungsteno de itrio (electrodo WY) dopado con un 2% de óxido de itrio ( $Y_2O_3$ ) con código de color azul oscuro, se utiliza principalmente para la soldadura de CC en los campos militar y aeroespacial. El trabajo electrónico de los electrodos de itrio-tungsteno es de aproximadamente 2,9 eV, con un excelente rendimiento de iniciación del arco y estabilidad del arco, bajo consumo de electrodos y adecuado para la soldadura de alta corriente (por ejemplo, aleaciones de titanio). Los electrodos de tungsteno puro rara vez se usan en estos campos debido a su difícil iniciación del arco e inestabilidad del arco. Los electrodos de itrio-tungsteno tienen altos costos de producción y una gama limitada de aplicaciones de mercado, mientras que los electrodos de tungsteno puro todavía se usan ampliamente debido a su economía e idoneidad para la soldadura de CA.

#### 2.5.5 Electrodo de tungsteno puro y electrodo de tungsteno de circonio

Electrodo de circonio-tungsteno (electrodo WZ) dopado con 0.3% -0.8% de zirconia ( $ZrO_2$ ), el código de color es marrón o blanco y está diseñado para soldadura de CA. El trabajo electrónico del electrodo de tungsteno y circonio es de aproximadamente 4.0 eV, que es ligeramente menor que el del electrodo de tungsteno puro, y el rendimiento de iniciación del arco es ligeramente mejor, y la estabilidad del arco es alta, lo que es adecuado para la soldadura de CA de aleaciones de aluminio y magnesio. Su tasa de consumo de electrodo es menor que la del electrodo de tungsteno puro y la forma del extremo es más estable. Los electrodos de tungsteno puro son similares a los electrodos de tungsteno de circonio en la soldadura de CA, pero a un costo menor y adecuados para aplicaciones sensibles a los costos. El proceso de producción de electrodos de tungsteno y circonio es complejo y el precio es alto, lo que limita su cuota de mercado.

### 2.6 Electrodo de tungsteno puro MSDS de CTIA GROUP LTD

La hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS) es un documento importante que describe el uso, el almacenamiento y la eliminación seguros de los electrodos de tungsteno puro. El siguiente es un resumen de los principales contenidos de la MSDS del electrodo de tungsteno puro:

Parte I: Nombre del producto

Nombre: Electrodo de tungsteno puro (WP)

Nº CAS:7440-33-7

Parte II: Composición/Información de composición

Contenido principal  $W \geq 99.95\%$

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Contenido total de impurezas  $\leq 0.05\%$

### Parte III: Panorama general de los peligros

Riesgos para la salud: Este producto no irrita los ojos ni la piel.

Peligro de explosión: Este producto no es inflamable ni irritante.

### Parte IV: Medidas de primeros auxilios

Contacto piel con piel: Quítese la ropa contaminada y enjuague con abundante agua corriente.

Contacto con los ojos: Levante el párpado y enjuague con agua corriente o solución salina.

Tratamiento médico.

Inhalación: Retirar de la escena al aire libre. Si tiene dificultad para respirar, dele oxígeno.

Tratamiento médico.

Ingesta: Beba abundante agua tibia para inducir el vómito. Tratamiento médico.

### Parte V: Medidas de protección contra incendios

Productos de combustión nocivos: Los productos de descomposición natural son desconocidos.

Método de extinción de incendios: Los bomberos deben usar máscaras antigás y trajes de extinción de incendios de cuerpo completo para extinguir el fuego en la dirección de barlovento. Agente

extintor de incendios: polvo de cuero seco, arena.

### Parte VI: Manejo de Emergencia de Derrames

Tratamiento de emergencia: Aísle el área contaminada por fugas y restrinja el acceso. Corta la fuente de fuego. Se recomienda a los servicios de emergencia que usen máscaras contra el polvo (máscaras faciales completas) y ropa protectora. Evite el polvo, límpielo con cuidado, póngalo en una bolsa y transfíralo a un lugar seguro. Si hay una gran cantidad de fugas, cúbrala con un paño plástico o una lona. Recolectar y reciclar o transportar a un sitio de eliminación de desechos para su eliminación.

### Parte VII: Manipulación, manipulación y almacenamiento

Precauciones para la operación: Los operadores deben estar especialmente capacitados y seguir estrictamente los procedimientos operativos. Se recomienda que los operadores usen máscaras antipolvo filtrantes autocebantes, gafas de seguridad química, overoles anti-penetración de veneno y guantes de goma. Manténgase alejado del fuego y las fuentes de calor, y está estrictamente prohibido fumar en el lugar de trabajo. Utilice sistemas y equipos de ventilación a prueba de explosiones. Evite la generación de polvo. Evite el contacto con oxidantes y halógenos. Al manipular, es necesario cargar y descargar ligeramente para evitar daños en el embalaje y los contenedores. Equipado con las variedades y cantidades correspondientes de equipos de extinción de incendios y equipos de tratamiento de emergencia de fugas. Los recipientes vacíos pueden dejar

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

sustancias nocivas.

Precauciones de almacenamiento: Almacene en un almacén fresco y ventilado. Mantener alejado del fuego y de fuentes de calor. Debe almacenarse por separado de los oxidantes y halógenos, y no debe mezclarse. Equipado con la variedad y cantidad correspondiente de equipos de extinción de incendios. El área de almacenamiento debe estar equipada con materiales adecuados para contener el derrame.

#### Parte VIII: Control de la exposición/Protección personal

China MAC (mg/m<sup>3</sup>): 6

URSS MAC (mg/m<sup>3</sup>): 6

TLVTN: ACGIH 1mg/m<sup>3</sup>

TLVWN: ACGIH 3mg/m<sup>3</sup>

Método de monitoreo: método de espectroluminiscencia de tiocianuro de potasio-cloruro de titanio  
Control de ingeniería: el proceso de producción está libre de polvo y totalmente ventilado.

Protección respiratoria: Cuando la concentración de polvo en el aire supera la norma, se debe usar una mascarilla antipolvo filtrante autocebante. En el caso de una evacuación de emergencia, se deben usar aparatos de respiración de aire.

Protección ocular: Use anteojos de seguridad química.

Protección corporal: Use overoles anti-penetración de veneno.

Protección de las manos: Use guantes de goma.

#### Parte IX: Propiedades fisicoquímicas

Ingrediente principal: Puro

Apariencia y propiedades: metal sólido de color blanco brillante

Punto de fusión (°C): N/A

Punto de ebullición (°C): N/A

Densidad relativa (agua = 1): 13~18,5 (20 °C)

Densidad de vapor (aire = 1): Sin datos

Presión de vapor de saturación (kPa): no hay datos disponibles

Calor de combustión (kJ/mol): sin datos

Temperatura crítica (°C): No hay datos disponibles

Presión crítica (MPa): No hay datos disponibles

Logaritmo del coeficiente de reparto del agua: sin datos

Punto de inflamación (°C): No hay datos disponibles

Temperatura de ignición (°C): Sin datos

% de límite de explosión (V/V): Sin datos

Límite inferior de explosión % (V/V): Sin datos

Solubilidad: soluble en ácido nítrico, ácido fluorhídrico

Usos principales: se utiliza para fabricar piezas de blindaje, ejes de dardos de aleación de tungsteno,

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

bolas de aleación de tungsteno, etc.

Parte X: Estabilidad y reactividad

Sustancias prohibidas: ácidos fuertes y álcalis.

Parte 11:

Toxicidad aguda: no se dispone de datos

LC50: Sin datos

Parte XII: Datos ecológicos

No hay datos para esta sección

Parte XIII: Eliminación

Método de eliminación de residuos: Consulte las leyes y reglamentos nacionales y locales pertinentes antes de eliminarlos. Recicla si es posible.

Parte XIV: Información de envío

Número de mercancías peligrosas: sin información

Categoría de embalaje: Z01

Precauciones para el transporte: El embalaje debe estar completo durante el envío y la carga debe ser segura. Durante el transporte, es necesario asegurarse de que el contenedor no tenga fugas, colapse, caiga o se dañe. Está terminantemente prohibido mezclar con oxidantes, halógenos, productos químicos comestibles, etc. Durante el transporte, debe protegerse de la exposición al sol, la lluvia y las altas temperaturas. Los vehículos deben limpiarse a fondo después del transporte.

Parte XV: Información Regulatoria

Información reglamentaria: Reglamento sobre la Gestión de la Seguridad de los Productos Químicos Peligrosos (promulgado por el Consejo de Estado el 17 de febrero de 1987), Normas detalladas para la aplicación del Reglamento sobre la Gestión de la Seguridad de los Productos Químicos Peligrosos (Hua Lao Fa [1992] N° 677), Reglamento sobre el Uso Seguro de los Productos Químicos en el Trabajo ([1996] Lao Bu Fa N° 423) y otras leyes y reglamentos, que han adoptado las disposiciones correspondientes sobre la seguridad del uso, la producción, el almacenamiento, el transporte, la carga y la descarga de productos químicos peligrosos; La norma higiénica para el tungsteno en el aire de taller (GB 16229-1996) estipula la concentración máxima permitida y el método de detección de esta sustancia en el aire de taller.

Parte XVI: Información del proveedor

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Proveedor: CTIA GROUP LTD

Tel: 0592-5129696/5129595



electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD

### Capítulo 3 Tecnología de preparación y producción de electrodos de tungsteno puro

La preparación de electrodos de tungsteno puro (electrodo WP) es un proceso de alta precisión que implica interdisciplinaria multidisciplinaria, que abarca la metalurgia mineral, la pulvimetalurgia, el procesamiento a presión y el tratamiento de superficies desde la extracción de materias primas hasta el moldeo de electrodos terminados. Se requiere un control estricto de los parámetros del proceso en cada paso para garantizar una alta pureza, uniformidad y un excelente rendimiento de soldadura del electrodo. Este capítulo discutirá en detalle la tecnología de preparación y producción de electrodos de tungsteno puro, cubriendo la preparación de materias primas, pulvimetalurgia, procesamiento a presión, tratamiento de superficies, control de calidad, así como dificultades técnicas y direcciones de innovación.

#### 3.1 Preparación de materias primas para electrodo de tungsteno puro

La preparación de electrodos de tungsteno puro comienza con la selección y manipulación de las materias primas. Como metal raro, el tungsteno existe principalmente en la naturaleza en forma de mineral de tungsteno, y su proceso de preparación requiere la extracción de compuestos de tungsteno de alta pureza del mineral y su posterior procesamiento en polvo de tungsteno de alta pureza. El proceso en esta etapa determina directamente la pureza y el rendimiento del electrodo.

##### 3.1.1 Extracción y purificación de mineral de wolframio

La extracción y purificación del mineral de tungsteno es el primer paso en la producción de electrodos de tungsteno puro, que consiste principalmente en tomar mineral de tungsteno de la

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

naturaleza y convertirlo en compuestos de tungsteno de alta pureza. Los recursos mundiales de mineral de tungsteno se distribuyen principalmente en China, Rusia, Canadá y Australia, de los cuales China representa más de la mitad de las reservas mundiales. Los minerales de tungsteno comunes incluyen wolframita (principalmente  $\text{FeWO}_4$  y  $\text{MnWO}_4$ ) y scheelita (principalmente  $\text{CaWO}_4$ ). Debido a su alto contenido de tungsteno y sus características de fácil beneficio, la wolframita es la principal materia prima para la preparación de electrodos de tungsteno puro.

El mineral de tungsteno generalmente se extrae mediante métodos de minería a cielo abierto o subterráneos, y el mineral extraído se tritura y muele para producir un fino de tamaño de partícula pequeño para su posterior beneficio. Los procesos de beneficio incluyen el beneficio por gravedad, la flotación y la separación magnética, a través de los cuales los minerales de tungsteno se separan de otras impurezas (por ejemplo, silicatos, sulfuros) para obtener concentrados de tungsteno de alta calidad. El contenido de tungsteno del concentrado de tungsteno generalmente debe cumplir con ciertos estándares para cumplir con los requisitos de purificación.

El proceso de purificación se realiza principalmente por hidrometalurgia. Primero, el concentrado de tungsteno se hace reaccionar con hidróxido de sodio o solución de carbonato de sodio para producir una solución de tungstato de sodio ( $\text{Na}_2\text{WO}_4$ ). Este proceso debe llevarse a cabo a alta temperatura y presión para mejorar la eficiencia de la reacción. Posteriormente, las impurezas insolubles como el silicio, el hierro, etc. se eliminan de la solución por filtración. A continuación, el tungstato de sodio se convierte en precipitado de ácido tungstico ( $\text{H}_2\text{WO}_4$ ) mediante la adición de un ácido, como el ácido clorhídrico. Después del lavado y el secado, el precipitado de ácido tungstico se calcina aún más para producir trióxido de tungsteno ( $\text{WO}_3$ ), que es un producto intermedio para la preparación de polvo de tungsteno de alta pureza. Todo el proceso de purificación debe controlar estrictamente el valor de pH, la temperatura y el tiempo de reacción de la solución para minimizar los residuos de impurezas, garantizar la pureza del trióxido de tungsteno y sentar las bases para el proceso posterior.

### 3.1.2 Preparación de polvo de wolframio de alta pureza

El polvo de tungsteno de alta pureza es la materia prima principal para la preparación de electrodos de tungsteno puro, y su pureza, tamaño de partícula y morfología afectan directamente el rendimiento del electrodo. La preparación del polvo de tungsteno generalmente se hace a partir de trióxido de tungsteno como material de partida, que se produce mediante el método de reducción de hidrógeno. El proceso específico consta de los siguientes pasos:

En primer lugar, el trióxido de tungsteno se coloca en un horno de reducción y el hidrógeno de alta pureza se introduce a alta temperatura para reducir gradualmente el trióxido de tungsteno a polvo metálico de tungsteno. El proceso de reducción se divide en dos etapas: la primera etapa reduce el trióxido de tungsteno a dióxido de tungsteno ( $\text{WO}_2$ ) a una temperatura más baja, y la segunda etapa reduce aún más el metal de tungsteno a metálico a una temperatura más alta. Este proceso requiere un control preciso de los gradientes de temperatura, los caudales de hidrógeno y los tiempos de reducción para evitar partículas excesivas o aglomeradas de polvo de tungsteno. El polvo de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

tungsteno reducido se tamiza y se limpia para eliminar los óxidos e impurezas residuales.

Para cumplir con los requisitos de alta pureza de los electrodos de tungsteno puro, la pureza del polvo de tungsteno generalmente debe alcanzar más del 99.95% y el contenido de impurezas (como hierro, níquel, silicio, oxígeno) debe controlarse estrictamente a niveles de trazas. Además, la distribución del tamaño de partícula y la morfología del polvo de tungsteno también son cruciales. Un tamaño de partícula demasiado grande puede resultar en una falta de densidad del cuerpo sinterizado, mientras que un tamaño de partícula demasiado pequeño puede aumentar la dificultad de compresión. Por lo tanto, el tamaño de partícula promedio del polvo de tungsteno generalmente se controla en el rango de 1 a 5 micras, y la morfología de la partícula es preferiblemente casi esférica para mejorar la fluidez y el rendimiento de compresión.

En los últimos años, algunas empresas han adoptado tecnologías avanzadas como la reducción por plasma o la deposición química de vapor para preparar polvo de tungsteno ultrafino, lo que mejora aún más la pureza y uniformidad del polvo. Aunque estas tecnologías son costosas, ofrecen ventajas significativas en la producción de electrodos de alto rendimiento.

### 3.2 Proceso de pulvimetalurgia del electrodo de tungsteno puro

La pulvimetalurgia es el proceso central de la preparación de electrodos de tungsteno puro, que convierte el polvo de tungsteno en un cuerpo de tungsteno de alta densidad y alta resistencia mediante prensado, sinterización y tratamiento térmico. Este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas, presiones y vacíos para garantizar la densidad y las propiedades mecánicas de los electrodos.

#### 3.2.1 Moldeo por prensado de polvo de tungsteno

El moldeo por prensado de polvo de tungsteno es el proceso de procesamiento de polvo de tungsteno de alta pureza en un cuerpo verde con cierta forma y resistencia. El objetivo de esta etapa es formar un cuerpo verde con densidad uniforme y resistencia suficiente para proporcionar la base para la sinterización posterior. El proceso de prensado incluye principalmente dos métodos: prensado isostático en frío y moldeo.

El prensado isostático en frío es actualmente el método de prensado más utilizado, cargando polvo de tungsteno en un molde flexible (como un molde de goma) y colocándolo en un medio líquido a alta presión para aplicar una presión uniforme (generalmente 100-300 MPa) para que las partículas de polvo se unan firmemente. Las ventajas del prensado isostático en frío son la distribución uniforme de la presión y la densidad constante de los cuerpos verdes, que es adecuada para la producción de formas grandes o complejas. El moldeo es adecuado para la producción de lotes pequeños, y el polvo de tungsteno se forma por presión unidireccional a través del molde de acero, pero es fácil producir gradientes de densidad, lo que requiere una optimización posterior del proceso.

Durante el proceso de prensado se añade una pequeña cantidad de aglutinante (por ejemplo, alcohol polivinílico o parafina) para aumentar la fuerza de formación del cuerpo verde, pero el aglutinante

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

debe eliminarse por completo antes de la sinterización posterior para evitar impurezas residuales. Para garantizar la uniformidad del cuerpo verde, es necesario controlar la densidad de llenado y la velocidad de prensado del polvo de tungsteno para evitar grietas o delaminación.

### 3.2.2 Proceso de sinterización

La sinterización es el proceso de calentar el cuerpo prensado a una temperatura por debajo del punto de fusión del tungsteno para que las partículas de polvo se combinen para formar un material denso. El alto punto de fusión del tungsteno hace que se sinterice a alta temperatura, generalmente entre 2000 y 2800 °C. Para evitar la oxidación, la sinterización se lleva a cabo en una atmósfera de vacío o protección de hidrógeno, y los equipos comunes incluyen hornos de sinterización al vacío u hornos de sinterización de hidrógeno.

El proceso de sinterización se divide en tres etapas: temprano, medio y tardío. En la etapa inicial, a bajas temperaturas (alrededor de 1000-1500 °C) el aglutinante en el cuerpo verde se evapora y comienzan a formarse conexiones de cuello en la superficie de las partículas. En la etapa intermedia (1500-2200 °C), se mejora la unión entre partículas, el cuerpo verde se encoge y la densidad aumenta gradualmente. En la etapa posterior (2200-2800 °C), el grano crece y el cuerpo verde alcanza la densidad máxima, que suele ser del 95% al 98% de la densidad teórica. El tiempo y la temperatura de sinterización deben controlarse con precisión, una temperatura demasiado alta o un tiempo de retención demasiado prolongado pueden provocar un crecimiento excesivo del grano y reducir las propiedades mecánicas del cuerpo verde.

Para mejorar la eficiencia de la sinterización, algunas empresas utilizan la tecnología de sinterización activa, que reduce la temperatura de sinterización mediante la adición de metales traza como níquel o cobalto, pero es necesario asegurarse de que los aditivos no afecten la pureza del electrodo. Además, las tecnologías emergentes, como la sinterización por inducción de FI y la sinterización por plasma de descarga (SPS), se están aplicando gradualmente a la producción de electrodos de tungsteno de alto rendimiento, lo que puede acortar significativamente el tiempo de sinterización y mejorar la densidad del cuerpo verde.

### 3.2.3 Tratamiento térmico y recocido

El cuerpo de tungsteno sinterizado generalmente tiene estrés interno y defectos microscópicos, que deben aliviarse mediante tratamiento térmico y recocido para mejorar la microestructura. El tratamiento térmico generalmente se lleva a cabo en una atmósfera de vacío o hidrógeno, la temperatura se controla a 1200-1800 °C y el tiempo de retención se ajusta de acuerdo con el tamaño y los requisitos de rendimiento del cuerpo verde. El tratamiento térmico refina los granos y mejora la tenacidad y la procesabilidad del cuerpo verde.

El recocido es un paso de extensión del tratamiento térmico diseñado para reducir aún más la dureza y la fragilidad del cuerpo verde y mejorar la ductilidad. La temperatura de recocido suele ser más baja que la temperatura del tratamiento térmico (alrededor de 800-1200 °C) y se enfría lentamente para evitar nuevas tensiones. El cuerpo recocido es más adecuado para el mecanizado a presión

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

posterior, como la forja y el trefilado.

### 3.3 Procesamiento a presión de electrodo de tungsteno puro

El mecanizado a presión es el proceso de mecanizar un cuerpo sinterizado en una barra de electrodos con dimensiones y formas precisas, incluidos los pasos de forjado, laminado, estirado y embutición. La alta dureza y fragilidad del tungsteno dificultan su procesamiento y deben realizarse a altas temperaturas para mejorar la ductilidad.

#### 3.3.1 Forja y laminación

La forja es el proceso de deformar la pieza en bruto sinterizada a alta temperatura (alrededor de 1500-1800 °C) mediante martillo o prensado para hacer una varilla o placa en bruto. La forja refina los granos y aumenta la densidad y la resistencia del cuerpo, pero la tasa de deformación debe controlarse para evitar el agrietamiento. La forja generalmente se lleva a cabo en una atmósfera protectora de hidrógeno para evitar la oxidación.

El laminado es un paso de procesamiento adicional después de la forja en el que la pieza en bruto forjada se lamina en barras o alambres más finos a través de un tren de laminación de varias pasadas. La temperatura de laminación se reduce gradualmente (de 1500 °C a 1000 °C) para mejorar la calidad de la superficie y la precisión dimensional del material. Se requiere un recocido periódico durante el proceso de laminación para eliminar el endurecimiento por trabajo y las tensiones internas y garantizar la maquinabilidad de la pieza en bruto.

#### 3.3.2 Dibujo y dibujo

El trefilado es el proceso de estirar barras laminadas a través de un troquel para hacer un alambre de tungsteno de menor diámetro o un electrodo en blanco. El trefilado se lleva a cabo a altas temperaturas (alrededor de 800-1200 °C) utilizando troqueles de carburo o diamante para soportar la alta dureza del tungsteno. Durante el proceso de embutición se aplican lubricantes como el grafito o el disulfuro de molibdeno para reducir la fricción y el desgaste de la matriz. La deformación de cada paso de trefilado generalmente se controla entre el 10% y el 20%, y se requieren varias sesiones de recocido para restaurar la ductilidad.

El trefilado es una extensión del trefilado para la producción de electrodos en bruto con un diámetro más pequeño (0,5-6,4 mm). La precisión del troquel de trefilado afecta directamente la calidad de la superficie y la tolerancia dimensional del electrodo, por lo que es necesario verificar y reemplazar el molde con regularidad. La producción continua de trefilado y trefilado puede aumentar significativamente la eficiencia, pero la temperatura y la velocidad de trefilado deben controlarse estrictamente para evitar la rotura del alambre.

#### 3.3.3 Conformación de barras de electrodos

La formación de barras de electrodos consiste en cortar, enderezar y alargar el alambre de tungsteno estirado para hacer una varilla de electrodo que cumpla con las especificaciones. El corte generalmente se realiza mecánicamente o con láser para garantizar que el corte sea plano y sin

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

rebabas. El enderezamiento se realiza mediante un enderezador de rodillos para eliminar la flexión y la tensión interna de la barra. El corte a medida se ajusta según las necesidades del cliente y la longitud común es de 75-600 mm. Las varillas formadas se inspeccionan en la superficie para asegurarse de que no haya grietas, arañazos o marcas de oxidación.

### 3.4 Tratamiento superficial del electrodo de tungsteno puro

El tratamiento de la superficie es la etapa final de la preparación del electrodo de tungsteno puro y tiene como objetivo mejorar la calidad de la superficie, la soldabilidad y el reconocimiento del electrodo, incluida la limpieza, el pulido y el marcado de la cabeza verde.

#### 3.4.1 Limpieza y pulido

La limpieza es el proceso de eliminar el aceite, los óxidos y las impurezas de la superficie de la barra moldeada, normalmente mediante una combinación de limpieza química y limpieza ultrasónica. La limpieza química utiliza una solución alcalina (por ejemplo, hidróxido de sodio) o una solución ácida (por ejemplo, ácido nítrico diluido) para eliminar la capa de óxido, que luego se enjuaga con agua pura y se seca. La limpieza ultrasónica utiliza vibraciones de alta frecuencia para eliminar partículas diminutas y garantizar una superficie limpia.

El pulido es un paso crítico para mejorar el acabado de la superficie de un electrodo, generalmente con pulido mecánico o electroquímico. El pulido mecánico utiliza una muela abrasiva o un paño de pulido para eliminar los arañazos microscópicos en la superficie, y el pulido electroquímico hace que la superficie sea más lisa a través de la electrólisis. La rugosidad de la superficie del electrodo pulido alcanza Ra1.6-3.2μm, lo que ayuda a mejorar la estabilidad del arco y la calidad de la soldadura.

#### 3.4.2 Manchas verdes

La marca de recubrimiento verde es el método de identificación estándar internacional para electrodos de tungsteno puro, que cumple con las normas AWS A5.12 e ISO 6848. El proceso de marcado generalmente está recubierto con una pintura verde no tóxica (como la pintura de protección ambiental a base de agua) en un extremo del electrodo, que es uniforme en grosor, resistente al desgaste y no afecta el rendimiento de la soldadura. El marcado de la cabeza del recubrimiento se realiza sobre una superficie limpia para garantizar la adherencia y la durabilidad. Algunas empresas utilizan equipos de pulverización automatizados para mejorar la eficiencia y la consistencia del marcado.

### 3.5 Control de calidad de electrodos de tungsteno puro

El control de calidad recorre cada paso de la producción de electrodos de tungsteno puro, desde las materias primas hasta los productos terminados, y debe probarse en múltiples niveles para garantizar el rendimiento y la confiabilidad del electrodo.

#### 3.5.1 Inspección de la calidad de la materia prima

La inspección de calidad de las materias primas es principalmente para concentrado de tungsteno,

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

trióxido de tungsteno y polvo de tungsteno. El concentrado de tungsteno debe analizarse para determinar el contenido de tungsteno y las impurezas (por ejemplo, azufre, fósforo, silicio). El trióxido de tungsteno se somete a pruebas de pureza e impurezas mediante análisis de fluorescencia de rayos X (XRF) o espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES). El polvo de tungsteno debe probarse para determinar la distribución del tamaño de partícula, la morfología y el contenido de oxígeno para garantizar que cumpla con los requisitos de producción.

### 3.5.2 Seguimiento del proceso de producción

La supervisión del proceso de producción incluye la detección en tiempo real de prensado, sinterización, forja, trefilado y tratamiento de superficies. La densidad y el tamaño del cuerpo verde prensado deben verificarse mediante un detector ultrasónico, y la densidad y el tamaño de grano del cuerpo verde sinterizado deben analizarse mediante un microscopio metalográfico. Durante la forja y el estirado, es necesario controlar la temperatura, la deformación y la calidad de la superficie para evitar grietas o defectos. Después del tratamiento de la superficie, se verifica la rugosidad de la superficie y la calidad del recubrimiento.

### 3.5.3 Inspección del producto terminado

La inspección del producto terminado incluye una inspección exhaustiva de la composición química, las propiedades físicas, las tolerancias dimensionales y la soldabilidad. La composición química se analiza mediante ICP-OES o XRF para garantizar un contenido  $\geq$  de tungsteno del 99,5%. Las propiedades físicas incluyen pruebas de densidad, dureza y conductividad. Las tolerancias dimensionales deben cumplir con las normas (e.g. ISO 6848) y las desviaciones del diámetro deben controlarse a  $\pm 0,05$  mm. Rendimiento de soldadura: El rendimiento de iniciación del arco, la estabilidad del arco y la tasa de consumo de electrodos se evalúan simulando pruebas de soldadura TIG.

## 3.6 Dificultades técnicas e innovaciones del electrodo de tungsteno puro

La preparación de electrodos de tungsteno puro implica una serie de dificultades técnicas, y se han logrado avances significativos a través de la innovación tecnológica en los últimos años. Lo siguiente se discute desde cuatro aspectos: control de alta pureza, optimización de la estructura del grano, mejora de la eficiencia de la producción y protección del medio ambiente y desarrollo sostenible.

### 3.6.1 Control de alta pureza

La alta pureza es el requisito principal del electrodo de tungsteno puro, y el contenido de impurezas (como oxígeno, hierro, carbono) debe controlarse a nivel de ppm. Las dificultades técnicas incluyen la purificación de las materias primas y la introducción de impurezas en el proceso de producción. Las innovaciones incluyen el uso de tecnologías de intercambio iónico y extracción de solventes para mejorar la pureza del trióxido de tungsteno, el uso de entornos de vacío e hidrógeno de alta pureza para reducir la contaminación por oxígeno durante la reducción y la sinterización, y el desarrollo de tecnologías de detección de impurezas en línea, como la espectroscopia de ruptura inducida por láser para el monitoreo en tiempo real.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 3.6.2 Optimización de la estructura del grano

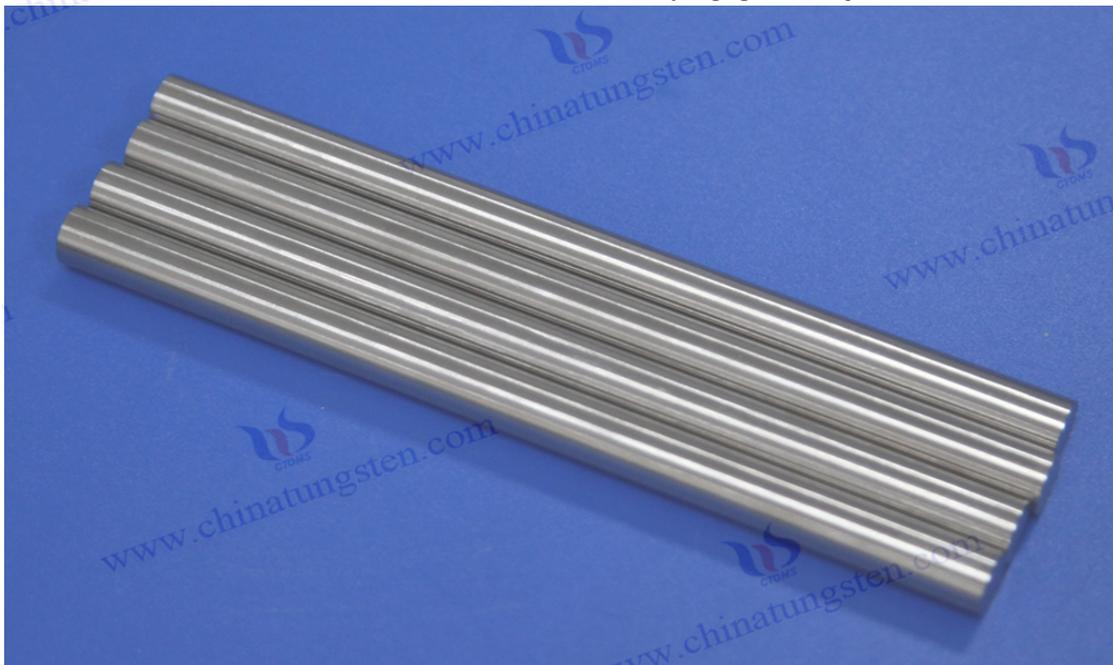
La estructura del grano afecta directamente las propiedades mecánicas y el rendimiento de soldadura del electrodo, con granos demasiado grandes que conducen a una mayor fragilidad y granos demasiado pequeños que reducen la resistencia a altas temperaturas. El desafío técnico radica en controlar el crecimiento del grano durante la sinterización y el procesamiento. Las innovaciones incluyen el uso de polvo de nano-tungsteno como materia prima, el refinamiento del grano a través de la tecnología de sinterización rápida (por ejemplo, SPS) y la adición de inhibidores de trazas (por ejemplo, alúmina) para controlar el crecimiento del grano.

### 3.6.3 Mejora de la eficiencia de la producción

El ciclo de producción de electrodos de tungsteno puro es largo y el consumo de energía es alto, lo que limita la producción a gran escala. Las dificultades técnicas incluyen largos tiempos de sinterización, procesamiento difícil y altos costos de mantenimiento del equipo. Las innovaciones incluyen el desarrollo de hornos de sinterización continua para mejorar la eficiencia de la producción, el uso de equipos automatizados de trefilado y tratamiento de superficies para reducir los costos de mano de obra, y la aplicación de tecnologías de fabricación inteligentes como el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) para optimizar los procesos de producción.

### 3.6.4 Protección del medio ambiente y desarrollo sostenible

La producción de electrodos de tungsteno implica un alto consumo de energía y emisiones de aguas residuales, y está bajo presión ambiental. Los desafíos técnicos incluyen la reducción del consumo de energía y el procesamiento de residuos que contienen tungsteno. Las innovaciones incluyen el uso de energía renovable para impulsar equipos de producción, el desarrollo de tecnología de reciclaje de aguas residuales y el establecimiento de un sistema de reciclaje de desechos de tungsteno para lograr el reciclaje de recursos. Algunas empresas han comenzado a explorar modelos de fabricación verdes, como el uso de solventes no tóxicos y equipos de bajas emisiones.



#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## Capítulo 4 Usos de los electrodos de tungsteno puro

Los electrodos de tungsteno puro (electrodos WP) han desempeñado un papel importante en una variedad de campos industriales debido a su alto punto de fusión, excelente conductividad eléctrica y térmica y estabilidad química. Especialmente en la industria de la soldadura, el electrodo de tungsteno puro es el material central de la soldadura por arco de argón de tungsteno (soldadura TIG), que se usa ampliamente en escenarios de soldadura de CA (CA). Además, ofrece ventajas únicas en otras aplicaciones industriales, áreas especiales y ciertas aplicaciones no relacionadas con la soldadura. Sin embargo, la aplicación de electrodos de tungsteno puro también tiene ciertas limitaciones. Este capítulo proporcionará una descripción general completa de los usos de los electrodos de tungsteno puro, cubriendo aplicaciones de soldadura, otras aplicaciones industriales, aplicaciones de campo especiales y sus limitaciones.

### 4.1 Aplicaciones de soldadura

La soldadura es el campo de aplicación más importante del electrodo de tungsteno puro, especialmente en la soldadura por arco de argón y tungsteno (soldadura TIG), el electrodo de tungsteno puro se ha convertido en un material indispensable debido a su alto punto de fusión y características de arco estables. A continuación se elabora su aplicación desde tres aspectos: soldadura TIG, soldadura AC y soldadura de magnesio, aluminio y sus aleaciones.

#### 4.1.1 Soldadura con gas inerte de tungsteno (TIG)

La soldadura con gas inerte de tungsteno (TIG) es un proceso de soldadura que utiliza electrodos de tungsteno para producir un arco bajo la protección de un gas inerte como el argón o el helio, y es conocido por su alta precisión, soldaduras de alta calidad y amplia aplicabilidad del material. Como uno de los primeros tipos de electrodo para la soldadura TIG, el electrodo de tungsteno puro puede mantener la integridad estructural en el entorno de alta temperatura del arco (alrededor de 6000-7000 °C) debido a su alto punto de fusión (3422 °C) y su excelente estabilidad a alta temperatura, lo que reduce el riesgo de fusión o quemadura del electrodo. Esta propiedad lo hace valioso en escenarios industriales donde se requieren soldaduras de alta calidad.

En la soldadura TIG, el electrodo de tungsteno puro actúa como un electrodo que no se derrite y es el principal responsable de iniciar y mantener el arco, mientras que el metal de aporte (si es necesario) lo proporciona el alambre de soldadura. La forma del extremo del electrodo tiene un impacto significativo en la forma del arco y la calidad de la soldadura. En funcionamiento, los electrodos de tungsteno puro a menudo deben rectificarse en una forma cónica o hemisférica para optimizar la concentración y la estabilidad del arco. El efecto protector del gas inerte evita la oxidación de los electrodos y del baño de fusión, asegurando la pureza y las propiedades mecánicas de la soldadura.

Los electrodos de tungsteno puro se usan ampliamente en la soldadura TIG, cubriendo una variedad de materiales metálicos, desde placas delgadas hasta placas gruesas, especialmente en escenarios donde la apariencia y el rendimiento de la soldadura son altos. Por ejemplo, en la soldadura de acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de magnesio, los electrodos de tungsteno puro

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

proporcionan un arco estable y una costura de soldadura limpia para satisfacer las necesidades de fabricación de precisión. Además, la flexibilidad de la soldadura TIG la hace adecuada tanto para la soldadura manual como para la automatizada, y los electrodos de tungsteno puro muestran un rendimiento fiable en ambos modos.

Aunque los electrodos de tungsteno puro se utilizan ampliamente en la soldadura TIG, su trabajo de alta evolución electrónica (alrededor de 4,52 eV) conduce a un rendimiento deficiente de iniciación del arco, especialmente en la soldadura de CC (CC). Por lo tanto, su aplicación principal se concentra en escenarios de soldadura de CA, mientras que la soldadura de CC utiliza principalmente electrodos dopados con óxidos de tierras raras (como electrodos de tungsteno de cerio o tungsteno de lantano). Aun así, los electrodos de tungsteno puro son una opción indispensable para la soldadura TIG debido a su bajo costo, no radiactividad e idoneidad para materiales específicos.

#### **4.1.2 Aplicaciones en soldadura AC (AC).**

La soldadura de CA (CA) es uno de los principales escenarios de aplicación de los electrodos de tungsteno puro, ya que puede formar un arco estable bajo la acción alterna de semiciclos positivos y negativos de corriente alterna, y es especialmente adecuado para soldar metales ligeros con películas de óxido. La soldadura de CA utiliza corrientes alternas para alternar entre el electrodo y la pieza de trabajo como el cátodo y el ánodo, logrando así el equilibrio dinámico del arco. La ventaja única del electrodo de tungsteno puro en la soldadura de CA es que puede formar un electrodo hemisférico estable, y esta forma final ayuda a distribuir uniformemente la energía del arco y mejorar la calidad de la soldadura.

En la soldadura de CA, el extremo hemisférico del electrodo de tungsteno puro produce una fuerte emisión de electrones durante el medio ciclo positivo (el electrodo es cátodo), formando un arco de alta temperatura; En el medio ciclo negativo (la pieza de trabajo es el cátodo), el arco produce un efecto de "limpieza catódica" en la película de óxido en la superficie de la pieza de trabajo, lo que elimina eficazmente la capa de óxido y garantiza la limpieza de la soldadura. Esta propiedad hace que los electrodos de tungsteno puro sean excelentes para soldar aluminio, magnesio y sus aleaciones. Además, el equipo de soldadura puede ajustar la forma de onda actual de la soldadura de CA (como onda cuadrada u onda sinusoidal) para optimizar las características y la penetración del arco, y los electrodos de tungsteno puro pueden adaptarse a una variedad de configuraciones de forma de onda, mostrando una fuerte adaptabilidad al proceso.

Los escenarios de aplicación de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CA incluyen la construcción, la construcción naval, la industria automotriz y la aeroespacial. Por ejemplo, en la industria de la construcción, los muros cortina de aluminio y las piezas estructurales a menudo se sueldan con TIG de CA, y los electrodos de tungsteno puro pueden proporcionar soldaduras de alta calidad que cumplen con los requisitos de apariencia y resistencia. En la construcción naval, la soldadura de cascos de aluminio requiere un arco estable y soldaduras limpias, y los electrodos de tungsteno puro son ideales. Además, sus propiedades no radiactivas le dan una ventaja en entornos donde la seguridad es crítica, como en la fabricación de equipos de procesamiento de alimentos.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Aunque los electrodos de tungsteno puro funcionan bien en la soldadura de CA, su estabilidad del arco puede ser ligeramente inferior a la de los electrodos dopados a altas frecuencias o bajas corrientes. Para mejorar el rendimiento, el operador debe afilar regularmente la parte del electrodo para mantenerla limpia y con el ángulo adecuado. Además, la optimización de los parámetros de soldadura (por ejemplo, corriente, flujo de gas) es esencial para garantizar la estabilidad del arco y la calidad de la soldadura.

#### 4.1.3 Soldadura de magnesio, aluminio y sus aleaciones

El magnesio, el aluminio y sus aleaciones se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial, de fabricación de automóviles y electrónica debido a su peso ligero, alta resistencia y buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, estos materiales son propensos a la formación de densas películas de óxido (por ejemplo,  $Al_2O_3$ , punto de fusión de aproximadamente  $2050\text{ }^{\circ}C$ ) en la superficie, lo que plantea un desafío para el proceso de soldadura. El efecto de "limpieza catódica" de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura TIG de CA lo convierte en el material de elección para soldar magnesio, aluminio y sus aleaciones.

En la soldadura de aleación de aluminio, el electrodo de tungsteno puro elimina la película de óxido a través del medio ciclo negativo de corriente alterna, mientras proporciona suficiente calor para derretir el sustrato durante el medio ciclo positivo para formar un baño fundido uniforme. La soldadura de aleaciones de aluminio (como 6061 y 7075) requiere un arco estable y una penetración moderada, y el extremo hemisférico del electrodo de tungsteno puro puede cumplir con estos requisitos. Además, la alta conductividad térmica del aluminio (aprox.  $237\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) requiere un aporte de calor controlado durante la soldadura, y la excelente conductividad térmica de los electrodos de tungsteno puro ayuda a disipar el calor del arco y a reducir el riesgo de sobrecalentamiento.

Las aleaciones de magnesio (por ejemplo, AZ31, AZ91) se utilizan ampliamente en diseños ligeros debido a su baja densidad (alrededor de  $1,74\text{ g/cm}^3$ ), pero su bajo punto de fusión (alrededor de  $650\text{ }^{\circ}C$ ) y su alta actividad química aumentan la dificultad de soldadura. Los electrodos de tungsteno puro proporcionan un arco estable en la soldadura de aleación de magnesio y, junto con la protección adecuada de gas inerte (como la mezcla de argón o argón y helio), pueden prevenir eficazmente la oxidación del baño de fusión y garantizar la calidad de la soldadura. En el sector aeroespacial, los electrodos de tungsteno puro se utilizan a menudo para la soldadura de componentes de aleación de magnesio (por ejemplo, bastidores de asientos, paneles de fuselaje) porque pueden cumplir con los requisitos de alta precisión y calidad.

Para optimizar el efecto de soldadura del magnesio, el aluminio y sus aleaciones, se deben tener en cuenta los siguientes puntos: en primer lugar, el diámetro del electrodo debe seleccionarse de acuerdo con el grosor y la corriente de la pieza de trabajo, y el diámetro comúnmente utilizado es de 1,6-3,2 mm; En segundo lugar, el caudal de gas de protección debe ser moderado (alrededor de 8-15 L / min) para garantizar la protección de la piscina de fusión; Finalmente, la parte del electrodo debe pulirse regularmente en forma semiesférica para mantener la estabilidad del arco. La amplia

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

aplicación de electrodos de tungsteno puro en la soldadura de estos materiales refleja plenamente sus ventajas únicas en el campo de la soldadura de CA.

## 4.2 Otras aplicaciones industriales

Además de la soldadura, los electrodos de tungsteno también se utilizan ampliamente en otros campos industriales, como la soldadura por resistencia, el corte y la pulverización por plasma, la emisión de termoelectrones, los objetivos de pulverización catódica y los contrapesos y elementos calefactores. Estas aplicaciones aprovechan el alto punto de fusión, la alta densidad y las excelentes propiedades eléctricas del tungsteno.

### 4.2.1 Electrodos de soldadura por resistencia

La soldadura por resistencia es un proceso de soldadura en el que el calor por resistencia derrite el metal a través de la corriente eléctrica generada y es ampliamente utilizada en la fabricación de automóviles, la industria electrónica y la producción de electrodomésticos. Los electrodos de tungsteno puro se utilizan a menudo en electrodos de soldadura por resistencia debido a su alta dureza, alta conductividad y resistencia al desgaste, especialmente en soldadura por puntos y soldadura por costura. En la soldadura por puntos, un electrodo de tungsteno puro actúa como cabeza de electrodo y está en contacto directo con la pieza de trabajo, transfiriendo una alta corriente (miles de amperios) para producir una alta temperatura localizada que funde el metal para formar una unión de soldadura. Su alto punto de fusión garantiza que el electrodo no se ablande ni se adhiera a la pieza de trabajo a altas temperaturas, lo que prolonga la vida útil.

En la industria electrónica, la soldadura por resistencia se utiliza para soldar láminas de metal delgadas (por ejemplo, láminas de cobre, láminas de níquel) o componentes en miniatura, y la alta conductividad y estabilidad de los electrodos de tungsteno puro proporciona un control térmico preciso para evitar el sobrecalentamiento y dañar los componentes sensibles. Además, la resistencia al desgaste de los electrodos de tungsteno puro los hace adecuados para operaciones de soldadura de alta frecuencia, como la soldadura por puntos continua de piezas de automóviles. Aunque los electrodos de aleación de cobre son más comunes en algunos escenarios de soldadura por resistencia, los electrodos de tungsteno puro ofrecen ventajas únicas en aplicaciones de alta precisión y alta temperatura.

### 4.2.2 Corte y pulverización por plasma

El corte por plasma es un proceso que utiliza un arco de plasma de alta temperatura (hasta 20,000 °C) para derretir metal y soplar material fundido, y se usa ampliamente en el corte de acero, aleaciones de aluminio y acero inoxidable. Como componente central de la pistola de corte por plasma, el electrodo de tungsteno puro es responsable de iniciar y mantener el arco de plasma. Su alto punto de fusión y baja presión de vapor le permiten permanecer estable a temperaturas extremadamente altas, reduciendo el consumo de electrodos. Además, la conductividad del electrodo de tungsteno puro garantiza una respuesta rápida del arco y es adecuada para aplicaciones de corte de alta velocidad.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

En la pulverización de plasma, los electrodos de tungsteno puro se utilizan para generar una corriente de gas de plasma a alta temperatura para derretir y rociar polvos cerámicos o metálicos sobre la superficie del sustrato para formar un recubrimiento resistente al desgaste, a la corrosión o aislante del calor. La resistencia a altas temperaturas y la estabilidad química de los electrodos de tungsteno puro les permiten soportar las duras condiciones del proceso de pulverización, lo que garantiza la uniformidad y la calidad del recubrimiento. El uso generalizado del corte y la pulverización por plasma está impulsando la demanda de electrodos de tungsteno puro en la industria manufacturera, especialmente en la industria pesada y la ingeniería de superficies.

#### 4.2.3 Materiales emisores de termoelectrones

Los electrodos de tungsteno se usan comúnmente en dispositivos que requieren emisión térmica de electrones, como microscopios electrónicos, tubos de rayos catódicos (CRT) y tubos de rayos X, debido a su alto trabajo de escape de electrones y excelente rendimiento de emisión térmica de electrones. En estos dispositivos, un electrodo de tungsteno puro actúa como un cátodo que emite electrones a altas temperaturas (alrededor de 2000-2500 ° C) para formar un haz o rayo de electrones. Su alto punto de fusión y baja presión de vapor garantizan un funcionamiento estable a largo plazo del electrodo en un entorno de vacío a alta temperatura, mientras que su estabilidad química evita reacciones con gases residuales.

Aunque los electrodos de tungsteno dopados con óxidos de tierras raras (por ejemplo, electrodos de tungsteno y lantano) funcionan mejor en algunas aplicaciones de emisión térmica de electrones, los electrodos de tungsteno puro todavía se usan ampliamente en dispositivos con altos requisitos de seguridad debido a su no radiactividad y bajo costo. Además, la resistencia mecánica de los electrodos de tungsteno puro les permite soportar altos voltajes y choques térmicos, lo que los hace adecuados para aplicaciones en electrónica de alta potencia.

#### 4.2.4 Objetivos de pulverización catódica

La pulverización catódica es una técnica de deposición física de vapor (PVD) que se utiliza para depositar películas delgadas en la superficie de un sustrato y se usa ampliamente en las industrias de semiconductores, células solares y recubrimientos ópticos. Debido a su alta pureza ( $\geq 99.95\%$ ) y alta densidad, el electrodo de tungsteno puro se puede usar como un objetivo de pulverización catódica para liberar átomos de tungsteno bajo el bombardeo de iones de alta energía para formar una película de tungsteno uniforme. Estas películas ofrecen una excelente conductividad eléctrica, resistencia a la corrosión y estabilidad a altas temperaturas, lo que las hace adecuadas para la fabricación de microelectrónica, sensores y componentes ópticos.

La producción de objetivos de tungsteno puro requiere un control estricto del contenido de impurezas y la estructura del grano para garantizar el rendimiento de la película. La alta densidad y uniformidad de los electrodos de tungsteno puro los hacen ideales para objetivos de alta calidad. Además, su alto punto de fusión y estabilidad química garantizan que el objetivo se pueda utilizar durante mucho tiempo sin degradarse en un entorno de pulverización catódica de alto vacío y alta temperatura. Con el rápido desarrollo de las industrias de semiconductores y nuevas energías, la

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

demanda de electrodos de tungsteno puro como objetivos de pulverización catódica continúa creciendo.

#### 4.2.5 Contrapesos y elementos calefactores

La alta densidad de los electrodos de tungsteno puro (19,3 g/cm<sup>3</sup>) los hace ideales para contrapesos y se utilizan ampliamente en instrumentación aeroespacial, automotriz y de precisión. Por ejemplo, en aviones y satélites, los contrapesos de tungsteno se utilizan para equilibrar estructuras y mejorar la estabilidad del vuelo; En las carreras, los pesos de tungsteno se utilizan para optimizar la distribución del centro de gravedad del vehículo. La alta densidad del tungsteno puro le permite proporcionar un mayor peso en un volumen menor, lo que es superior a los materiales de contrapeso tradicionales de plomo o acero. Además, su no toxicidad y resistencia a la corrosión cumplen con los requisitos ambientales.

En términos de elementos calefactores, los electrodos de tungsteno puro se utilizan a menudo en elementos calefactores de hornos de alta temperatura (como hornos de vacío y hornos de grafito) debido a su alto punto de fusión y excelente conductividad. En estos dispositivos, los electrodos de tungsteno son capaces de soportar temperaturas superiores a 2000 °C, proporcionando una fuente de calor estable para la fusión de metales, la sinterización de cerámicas y los procesos de tratamiento térmico. Aunque el tungsteno es susceptible a la oxidación a altas temperaturas, el gas inerte o la protección al vacío pueden prolongar eficazmente su vida útil.

### 4.3 Aplicaciones especiales en el campo

Los electrodos de tungsteno puro tienen aplicaciones importantes en campos especiales como la industria aeroespacial, militar y nuclear, donde el rendimiento, la seguridad y la fiabilidad de los materiales son extremadamente exigentes.

#### 4.3.1 Industria aeroespacial

La industria aeroespacial tiene requisitos extremadamente estrictos para la calidad de la soldadura y las propiedades del material, y la aplicación de electrodos de tungsteno puro en este campo se centra principalmente en la soldadura TIG de aleaciones de aluminio, aleaciones de magnesio y aleaciones de titanio. Por ejemplo, en la fabricación de fuselajes de aviones, componentes de motores y estructuras de satélites, las aleaciones de aluminio (como 7075, 6061) se utilizan ampliamente debido a su peso ligero y alta resistencia. Los electrodos de tungsteno puro se sueldan mediante AC TIG para eliminar la película de óxido y formar una soldadura de alta calidad que cumple con los requisitos de fuerza y resistencia a la corrosión de los componentes aeroespaciales.

Además, las aleaciones de magnesio se utilizan cada vez más en la industria aeroespacial, como la fabricación de trenes motrices de helicópteros y marcos de asientos. El arco estable y las características de soldadura limpia de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de aleación de magnesio garantizan la fiabilidad y la ligereza de los componentes. Además, la no radiactividad de los electrodos de tungsteno puro los hace adecuados para la fabricación de componentes de naves espaciales con requisitos de seguridad extremadamente altos, como carcasas de satélites y tanques

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de combustible.

En el sector aeroespacial, los electrodos de tungsteno también se utilizan en la pulverización de plasma y en la fabricación de contrapesos. La pulverización de plasma se utiliza para formar un recubrimiento resistente a altas temperaturas en la superficie de las cuchillas del motor, y la estabilidad de los electrodos de tungsteno puro garantiza la calidad del recubrimiento. Los contrapesos se utilizan para equilibrar las estructuras de las naves espaciales, y la alta densidad y la no toxicidad del tungsteno puro lo convierten en una opción ideal.

#### 4.3.2 Industria militar

La industria militar requiere resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y alta resistencia de los materiales, y la aplicación de electrodos de tungsteno puro en este campo incluye la soldadura y el procesamiento de vehículos blindados, componentes de misiles y sistemas de armas. Por ejemplo, las aleaciones de aluminio y el acero inoxidable se utilizan ampliamente en la fabricación de vehículos blindados, y los electrodos de tungsteno puro proporcionan soldaduras de alta calidad a través de la soldadura TIG, lo que mejora la resistencia estructural. En la fabricación de componentes de misiles, como carcasas de buscadores, el control preciso del arco de los electrodos de tungsteno puro satisface la necesidad de soldadura de alta precisión.

Además, los electrodos de tungsteno puro también desempeñan un papel en las aplicaciones de corte por plasma y emisión térmica de electrones en la industria militar. El corte por plasma se utiliza para procesar aleaciones de acero y titanio de alta resistencia, y la resistencia a altas temperaturas de los electrodos de tungsteno puro garantiza la eficiencia y precisión del corte. La emisión térmica de electrones se utiliza en radares militares y tubos electrónicos para equipos de comunicación, y la estabilidad de los electrodos de tungsteno puro garantiza el funcionamiento a largo plazo del equipo. La naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro los hace aún más ventajosos en el campo militar, especialmente en escenarios donde los requisitos ambientales y de seguridad del personal son estrictos.

#### 4.3.3 Industria nuclear

La industria nuclear tiene requisitos extremadamente altos de resistencia a la radiación, resistencia a altas temperaturas y estabilidad química de los materiales, y los electrodos de tungsteno puro tienen aplicaciones importantes en la fabricación de componentes de reactores nucleares, carcasas de barras de combustible y equipos experimentales. Por ejemplo, los electrodos de tungsteno puro se utilizan a menudo para la soldadura de aleaciones de aluminio y acero inoxidable en los sistemas de refrigeración y las partes estructurales de los reactores nucleares, ya que proporcionan soldaduras sin defectos que cumplen con los requisitos de resistencia a la radiación y a la corrosión.

En la investigación de fusión nuclear (por ejemplo, el Reactor Experimental Internacional de Fusión Termonuclear (ITER)), el tungsteno se utiliza como material orientado al plasma (PFM) debido a su alto punto de fusión y baja tasa de pulverización catódica. Los electrodos de tungsteno puro desempeñan un papel en la soldadura y el procesamiento de estos componentes, y su alta pureza y

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

estabilidad garantizan el rendimiento de los componentes. Además, los electrodos de tungsteno puro también se utilizan en contrapesos y elementos calefactores en la industria nuclear, como contrapesos para blindaje contra la radiación y elementos calefactores para hornos experimentales de alta temperatura.

La naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro los hace más ventajosos en la industria nuclear y funcionan mejor en términos de seguridad y protección del medio ambiente que los electrodos de tungsteno toriado (que contienen óxido de torio radiactivo). El rápido desarrollo de la industria nuclear ofrece una amplia perspectiva para la aplicación de electrodos de tungsteno puro.

#### 4.4 Limitaciones de la aplicación

Aunque los electrodos de tungsteno puro se usan ampliamente en una variedad de campos, sus limitaciones de rendimiento limitan su uso en ciertos escenarios. A continuación se analizan sus deficiencias desde dos aspectos: la soldadura en corriente continua y el desgaste y la vida útil de los electrodos.

##### 4.4.1 Deficiencias en la soldadura DC (DC).

La principal limitación de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura por corriente continua (CC) es su alto trabajo electrónico (alrededor de 4,52 eV), lo que dificulta el inicio del arco y la inestabilidad del arco. En la conexión positiva de CC (DCSP), el electrodo como cátodo necesita emitir una gran cantidad de electrones, y el alto trabajo de escape de electrones hace que el arco comience a un voltaje más alto, lo que es propenso a saltos o interrupciones del arco. En la polaridad inversa de CC (DCRP), el electrodo, como ánodo, está sujeto a una mayor carga de calor, lo que puede provocar un sobrecalentamiento y un consumo rápido.

Por el contrario, los electrodos dopados con óxidos de tierras raras (por ejemplo, electrodos de tungsteno de cerio y tungsteno de lantano) tienen un menor trabajo de escape de electrones (alrededor de 2,7-3,2 eV) y tienen un mejor rendimiento de iniciación de arco y estabilidad de arco en la soldadura de CC. Por lo tanto, la aplicación de electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CC se limita principalmente a escenarios de baja demanda, como la soldadura de baja corriente o la reparación temporal, mientras que la soldadura de CC de alta precisión o alta eficiencia utiliza principalmente electrodos dopados. Para aliviar esta limitación, el rendimiento de inicio del arco se puede mejorar optimizando el equipo de soldadura (por ejemplo, inicio de arco de alta frecuencia) o ajustando el ángulo en la parte superior del electrodo, pero el efecto es limitado.

##### 4.4.2 Desgaste de los electrodos y problemas de vida útil

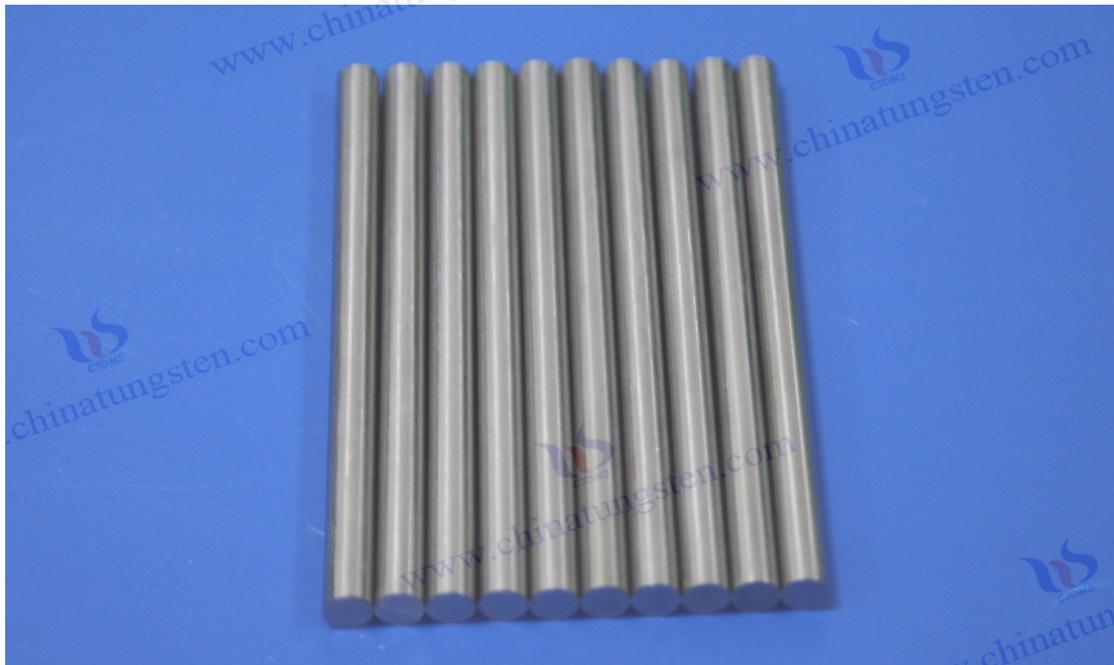
Otra limitación importante de los electrodos de tungsteno puro es el desgaste del electrodo y los problemas de vida útil. En la soldadura continua a alta corriente (>200 A) o a largo plazo, la alta temperatura final del electrodo de tungsteno puro debido al alto trabajo de electrones acelera la volatilización y la pérdida de combustión del material, que se manifiesta por el acortamiento gradual de la longitud del electrodo y el cambio de morfología final. En la soldadura de CA, la formación de extremos semiesféricos ralentiza parcialmente el desgaste, pero la tasa de desgaste sigue siendo

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

alta a altas frecuencias o bajo corrientes inestables.

Además, la contaminación de la superficie del electrodo (p. ej., óxidos, aceite) o la manipulación inadecuada (p. ej., el contacto del electrodo con el baño de fusión) pueden exacerbar aún más el desgaste y reducir la estabilidad del arco. Para prolongar la vida útil del electrodo, la parte del electrodo debe pulirse regularmente para mantener su limpieza y la forma final adecuada. Sin embargo, el rectificado frecuente aumenta los costos y el tiempo operativos, especialmente en la soldadura automatizada, lo que puede afectar la productividad. Por el contrario, los electrodos dopados, como los electrodos de lantano y tungsteno, suelen tener una vida útil más larga debido a su menor tasa de consumo y a su morfología final más estable.

Para superar los problemas de desgaste y vida útil, el rendimiento se puede mejorar optimizando los parámetros de soldadura (por ejemplo, reduciendo la corriente, aumentando la protección contra el gas), mejorando los procesos de producción de electrodos (por ejemplo, refinamiento del grano) o desarrollando nuevos materiales de electrodos. Sin embargo, estas mejoras pueden aumentar los costos y requieren un compromiso entre el rendimiento y la economía.



**electrodo de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD**

**Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**

## Capítulo 5 Equipo de producción para electrodos de tungsteno puro

La producción de electrodos de tungsteno puro (electrodos WP) implica una compleja cadena de procesos desde el manejo de la materia prima hasta la inspección del producto terminado, cada uno de los cuales requiere equipos especializados para garantizar la calidad del producto y la eficiencia de la producción. El equipo de producción cubre el manejo de materias primas, pulvimetalurgia, procesamiento a presión, tratamiento de superficies, pruebas y control de calidad, así como automatización y sistemas inteligentes. Estos equipos deben tener alta precisión, alta confiabilidad y alta resistencia a la temperatura y a la corrosión para adaptarse a las características de alto punto de fusión y alta dureza del tungsteno. En este capítulo se discutirán en detalle los diversos tipos de equipos utilizados en la producción de electrodos de tungsteno puro y se analizarán sus funciones, características y tendencias de desarrollo tecnológico.

### 5.1 Equipo de procesamiento de materias primas para electrodos de tungsteno puro

El manejo de materias primas es el primer paso en la producción de electrodos de tungsteno puro, que implica el proceso de conversión de mineral de tungsteno en polvo de tungsteno de alta pureza, que requiere el uso de equipos especiales para trituración, molienda y purificación química. Estos equipos deben ser eficientes, estables y respetuosos con el medio ambiente para cumplir con los requisitos de producción de polvo de tungsteno de alta pureza.

#### 5.1.1 Equipo de trituración y molienda de mineral de tungsteno

El mineral de tungsteno (por ejemplo, wolframita o scheelita) se extrae de la mina y luego se tritura y muele para producir partículas finas adecuadas para el beneficio. Los equipos de trituración y molienda incluyen principalmente los siguientes tipos:

**Trituradora de mandíbula:** se utiliza para la trituración primaria, triturando grandes piezas de mineral de tungsteno (de hasta 1-2 m de tamaño) en partículas de 50-100 mm. La trituradora de mandíbula tritura el mineral a través de la extrusión de la mandíbula móvil y la mandíbula fija, y el equipo debe utilizar materiales de alta resistencia y resistentes al desgaste (como el acero al manganeso) para hacer frente a la alta dureza del mineral de tungsteno. Las trituradoras de mandíbula modernas están equipadas con un sistema de ajuste hidráulico, que puede controlar con precisión el tamaño de partícula de descarga y mejorar la eficiencia de trituración.

**Trituradora de cono:** se utiliza para la trituración media y fina, triturando aún más el mineral después de la trituración primaria a 5-20 mm. La trituradora de cono logra una trituración continua a través de la acción de extrusión del cono giratorio y el cono fijo, y es adecuada para el manejo de minerales de alta dureza. Sus ventajas son la gran relación de trituración y el alto rendimiento, que es adecuado para el procesamiento de mineral de tungsteno a gran escala.

**Molino de bolas:** se utiliza para moler, moliendo el mineral triturado hasta convertirlo en un polvo fino de 0,1-1 mm en preparación para el beneficio. El molino de bolas muele los materiales a través de la colisión y la fricción entre las bolas de acero y el mineral, y el revestimiento está hecho de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

cerámica resistente al desgaste o acero con alto contenido de cromo para prolongar la vida útil. Los molinos de bolas húmedos se utilizan a menudo para la molienda de mineral de tungsteno, lo que reduce la contaminación por polvo y mejora la eficiencia de la molienda al agregar medio de agua.

Criba vibratoria: se utiliza para clasificar, filtrar polvo mineral con un tamaño de partícula uniforme. La criba vibratoria separa materiales con diferentes tamaños de partícula a través de vibración de alta frecuencia para garantizar que el tamaño de partícula del polvo mineral que ingresa al proceso de beneficio sea consistente. Las cribas vibratorias modernas están equipadas con cribas multicapa, que pueden realizar la clasificación en varias etapas y mejorar la eficiencia del procesamiento de minerales.

Estas plantas deben estar equipadas con un sistema de desempolvado para reducir la contaminación por polvo y un sistema de control automatizado para optimizar los parámetros de funcionamiento, como la presión de trituración, el tiempo de molienda y la frecuencia de cribado. En los últimos años, los equipos de trituración inteligentes se han popularizado gradualmente, y el monitoreo en tiempo real y el diagnóstico de fallas a través de sensores y PLC (controladores lógicos programables) han mejorado la eficiencia y la seguridad de la producción.

### 5.1.2 Equipos de purificación química

La purificación química es el proceso de convertir el concentrado de tungsteno en trióxido de tungsteno ( $WO_3$ ) o ácido tungstico ( $H_2WO_4$ ) de alta pureza, que implica pasos como la disolución, la filtración, la precipitación y el secado. Los equipos de uso común incluyen:

Hervidor de reacción: Se utiliza para la reacción de concentrado de tungsteno con hidróxido de sodio o carbonato de sodio para generar una solución de tungstato de sodio. Los reactores deben fabricarse con materiales resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable o el esmalte, para soportar altas temperaturas, presiones y entornos alcalinos fuertes. Los reactores modernos están equipados con sistemas de agitación y dispositivos de control de temperatura para garantizar reacciones uniformes y eficientes.

Filtro: se utiliza para eliminar impurezas insolubles (como silicato, compuestos de hierro) en la solución. Los filtros de vacío o filtros prensa son equipos comúnmente utilizados para garantizar la pureza de la solución a través de la filtración de múltiples etapas. El filtro debe estar equipado con una tela filtrante resistente a la corrosión y un sistema de limpieza automatizado para prolongar la vida útil y reducir la manipulación manual.

Tanque de sedimentación: Se utiliza para convertir la solución de tungstato de sodio en precipitado de ácido tungstico a través de la reacción de acidificación. Los tanques de sedimentación deben estar equipados con un control preciso del pH y agitación para garantizar la uniformidad y pureza de las partículas precipitadas. Algunos equipos avanzados utilizan monitores de pH en línea para ajustar la cantidad de ácido agregado en tiempo real.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Horno de secado: se utiliza para secar la precipitación de ácido tungstico o trióxido de tungsteno, preparando productos intermedios secos. Los hornos de secado suelen calentarse eléctricamente o a gas, y deben tener un campo de temperatura uniforme y protección contra gas inerte para evitar la oxidación del material. Los hornos de secado modernos están equipados con sistemas de vacío que permiten el secado a temperaturas más bajas y reducen el consumo de energía.

El equipo de purificación química debe controlar estrictamente los parámetros del proceso (como temperatura, presión, concentración de solución) para garantizar que la pureza del trióxido de tungsteno alcance más del 99,95%. Además, los equipos de tratamiento de aguas residuales, como los tanques de neutralización y los tanques de sedimentación, son una parte indispensable del proceso de purificación para el tratamiento de líquidos residuales que contienen tungsteno, que cumple con los requisitos ambientales.

## 5.2 Equipo de pulvimetalurgia para electrodo de tungsteno puro

La pulvimetalurgia es el proceso central de la producción de electrodos de tungsteno puro, que implica el prensado, la sinterización y el tratamiento térmico del polvo de tungsteno, que requiere equipos de alta precisión y resistentes a altas temperaturas para garantizar la densidad y el rendimiento del cuerpo verde.

### 5.2.1 Prensas

La prensa se utiliza para prensar polvo de tungsteno de alta pureza en un cuerpo verde con cierta forma y resistencia, y el equipo común incluye:

Prensa isostática en frío: Se aplica una presión uniforme (100-300 MPa) al polvo de tungsteno mediante un medio líquido de alta presión (como agua o aceite) para crear un cuerpo verde con densidad uniforme. Las prensas isostáticas en frío utilizan moldes flexibles (por ejemplo, moldes de caucho o poliuretano) y son adecuadas para la producción de formas grandes o complejas. El equipo debe estar equipado con bombas de alta presión y sistemas de sellado para garantizar una presión estable y un funcionamiento seguro. Las prensas isostáticas en frío modernas están equipadas con sistemas automatizados de carga y descarga para mejorar la eficiencia de la producción.

Máquina de moldeo: se aplica presión unidireccional al polvo de tungsteno a través de un troquel de acero, que es adecuado para la producción de lotes pequeños o formas simples de cuerpos verdes. La máquina de moldeo necesita usar un molde de alta resistencia (como carburo cementado) para soportar la alta dureza del polvo de tungsteno. El equipo suele estar equipado con un sistema de accionamiento hidráulico o mecánico que permite un control preciso de la fuerza de prensado (50-200 MPa) y la velocidad de prensado.

La prensa debe estar equipada con un dispositivo de llenado de polvo y un sistema de pulverización de aglutinante para garantizar la uniformidad del polvo de tungsteno y la resistencia de moldeo del cuerpo verde. Además, el control del polvo durante el proceso de prensado es crítico y requiere un sistema de succión de presión negativa para proteger el entorno operativo.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 5.2.2 Sintering furnaces

El horno de sinterización se utiliza para calentar el cuerpo verde prensado a 2000-2800 °C, de modo que las partículas de polvo de tungsteno se combinen para formar un cuerpo verde de alta densidad. Los hornos de sinterización comúnmente utilizados incluyen:

Horno de sinterización al vacío: sinterización en un entorno de vacío ( $10^{-3}$ - $10^{-5}$  Pa) para evitar la oxidación del cuerpo de tungsteno. El horno de sinterización al vacío utiliza elementos calefactores de molibdeno o grafito y tiene una uniformidad de campo a alta temperatura, que es adecuada para la producción de electrodos de alta pureza. El equipo está equipado con una bomba de vacío multietapa y un sistema de enfriamiento para alcanzar rápidamente un alto vacío y controlar la velocidad de enfriamiento.

Horno de sinterización de hidrógeno: sinterización bajo la protección de hidrógeno de alta pureza, el hidrógeno puede reducir los óxidos residuales y mejorar la pureza del cuerpo verde. Los hornos de sinterización de hidrógeno deben estar equipados con sistemas de circulación y purificación de gas para garantizar la pureza del hidrógeno ( $\geq 99,999\%$ ) y evitar fugas. Los hornos de sinterización modernos utilizan la tecnología de calentamiento por inducción de frecuencia media para calentarse rápidamente y reducir el consumo de energía.

El horno de sinterización debe estar equipado con un sistema de control de temperatura preciso (por ejemplo, termómetro infrarrojo) y un dispositivo de monitoreo de atmósfera para garantizar la estabilidad del proceso de sinterización y la calidad del cuerpo verde. En los últimos años, los hornos de sinterización por plasma de descarga (SPS) se han utilizado cada vez más en la producción de electrodos de tungsteno de alto rendimiento, que utilizan pulsos eléctricos para calentarse rápidamente para acortar el tiempo de sinterización y refinar los granos.

### 5.2.3 Hornos de tratamiento térmico al vacío

El horno de tratamiento térmico al vacío se utiliza para el tratamiento térmico y el recocido del cuerpo verde sinterizado, eliminando el estrés interno y mejorando la microestructura. Las características incluyen:

Ambiente de vacío a alta temperatura: la temperatura de tratamiento térmico es de 1200-1800 °C y el grado de vacío es de  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  Pa para evitar la oxidación del cuerpo verde. El cuerpo del horno adopta elementos calefactores de molibdeno o tungsteno y está equipado con un sistema de enfriamiento por agua para proteger la estructura del horno.

Control preciso de la temperatura: Los termopares y los controladores PID alcanzan una precisión de temperatura de  $\pm 5$  °C para garantizar resultados consistentes del tratamiento térmico. Algunos de los equipos avanzados están equipados con programas de control de temperatura de varias etapas, que pueden realizar procesos complejos de tratamiento térmico.

Protección de gas inerte: Algunos hornos de tratamiento térmico admiten la protección de argón o nitrógeno para necesidades específicas del proceso. El sistema de circulación de gas mejora la

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

eficiencia térmica y reduce el consumo de gas.

Los hornos de tratamiento térmico al vacío requieren un mantenimiento regular de los elementos calefactores y los sistemas de vacío para garantizar un funcionamiento estable a largo plazo. El horno de tratamiento térmico inteligente monitorea la temperatura de la palanquilla y la distribución de la tensión en tiempo real a través de sensores para optimizar los parámetros del tratamiento térmico.

### **5.3 Equipo de procesamiento a presión para electrodo de tungsteno puro**

El procesamiento a presión es un paso clave en el procesamiento de cuerpos verdes sinterizados en barras de electrodos, que involucra procesos como la forja, el laminado y el trefilado, que requieren el uso de equipos de procesamiento de alta temperatura y alta resistencia.

#### **5.3.1 Máquinas de forja**

La máquina de forja se utiliza para deformar el cuerpo en blanco sinterizado a alta temperatura (1500-1800 °C) para hacer una varilla o placa en blanco. Los equipos de uso común incluyen:

Máquina de forja hidráulica: el sistema hidráulico aplica alta presión (1000-5000 kN) para deformar gradualmente el cuerpo verde. El equipo debe estar equipado con un horno de calentamiento de alta temperatura y un sistema de protección de hidrógeno para evitar la oxidación del cuerpo verde. La máquina de forja hidráulica es adecuada para la producción de piezas en bruto de gran tamaño con alta precisión de deformación.

Martillo neumático: La cabeza del martillo es accionada por un neumático para tener un impacto rápido en la palanquilla, que es adecuada para forjar palanquillas pequeñas y medianas. El martillo neumático es flexible de operar, pero la cantidad de deformación debe controlarse manualmente, lo que es adecuado para la producción de lotes pequeños.

La máquina de forja debe estar equipada con un troquel de alta resistencia y un sistema de lubricación para reducir la fricción entre el cuerpo y el troquel. Las máquinas de forja modernas adoptan un sistema de control automático, que puede ajustar la fuerza y la temperatura de forja en tiempo real para mejorar la eficiencia de la producción.

#### **5.3.2 Trenes de laminación**

Los trenes de laminación se utilizan para procesar aún más piezas en bruto forjadas en barras delgadas o alambres, y el equipo común incluye:

Laminador en caliente: Las piezas en bruto se laminan en barras con un diámetro de 5-20 mm mediante múltiples pasadas a 1000-1500 °C. Los trenes de laminación en caliente utilizan rodillos de carburo de tungsteno o cerámicos para soportar la alta dureza del tungsteno. El equipo está equipado con un horno de calentamiento y un sistema de enfriamiento para garantizar la temperatura de laminación y la calidad de la superficie.

#### **Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**

Laminador en frío: se utiliza para el laminado de acabado para mejorar aún más la precisión dimensional y el acabado superficial de la barra. Los trenes de laminación en frío deben estar equipados con rodillos de alta precisión y sistemas de lubricación para reducir el endurecimiento del trabajo.

El tren de laminación requiere un mantenimiento regular de los rodillos y del sistema de accionamiento para garantizar la estabilidad operativa a largo plazo. Los trenes de laminación automatizados utilizan sensores para monitorear las fuerzas de laminación y los tamaños de las barras para mejorar la consistencia del procesamiento.

### 5.3.3 Trefiladoras

Las máquinas de trefilado se utilizan para estirar barras laminadas en piezas en bruto de electrodos con un diámetro de 0,5-6,4 mm, el equipo común incluye:

Máquina de trefilado de un solo troquel: estira la barra una por una a través de un solo molde, que es adecuado para la producción de lotes pequeños. El equipo debe estar equipado con troqueles de carburo o diamante para soportar la alta dureza y fricción del tungsteno.

Máquina de trefilado continuo: estiramiento continuo a través de múltiples troqueles para mejorar la eficiencia de la producción. La máquina de trefilado continuo está equipada con un sistema de lubricación (como emulsión de grafito o disulfuro de molibdeno) y un dispositivo de recocido para reducir el riesgo de rotura del hilo.

Las máquinas de trefilado deben controlar con precisión la velocidad de tracción y la temperatura (800-1200 °C) para evitar grietas o defectos en la superficie. Las máquinas trefiladoras modernas están controladas por servomotores y PLC para lograr un estiramiento de alta precisión.

## 5.4 Equipo de tratamiento de superficies para electrodos de tungsteno puro

El equipo de tratamiento de superficies se utiliza para mejorar la calidad de la superficie y el reconocimiento de los electrodos, incluida la limpieza, el pulido y el marcado de la cabeza del recubrimiento.

### 5.4.1 Equipos de limpieza

El equipo de limpieza se utiliza para eliminar el aceite, los óxidos y las impurezas de la superficie del electrodo, el equipo de uso común incluye:

Limpiador ultrasónico: Eliminación de partículas finas de la superficie mediante vibración ultrasónica de alta frecuencia (20-40 kHz), generalmente en solución alcalina o agua pura. El equipo debe estar equipado con un sistema de limpieza de múltiples tanques que admita la limpieza y el enjuague de varias etapas.

Baño de limpieza químico: utiliza ácidos diluidos (por ejemplo, ácido nítrico diluido) o soluciones

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

alcalinas (por ejemplo, hidróxido de sodio) para eliminar la capa de óxido. El tanque de limpieza debe estar hecho de un material resistente a la corrosión (por ejemplo, PTFE) y estar equipado con agitación y calentamiento.

El equipo de limpieza debe estar equipado con un sistema de tratamiento de líquidos residuales para recuperar el líquido residual que contiene tungsteno para cumplir con los requisitos de protección ambiental. La línea de limpieza automatizada puede realizar una limpieza continua y mejorar la eficiencia.

#### 5.4.2 Pulidoras

Las máquinas pulidoras se utilizan para mejorar el acabado superficial de los electrodos, y el equipo común incluye:

**Pulidora mecánica:** Los arañazos superficiales se eliminan con una muela abrasiva o un paño de pulido con una rugosidad superficial de hasta Ra 0,2-0,4  $\mu\text{m}$ . El equipo debe estar equipado con un cabezal de pulido de varias etapas para soportar el pulido en bruto y el pulido fino.

**Pulidora electroquímica:** Alisa la superficie mediante electrólisis, mejorando el acabado y la resistencia a la corrosión. La máquina pulidora electroquímica debe estar equipada con una fuente de alimentación estable y un sistema de circulación de electrolitos para garantizar un pulido uniforme.

La máquina pulidora necesita cambiar el medio de pulido y verificar la composición del electrolito con regularidad para mantener la calidad del pulido. El equipo de pulido automatizado se maneja con precisión mediante un brazo robótico.

#### 5.4.3 Equipo aplicador

El aplicador se utiliza para aplicar una marca verde en un extremo del electrodo y cumple con las normas AWS A5.12 e ISO 6848. Los equipos de uso común incluyen:

**Máquina de pulverización automática:** La pintura verde a base de agua se aplica uniformemente al electrodo a través de la pistola rociadora. La máquina está equipada con un sistema de posicionamiento preciso para garantizar un espesor de recubrimiento uniforme (aprox. 0,1-0,2 mm).

**Horno de secado:** utilizado para curar recubrimientos, la temperatura se controla a 100-150  $^{\circ}\text{C}$ , mediante circulación de aire caliente o calentamiento por infrarrojos. El horno de secado debe tener un calentamiento rápido y un campo de temperatura uniforme para garantizar la adhesión del recubrimiento.

El equipo aplicador debe limpiar las boquillas y verificar la calidad de la pintura con regularidad para evitar defectos de recubrimiento. El equipo de cabezal de recubrimiento inteligente puede ajustar automáticamente la posición de pulverización a través del sistema de reconocimiento visual.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## 5.5 Equipos de prueba y control de calidad para electrodos de tungsteno puro

Los equipos de prueba y control de calidad se utilizan para garantizar que la composición química, la microestructura y las propiedades físicas de los electrodos cumplan con los estándares, que cubren las pruebas de materias primas, productos semiacabados y productos terminados.

### 5.5.1 Analizadores de composición química

Los analizadores de composición química se utilizan para probar la pureza y el contenido de impurezas del polvo y los electrodos de tungsteno, y los equipos de uso común incluyen:

**Espectrómetro de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES):** La espectroscopia de elementos se analiza mediante la excitación de la muestra por plasma, y el contenido de tungsteno e impurezas (como hierro, níquel, oxígeno) se puede detectar con una precisión de ppm. El equipo debe estar equipado con un sistema de suministro de gas y preparación de muestras de alta pureza.

**Analizador de fluorescencia de rayos X (XRF):** Excitación de la muestra por rayos X para analizar el espectro de fluorescencia, adecuado para ensayos rápidos no destructivos. Los equipos XRF son altamente portátiles y adecuados para el análisis en tiempo real en la planta de producción.

Los analizadores de composición química deben calibrarse con regularidad para garantizar la precisión de la detección. El analizador inteligente puede generar automáticamente informes de análisis para mejorar la eficiencia de la detección.

### 5.5.2 Equipos de análisis de microestructuras

El equipo de análisis de microestructura se utiliza para detectar el tamaño de grano, los defectos y la uniformidad de la microestructura de los electrodos, y el equipo de uso común incluye:

**Microscopía óptica:** se utiliza para observar la estructura del grano y los defectos microscópicos de la sección transversal del electrodo con un aumento de 50-1000x. El equipo debe estar equipado con un software de análisis de imágenes para cuantificar el tamaño de grano y la distribución de defectos.

**Microscopía electrónica de barrido (SEM):** Escaneo de muestras con haces de electrones para analizar la topografía de la superficie y la microestructura con resolución nanométrica. Los SEM suelen estar equipados con un espectrómetro de dispersión de energía (EDS) para el análisis de las composiciones químicas locales.

El equipo de análisis de microestructura requiere un mantenimiento regular de la fuente de haz de electrones y del sistema de vacío para garantizar la calidad de la imagen. El equipo de última generación admite la reconstrucción en 3D y el análisis en profundidad de la estructura interna del electrodo.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 5.5.3 Equipo de ensayo de rendimiento físico

El equipo de prueba de rendimiento físico se utiliza para probar la densidad, la dureza, la conductividad y la tolerancia dimensional de los electrodos, el equipo de uso común incluye:

Comprobador de densidad: La densidad del electrodo se mide según el principio de Arquímedes para garantizar que la densidad teórica (19,3 g/cm<sup>3</sup>) sea superior al 95%. El equipo debe estar equipado con una balanza de alta precisión y un tanque de agua termostático.

Probador de dureza: El probador de dureza Vickers o Brinell se utiliza para medir la dureza del electrodo (HV 350-450). El equipo debe estar equipado con un penetrador de diamante y un sistema de carga de alta precisión.

Probador de conductividad: Evalúa la conductividad de los electrodos midiendo la resistividad de los electrodos mediante el método de cuatro sondas. El equipo debe estar equipado con una fuente de corriente constante y un microvoltímetro para garantizar la precisión de la medición.

Instrumento de medición dimensional: El telémetro láser o el instrumento de medición de imágenes se utiliza para detectar el diámetro del electrodo ( $\pm 0,05$  mm) y la tolerancia de longitud. El dispositivo admite la medición sin contacto y es adecuado para requisitos de alta precisión.

El equipo de prueba de rendimiento físico debe calibrarse regularmente para garantizar la confiabilidad de los datos. El sistema de prueba automatizado puede realizar una detección sincrónica multiparamétrica y mejorar la eficiencia.

## 5.6 Automatización y equipos inteligentes para electrodos de tungsteno puro

La automatización y los equipos inteligentes son una tendencia importante en la modernización de la producción de electrodos de tungsteno puro, lo que mejora la eficiencia de la producción y la estabilidad de la calidad mediante la integración de sensores, sistemas de control y tecnologías de análisis de datos.

### 5.6.1 Aplicación de líneas de producción automatizadas

La línea de producción automatizada integra trituración, prensado, sinterización, procesamiento y tratamiento de superficies, y realiza una producción continua a través de robots, cintas transportadoras y sistemas de control automático. El equipo clave incluye:

Sistema de carga automática: se utiliza para el llenado y prensado automático de polvo de tungsteno, equipado con un brazo robótico y una celda de carga para garantizar la uniformidad y precisión de la carga.

Línea de sinterización continua: El cuerpo verde se alimenta continuamente al horno de sinterización a través de una cinta transportadora y está equipado con un sistema de control de temperatura de varias etapas para lograr una sinterización eficiente. El sistema admite el monitoreo

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

en línea de la temperatura corporal y la atmósfera de la palanquilla.

Línea de procesamiento automático: equipos integrados de forja, laminación y trefilado, procesamiento continuo mediante control PLC. El sistema está equipado con un dispositivo de reconocimiento visual para detectar el tamaño de la pieza en bruto y los defectos de la superficie.

Las líneas de producción automatizadas reducen los errores operativos y los riesgos de seguridad al reducir la intervención manual, al tiempo que aumentan la eficiencia de la producción. Algunas líneas de producción avanzadas admiten el diseño modular, que puede ajustar de manera flexible el flujo del proceso de acuerdo con las necesidades de producción.

### 5.6.2 Sistema de monitorización inteligente

El sistema de monitoreo inteligente monitorea los parámetros del proceso de producción en tiempo real a través de sensores, Internet de las cosas y tecnología de análisis de big data para mejorar la eficiencia del control de calidad y el mantenimiento de los equipos. Las tecnologías clave incluyen:

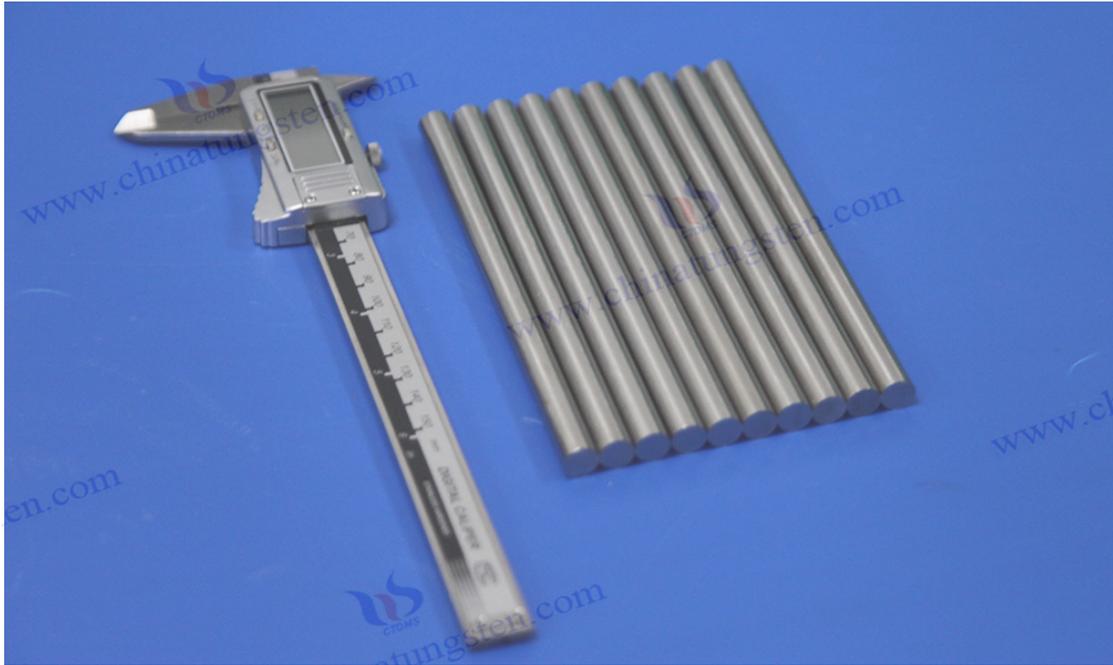
Sensores de monitoreo en línea: incluidos sensores de temperatura, sensores de presión y analizadores de gas, monitoreo en tiempo real de la temperatura del horno de sinterización, tensión de la máquina de trefilado y composición de la atmósfera protectora. Los datos se transmiten al sistema de control central a través del Internet de las cosas.

Sistema de diagnóstico de fallas: analiza los datos de operación de los equipos a través de algoritmos de aprendizaje automático, predice posibles fallas y proporciona recomendaciones de mantenimiento. El sistema reduce el tiempo de inactividad de los equipos y aumenta la continuidad de la producción.

Sistema de trazabilidad de la calidad: registre los parámetros de producción y los datos de prueba de cada lote de electrodos, y establezca una base de datos de trazabilidad. El sistema es compatible con la tecnología de código de barras o RFID, que es conveniente para la gestión de calidad y la consulta del cliente.

El sistema de monitoreo inteligente proporciona retroalimentación en tiempo real al operador a través de una plataforma de visualización de datos (como un sistema SCADA), lo que permite el monitoreo remoto y la toma de decisiones optimizada. En el futuro, con el desarrollo de la tecnología Industria 4.0, el sistema de monitoreo inteligente integrará aún más la inteligencia artificial y la computación en la nube para realizar la gestión inteligente de todo el proceso.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal



**Electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD**

## **Capítulo 6 Normas nacionales y extranjeras para electrodos de tungsteno puro**

Como material importante para la soldadura por arco de argón de tungsteno (soldadura TIG), el rendimiento y la calidad del electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) afectan directamente el efecto de la soldadura. Para garantizar la consistencia del producto y la disponibilidad en el mercado, se han desarrollado una serie de normas en todo el mundo, que abarcan la composición química, las tolerancias dimensionales, los requisitos de rendimiento y los métodos de prueba. Estas normas son formuladas por organizaciones internacionales, instituciones nacionales y asociaciones industriales, formando un sistema normativo relativamente completo. Este capítulo discutirá en detalle las normas internacionales, las normas nacionales chinas y otras normas nacionales para electrodos de tungsteno puro, analizará sus diferencias y esperará la tendencia de desarrollo de los estándares.

### **6.1 Normas internacionales para electrodos de tungsteno puro**

Las normas internacionales proporcionan una especificación unificada para el comercio global y la aplicación de electrodos de tungsteno puro, y son desarrolladas principalmente por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), la Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Comité Europeo de Normalización (CEN). A continuación se centra en las normas AWS A5.12, ISO 6848 y EN 26848.

#### **6.1.1 AWS A5.12 (Estándar del Instituto Americano de Soldadura)**

AWS A5.12 es un estándar de electrodos de tungsteno desarrollado por la American Welding Society, el nombre completo es "Especificación para electrodos de tungsteno y tungsteno dispersos por óxido para soldadura y corte por arco", y la última versión es AWS A5.12 / A5.12M: 2009. Este estándar es ampliamente utilizado en la industria de soldadura de América del Norte y mundial, cubriendo la

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

clasificación, la composición química, el tamaño y los requisitos de rendimiento de los electrodos de tungsteno puro y otros electrodos dopados.

Para los electrodos de tungsteno puro (código EWP, marcado en verde), AWS A5.12 requiere un contenido de tungsteno del  $\geq$  del 99,5% y trazas de impurezas (por ejemplo, hierro, níquel, oxígeno). La superficie del electrodo debe ser lisa, libre de grietas, porosidad o inclusiones, y los extremos deben estar marcados en verde para una fácil identificación. La norma especifica el rango de diámetro (0,5-6,4 mm) y la longitud (75-610 mm) de los electrodos, con tolerancias que cumplen con los requisitos de fabricación de precisión. Además, AWS A5.12 tiene regulaciones claras sobre el empaque y el etiquetado de electrodos, que requieren que se etiquete el número de lote, la especificación y la información del fabricante para garantizar la trazabilidad.

AWS A5.12 enfatiza el rendimiento de soldadura de los electrodos, y se recomienda que los electrodos de tungsteno puro se utilicen principalmente para la soldadura de CA (CA), especialmente adecuados para soldar aluminio, magnesio y sus aleaciones. La norma no especifica los métodos de prueba para la estabilidad del arco o las tasas de consumo de electrodos, pero requiere que los fabricantes proporcionen datos de rendimiento para referencia del usuario. Este estándar es autorizado en el mercado norteamericano, y muchos fabricantes internacionales también producen electrodos de tungsteno puro de acuerdo con sus requisitos.

### 6.1.2 ISO 6848 (Organización Internacional de Normalización)

ISO 6848 es el estándar de electrodos de tungsteno formulado por la Organización Internacional de Normalización, el nombre completo es "Soldadura y corte por arco - Electrodos de tungsteno no consumibles - Clasificación", y la última versión es ISO 6848:2015. Esta norma es aplicable a la industria mundial de la soldadura, con el objetivo de unificar los requisitos de clasificación, marcado y rendimiento de los electrodos de tungsteno, y promover el comercio internacional y los intercambios técnicos.

La norma ISO 6848 clasifica los electrodos de tungsteno puro como WP (marcado verde) y exige un contenido de tungsteno del  $\geq$  del 99,5% y un estricto control de las impurezas. La norma especifica en detalle la composición química, la tolerancia dimensional y la calidad de la superficie del electrodo, requiere que no haya defectos obvios en la superficie del electrodo y que la marca del recubrimiento sea resistente al desgaste y no afecte el rendimiento de la soldadura. Los diámetros de los electrodos oscilan entre 0,5 y 10 mm, y las longitudes suelen ser de 50 a 175 mm, y las dimensiones específicas se pueden personalizar según las necesidades del usuario. La norma ISO 6848 también exige que los electrodos se limpien y sequen antes del embalaje para evitar la contaminación o la oxidación.

Al igual que AWS A5.12, la norma ISO 6848 recomienda electrodos de tungsteno puro para la soldadura de CA debido a su excelente efecto de "limpieza catódica" en la soldadura de aleación de aluminio y magnesio. La norma tiene una breve descripción del método de prueba de rendimiento del electrodo, como el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco que se evaluará

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

en condiciones de soldadura estándar, pero no especifica parámetros de prueba específicos. Debido a su naturaleza internacional, la norma ISO 6848 es ampliamente utilizada en Europa, Asia y África y es una importante norma de referencia para el comercio mundial de electrodos de tungsteno.

### 6.1.3 EN 26848 (norma europea)

EN 26848 es un estándar de electrodos de tungsteno desarrollado por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que es altamente consistente con ISO 6848, y el nombre completo es "Consumibles de soldadura - Electrodos de tungsteno para soldadura por arco con protección de gas inerte y para soldadura por plasma". La norma se utiliza principalmente en los estados miembros de la UE, y la última versión se actualiza en sincronía con la norma ISO 6848:2015.

La norma EN 26848 requiere la misma composición química que la norma ISO 6848 para los electrodos de tungsteno puro (WP, marcado verde), con un contenido de tungsteno del  $\geq$  del 99,5% y las impurezas deben controlarse a niveles de trazas. La norma tiene requisitos para el tamaño, la calidad de la superficie y el marcado de los electrodos de acuerdo con la norma ISO 6848, haciendo hincapié en la uniformidad y limpieza de los electrodos. La norma EN 26848 también recomienda el almacenamiento y el transporte de electrodos, lo que requiere el uso de un embalaje resistente a la humedad y a los golpes para proteger el rendimiento de los electrodos.

En cuanto a las aplicaciones, la norma EN 26848 recomienda electrodos de tungsteno puro para la soldadura TIG de CA y la soldadura por plasma, especialmente en las industrias automotriz, aeroespacial y de construcción naval en Europa. La norma no especifica en detalle los métodos de prueba de rendimiento, pero exige a los fabricantes que proporcionen hojas de datos técnicos que describan los escenarios de aplicación y las recomendaciones operativas para los sensores. La implementación de la norma EN 26848 ha promovido la estandarización de la industria europea de soldadura y la aplicación de electrodos de tungsteno puro en el campo de la fabricación de alta precisión.

## 6.2 Estándar nacional chino para electrodos de tungsteno puro

Como el mayor productor mundial de recursos de tungsteno y electrodos de tungsteno, China ha formulado una serie de normas nacionales y normas de la industria para regular la producción y aplicación de electrodos de tungsteno puro. Entre ellos, GB/T 4190 es el estándar principal, y los estándares relevantes de la industria complementan los requisitos específicos.

### 6.2.1 GB/T 4190 (estándar de electrodo de tungsteno)

GB/T 4190 es un estándar nacional chino, el nombre completo es "Electrodos de tungsteno y aleación de tungsteno para soldadura TIG con electrodo no fundente", y la última versión es GB/T 4190-2017. Esta norma es aplicable a los electrodos de tungsteno para soldadura TIG y soldadura por plasma, cubriendo la clasificación, la composición química, el tamaño y los requisitos de rendimiento de los electrodos de tungsteno puro y otros electrodos dopados.

Para los electrodos de tungsteno puro (código WP), GB/T 4190 requiere un contenido de tungsteno

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

del  $\geq$  del 99,5%, y el contenido de impurezas (como hierro, silicio, carbono) debe controlarse a niveles de trazas para garantizar la pureza y el rendimiento de soldadura del electrodo. La superficie del electrodo debe ser lisa, libre de grietas, capas de óxido o manchas de aceite, y los extremos deben estar marcados con una marca verde, de acuerdo con la práctica internacional. La norma especifica el diámetro (0,5-6,0 mm) y la longitud (50-300 mm) del electrodo para cumplir con las tolerancias requeridas para el mecanizado de precisión. El embalaje requiere que los electrodos se empaqueten en cajas de plástico o metal con especificaciones, números de lote y fechas de producción.

GB/T 4190 recomienda electrodos de tungsteno puro para la soldadura de CA, especialmente en la soldadura de aluminio, magnesio y sus aleaciones. La norma tiene disposiciones breves para las pruebas de rendimiento, como la estabilidad del arco que se evaluará mediante pruebas de soldadura simuladas y el consumo de electrodos que se medirá a corrientes estándar. GB/T 4190 también requiere que los fabricantes proporcionen un certificado de calidad que indique la composición química y los datos de rendimiento del electrodo. Esta norma es obligatoria en el mercado chino y es la base principal para la producción y aplicación de electrodos de tungsteno en China.

### 6.2.2 Estándares relevantes de la industria

Además de GB/T 4190, China también ha desarrollado una serie de estándares de la industria, complementando las especificaciones para electrodos de tungsteno puro en campos específicos. Por ejemplo:

YS/T 626-2018 "Electrodo de tungsteno": formulado por la industria de metales no ferrosos, especifica en detalle la composición química, la tolerancia dimensional y la calidad de la superficie del electrodo de tungsteno, y es adecuado para las industrias aeroespacial y electrónica. Esta norma tiene requisitos más estrictos para el contenido de impurezas de los electrodos de tungsteno puro, que es adecuado para aplicaciones de soldadura de alta precisión.

JB/T 12839-2016 "Condiciones técnicas de los electrodos de tungsteno para soldadura": formulado por el Ministerio de Industria de Maquinaria, centrado en el rendimiento de la soldadura y los métodos de prueba de los electrodos de tungsteno. Esta norma requiere que los electrodos de tungsteno puro tengan un buen rendimiento de iniciación de arco y estabilidad del arco en la soldadura de CA, que es adecuada para la construcción naval y la soldadura de recipientes a presión.

QJ 2088-2005 "Electrodos de tungsteno para la industria aeroespacial": formulado por el Ministerio de Industria Aeroespacial, especialmente formulado para soldadura de alta confiabilidad en el campo aeroespacial. El estándar requiere una pureza, estructura de grano y precisión dimensional extremadamente altas de los electrodos de tungsteno puro para garantizar su rendimiento en entornos extremos.

Estos estándares de la industria complementan GB/T 4190, cubriendo una variedad de escenarios, desde la fabricación general hasta las aplicaciones de alta gama, y promueven el desarrollo de la estandarización de la industria de electrodos de tungsteno de China.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 6.3 Otras normas nacionales para electrodos de tungsteno puro

Además de los estándares internacionales y los estándares chinos, los estándares de electrodos de tungsteno también se han desarrollado en otros países para satisfacer las necesidades del mercado local. A continuación se centra en la JIS Z 3233 japonesa y la norma alemana DIN EN ISO 6848.

#### 6.3.1 JIS Z 3233 (Norma industrial japonesa)

JIS Z 3233 es un estándar industrial japonés, el nombre completo es "Electrodos de tungsteno para soldadura por arco con protección de gas inerte" y la última versión es JIS Z 3233: 2017. Esta norma es aplicable a los electrodos de tungsteno para soldadura TIG, que se utilizan ampliamente en las industrias automotriz, electrónica y de maquinaria de precisión en Japón.

JIS Z 3233 clasifica los electrodos de tungsteno puro como WP, lo que requiere un contenido de tungsteno del  $\geq 99,5\%$  y un estricto control de impurezas. La superficie del electrodo debe estar limpia y libre de defectos, y los extremos deben estar marcados con verde. La norma especifica el diámetro (0,5-6,0 mm) y la longitud (50-200 mm) de los electrodos con tolerancias coherentes con la norma ISO 6848. JIS Z 3233 recomienda electrodos de tungsteno puro para soldadura de CA, especialmente en aleaciones de aluminio y magnesio.

En comparación con los estándares internacionales, JIS Z 3233 tiene requisitos más altos para la calidad de la superficie de los electrodos, y debe estar libre de defectos visibles para satisfacer las necesidades de alta precisión de las industrias manufactureras japonesas. La norma también impone requisitos específicos sobre el embalaje y el almacenamiento de electrodos, como el uso de envases a prueba de humedad y el almacenamiento en un entorno seco. JIS Z 3233 tiene una influencia importante en el mercado japonés, y muchos fabricantes japoneses de equipos de soldadura diseñan sus productos de acuerdo con sus requisitos.

#### 6.3.2 DIN EN ISO 6848 (norma alemana)

La norma DIN EN ISO 6848 es una versión localizada de la norma internacional ISO 6848 adoptada en Alemania, publicada por el Instituto Alemán de Normalización (DIN) de acuerdo con la norma ISO 6848:2015. La norma es ampliamente utilizada en Alemania y Europa Central, especialmente en los sectores de la automoción, la industria aeroespacial y la industria pesada.

La norma DIN EN ISO 6848 tiene los mismos requisitos de composición química, tamaño y rendimiento para los electrodos de tungsteno puro (WP, marcados en verde) que la norma ISO 6848, haciendo hincapié en la alta pureza y calidad superficial de los electrodos. Los electrodos de tungsteno puro se recomiendan para la soldadura TIG de CA como estándar y son adecuados para soldar aluminio, magnesio y sus aleaciones. La norma DIN EN ISO 6848 también exige a los fabricantes que proporcionen documentación técnica detallada, incluido el análisis de la composición química de los electrodos y datos sobre las propiedades de soldadura.

Como centro de fabricación en Europa, Alemania tiene requisitos extremadamente altos para la calidad de los consumibles de soldadura. La implementación de la norma DIN EN ISO 6848 ha llevado a la estandarización de los electrodos de tungsteno en el mercado alemán, especialmente en

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la fabricación de alta gama (por ejemplo, Mercedes-Benz y BMW).

#### 6.4 Comparación estándar y diferencias del electrodo de tungsteno puro

Aunque las normas nacionales y extranjeras tienen un alto grado de consistencia en la clasificación y aplicación de electrodos de tungsteno puro, existen ligeras diferencias en la composición química, las tolerancias dimensionales y los métodos de prueba de rendimiento. A continuación se presenta un análisis comparativo desde tres aspectos.

##### 6.4.1 Requisitos de composición química

Los requisitos de composición química de los electrodos de tungsteno puro son básicamente los mismos en cada estándar, y el contenido de tungsteno debe ser  $\geq$  del 99,5%, pero el rango de control de impurezas es ligeramente diferente. Por ejemplo:

AWS A5.12: No existe un límite superior claro en la cantidad total de impurezas como hierro, níquel, silicio, etc., pero se requiere que las impurezas no afecten el rendimiento de la soldadura. La norma presta más atención al efecto de aplicación práctica del electrodo.

ISO 6848 y EN 26848: Especifica que las impurezas (por ejemplo, hierro, carbono, oxígeno) deben ser inferiores al 0,05% para cada artículo y al 0,5% para la cantidad total  $\leq$  garantizar una alta pureza y estabilidad del arco del electrodo.

GB/T 4190: El control de impurezas es más estricto, y el contenido individual de hierro, silicio, carbono y otros artículos debe ser inferior al 0,03%, y el contenido de oxígeno debe ser inferior al 0,02%, lo que es adecuado para aplicaciones de soldadura de alta precisión.

JIS Z 3233: Los requisitos de impurezas son similares a los de la norma ISO 6848, pero tienen requisitos más estrictos para el contenido de oxígeno ( $\leq 0,015\%$ ) para satisfacer las necesidades de la industria electrónica japonesa.

Estas diferencias reflejan el enfoque del país en los escenarios de soldadura y las necesidades de la industria. ISO 6848 y GB/T 4190 prestan más atención al control de pureza y son adecuados para la fabricación de alta gama; AWS A5.12 es más flexible y adaptable a una amplia gama de aplicaciones.

##### 6.4.2 Dimensiones y tolerancias

El rango de tamaño y los requisitos de tolerancia del electrodo son relativamente consistentes entre los estándares, pero los detalles específicos son diferentes:

Rango de diámetros: AWS A5.12 e ISO 6848 admiten 0,5-10 mm, GB/T 4190 y JIS Z 3233 están limitados a 0,5-6,0 mm, lo que refleja las necesidades principales de los diferentes mercados.

Tolerancias: AWS A5.12 permite tolerancias de diámetro de  $\pm 0,05$  mm (diámetro pequeño) a  $\pm 0,13$

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

mm (diámetro grande); ISO 6848 y GB/T 4190 tienen requisitos más estrictos y están unificados a  $\pm 0,05$  mm; JIS Z 3233 tiene una tolerancia de  $\pm 0,03$  mm para electrodos de diámetro pequeño ( $< 2,0$  mm), lo que refleja el énfasis de Japón en la fabricación de precisión.

Longitud: AWS A5.12 admite grandes equipos de soldadura de hasta 610 mm de longitud para el mercado norteamericano; ISO 6848 y GB/T 4190 son principalmente de 50-300 mm, que son adecuados para equipos generales; JIS Z 3233 es principalmente de 50-200 mm, lo que es adecuado para soldaduras de precisión pequeñas.

Estas diferencias están relacionadas con los equipos de soldadura y los hábitos de proceso de varios países. Por ejemplo, la soldadura de precisión en Japón tiende a favorecer los electrodos cortos de diámetro pequeño, mientras que los electrodos largos de diámetro grande se usan más comúnmente en la soldadura industrial a gran escala en América del Norte.

#### 6.4.3 Métodos de prueba de rendimiento

Otra diferencia entre el método de prueba de rendimiento es el estándar, y cada estándar tiene diferentes grados de especificación para las pruebas:

AWS A5.12: No se especifican los métodos de prueba para el rendimiento de iniciación del arco, la estabilidad del arco o la tasa de consumo del electrodo, solo se requieren datos de rendimiento del fabricante. Las pruebas dependen en gran medida de las prácticas de la industria, como la soldadura simulada a corrientes estándar.

ISO 6848 y EN 26848: Se recomienda probar el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco en condiciones de soldadura estándar, pero no se proporcionan parámetros de prueba detallados. La prueba de tasa de consumo de electrodos se realiza en soldadura de CA y se registra la pérdida de longitud por unidad de tiempo.

GB/T 4190: Especifica métodos de prueba más detallados, como el rendimiento de iniciación del arco que se probará a una corriente de 50-150 A, la estabilidad del arco que se evaluará mediante la fluctuación del voltaje del arco y el consumo de electrodos que se medirá en soldadura de CA de 200 A.

JIS Z 3233: El método de prueba es similar a ISO 6848, pero requiere que el rendimiento de iniciación del arco se pruebe a bajas corrientes ( $< 50$  A) para satisfacer las necesidades de la industria electrónica.

Estas diferencias reflejan el enfoque de cada país en el rendimiento de la soldadura. GB/T 4190 y JIS Z 3233 tienen requisitos de prueba más estrictos y son adecuados para aplicaciones de alta precisión; AWS A5.12 es más pragmático y más flexible en las pruebas.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## 6.5 La tendencia de desarrollo del estándar de electrodo de tungsteno puro

Con la transformación y actualización de la industria manufacturera global y la mejora de la conciencia ambiental, los estándares de electrodos de tungsteno puro se están desarrollando en la dirección de un mayor rendimiento, más seguros y más respetuosos con el medio ambiente. A continuación, se presentan las tendencias futuras desde dos aspectos: los requisitos medioambientales y de seguridad y los estándares de electrodos de alto rendimiento.

### 6.5.1 Requisitos medioambientales y de seguridad

La protección del medio ambiente y la seguridad son las principales fuerzas impulsoras para el desarrollo de estándares de electrodos de tungsteno. Los electrodos tradicionales de torio-tungsteno se limitan gradualmente debido a su óxido de torio radiactivo ( $\text{ThO}_2$ ), y los electrodos de tungsteno puro son alternativas ecológicas porque no son radiactivos. En el futuro, la norma reforzará aún más los siguientes requisitos:

**Materiales inofensivos:** La norma limitará estrictamente el contenido de impurezas potencialmente dañinas (por ejemplo, plomo, cadmio) en los electrodos y promoverá recubrimientos no tóxicos (por ejemplo, pintura de marcador verde a base de agua) para reducir la contaminación ambiental.

**Protección ambiental del proceso de producción:** La norma puede introducir requisitos ambientales en el proceso de producción, como la reducción del consumo de energía, la reducción de las aguas residuales y las emisiones de escape, y la promoción del reciclaje de residuos. Las futuras revisiones de ISO 6848 y GB/T 4190 pueden referirse a ISO 14001 (Sistema de Gestión Ambiental).

**Etiquetado de seguridad:** La norma mejorará las especificaciones de empaquetado y etiquetado de los electrodos, requiriendo un etiquetado claro de las pautas de uso seguro y no radiactivo para una fácil identificación y operación por parte de los usuarios. AWS A5.12 ha comenzado a requerir hojas de datos de seguridad (SDS) detalladas.

La mejora de los requisitos de protección y seguridad ambiental promoverá la aplicación de electrodos de tungsteno puro en la fabricación ecológica, especialmente en regiones con estrictas regulaciones ambientales como la Unión Europea y China.

### 6.5.2 Patrones de electrodos de alto rendimiento

Con el rápido desarrollo de las industrias aeroespacial, de nuevas energías y de semiconductores, los requisitos de rendimiento de los electrodos de tungsteno aumentan constantemente. Las normas futuras se centrarán en las siguientes direcciones:

**Requisitos de alta pureza:** El estándar puede aumentar el requisito de contenido de tungsteno al 99,99% y reducir aún más el contenido de impurezas para cumplir con los requisitos de pureza ultra alta de las industrias nuclear y de semiconductores.

**Estandarización de las pruebas de rendimiento:** La norma desarrollará métodos de prueba más detallados, como el rendimiento de iniciación del arco que se probará en el rango de corriente

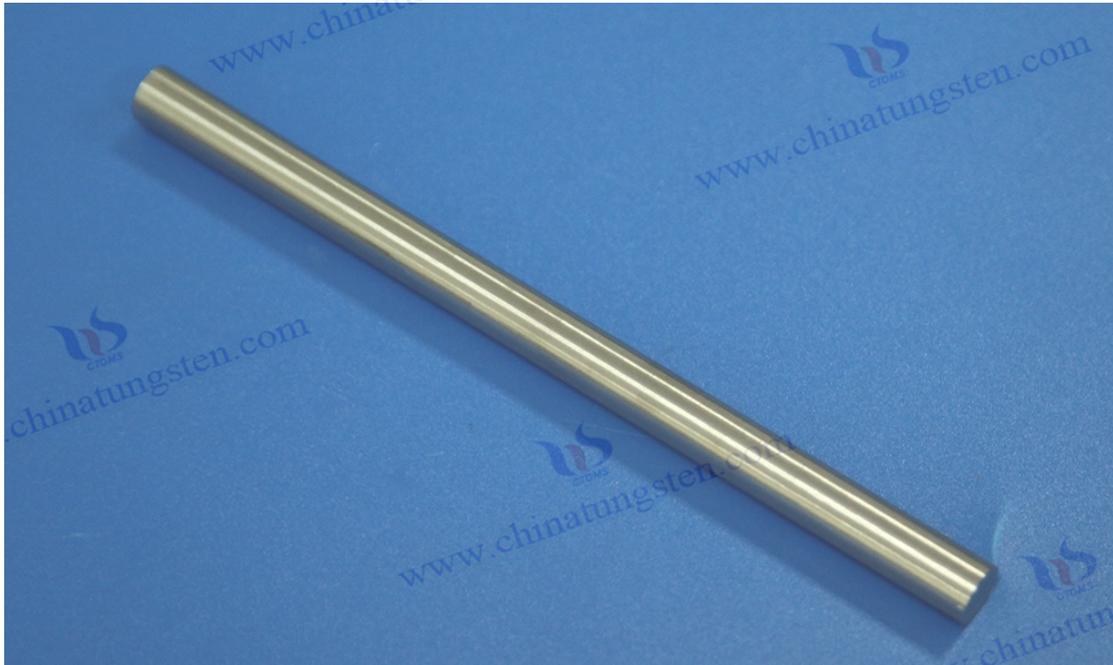
#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

múltiple (10-300 A), la estabilidad del arco que se cuantificará mediante un analizador de arco de alta frecuencia y el consumo de electrodos que se evaluará en múltiples condiciones de soldadura.

Compatibilidad de nuevos materiales: La norma puede extenderse a nuevos electrodos a base de tungsteno (por ejemplo, electrodos de tungsteno nanocristalino) para especificar su composición química, estructura de grano y requisitos de rendimiento para satisfacer las necesidades de soldadura de alto rendimiento.

Aplicación inteligente: La norma puede introducir requisitos que sean compatibles con los equipos de soldadura inteligentes, como que el tamaño y la calidad de la superficie del electrodo deban adaptarse al robot de soldadura automatizado para mejorar la eficiencia de la producción.

El desarrollo de estándares de electrodos de alto rendimiento promoverá la aplicación de electrodos de tungsteno puro en campos de fabricación de alta gama y, al mismo tiempo, promoverá la innovación de los procesos de producción, como la preparación de polvo de tungsteno ultrafino y la tecnología de sinterización rápida.



**electrodo de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD**

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## Capítulo 7 Métodos y tecnologías de detección de electrodos de tungsteno puro

Las pruebas de calidad de los electrodos de tungsteno puro (electrodos WP) son una parte clave para garantizar su rendimiento y confiabilidad, cubriendo la evaluación de la composición química, las propiedades físicas, la microestructura, las propiedades de soldadura y el rendimiento ambiental y de seguridad. Los métodos de detección deben incorporar instrumentación de alta precisión y procedimientos estandarizados para cumplir con los requisitos de las normas internacionales (por ejemplo, AWS A5.12, ISO 6848) y las normas nacionales chinas (por ejemplo, GB/T 4190). Este capítulo discutirá en detalle los métodos y técnicas de detección de electrodos de tungsteno puro, incluidas las pruebas de composición química, las pruebas de propiedades físicas, el análisis de microestructuras, las pruebas de rendimiento de soldadura, las pruebas ambientales y de seguridad, y la calibración y estandarización de equipos de prueba.

### 7.1 Detección de la composición química del electrodo de tungsteno puro

Las pruebas de composición química son el medio principal para evaluar la pureza y el contenido de impurezas de los electrodos de tungsteno puro, asegurando que el contenido de tungsteno sea  $\geq 99,5\%$  y que las impurezas (por ejemplo, hierro, níquel, oxígeno) estén dentro de un rango controlable. Los métodos comunes incluyen espectroscopia, análisis de fluorescencia de rayos X y valoración química.

#### 7.1.1 Análisis espectroscópico (ICP-OES)

La espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) es un método de alta precisión para detectar la composición química de los electrodos de tungsteno puro, que se usa ampliamente en laboratorios y sitios de producción. ICP-OES excita átomos de muestra con un plasma de alta temperatura (alrededor de  $8000-10,000^{\circ}\text{C}$ ) para generar un espectro de emisión de una longitud de onda específica para analizar el contenido de tungsteno y elementos atrapados.

El proceso de ensayo incluye la preparación de la muestra, la disolución, el análisis y el procesamiento de datos. Primero, la muestra de electrodo se corta en trozos pequeños y se disuelve en una solución con un ácido, como una mezcla de ácido nítrico y ácido fluorhídrico. Después de que la solución se inyecta en el instrumento ICP-OES, el plasma la atomiza y la excita, y el espectro de emisión es dividido por el espectrómetro y registrado por el detector. El instrumento calcula las concentraciones elementales a partir de curvas estándar (basadas en soluciones estándar de concentraciones conocidas) con límites de detección de hasta ppb (partes por billón) y es adecuado para la detección de trazas de impurezas (por ejemplo, hierro, níquel, silicio, carbono).

Las ventajas de ICP-OES son la alta sensibilidad, el análisis simultáneo de múltiples elementos y el amplio rango dinámico, que es adecuado para los estrictos requisitos de los electrodos de tungsteno de alta pureza. Las desventajas son que la muestra debe disolverse de manera destructiva y el instrumento es costoso. Los instrumentos modernos ICP-OES están equipados con sistemas de muestreo automatizados y software de procesamiento de datos para mejorar la eficiencia y la precisión de la detección.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

### 7.1.2 Análisis de fluorescencia de rayos X (XRF)

La fluorescencia de rayos X (XRF) es un método de prueba no destructivo que se utiliza para analizar rápidamente la composición química de los electrodos de tungsteno puro. XRF irradia la muestra por rayos X para excitar las transiciones de electrones en las capas internas de los átomos, lo que da como resultado una fluorescencia característica y analiza el contenido de tungsteno y elementos de impurezas.

Para las pruebas, la muestra de electrodo se coloca directamente en la plataforma del instrumento XRF, lo que elimina la necesidad de una preparación compleja. El instrumento emite rayos X de alta energía (como objetivos Rh o W), y la fluorescencia emitida por los átomos de muestra es recogida por el detector y convertida en un espectro. XRF puede detectar una amplia gama de elementos, desde aluminio (Al) hasta uranio (U), con límites de detección en el rango de ppm (partes por millón), lo que lo hace adecuado para un control de calidad rápido en el sitio de producción.

Las ventajas de XRF son que no es destructivo, es rápido (en cuestión de minutos) y fácil de operar, lo que lo hace adecuado para pruebas por lotes. La desventaja es que la sensibilidad es menor que la de ICP-OES y la capacidad de detección de elementos ligeros (por ejemplo, oxígeno, carbono) es limitada. Además, la contaminación de la superficie puede afectar los resultados, por lo que es importante asegurarse de que la superficie de la muestra esté limpia. Los equipos XRF portátiles se han utilizado ampliamente en las pruebas de campo en los últimos años, lo que aumenta la flexibilidad.

### 7.1.3 Valoración química

La valoración química es un método analítico tradicional utilizado para determinar la cantidad principal de tungsteno en un electrodo de tungsteno, adecuado para la validación o detección en laboratorio en ausencia de instrumentación de alta precisión. La valoración cuantifica la cantidad de tungsteno mediante reacciones químicas, normalmente utilizando la precipitación-valoración de tungstato.

El proceso de prueba incluye la disolución de la muestra, la precipitación de ácido tungstico y el análisis de valoración. Primero, la muestra de electrodo se disuelve en una solución ácida (como una mezcla de ácido clorhídrico y ácido nítrico) y se agrega hidróxido de sodio para generar una solución de tungstato de sodio. Posteriormente, el ácido de tungsteno se precipita mediante la adición de ácido, se filtra y se lava con una solución alcalina estándar (por ejemplo, NaOH) y se calcula el contenido de tungsteno. El criterio de valoración suele estar determinado por un indicador (por ejemplo, fenolftaleína) o un valorador potenciométrico.

Las ventajas de la valoración química son que el equipo es simple, el costo es bajo y es adecuado para pequeñas y medianas empresas. La desventaja es que la operación es engorrosa, requiere mucho tiempo y solo puede detectar el elemento principal (tungsteno) y no puede analizar trazas de impurezas. Además, la manipulación manual puede introducir errores, y las condiciones experimentales deben controlarse estrictamente. Los laboratorios modernos se basan principalmente

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

en ICP-OES o XRF, y la valoración química se utiliza como método de verificación complementario.

## 7.2 Propiedades físicas del electrodo de tungsteno puro

La prueba de propiedades físicas evalúa la densidad, dureza y conductividad de los electrodos de tungsteno puro para garantizar que sus propiedades mecánicas y eléctricas cumplan con los requisitos de soldadura. Los métodos comunes incluyen medición de densidad, prueba de dureza y prueba de conductividad.

### 7.2.1 Medición de la densidad

La densidad es un indicador importante para medir la densidad final de los electrodos de tungsteno puro, la densidad teórica es de 19,3 g / cm<sup>3</sup> y la densidad de los electrodos calificados generalmente debe alcanzar una densidad teórica del 95% al 98%. La medición de la densidad se basa en el principio de Arquímedes, que calcula la densidad midiendo la diferencia en la masa de una muestra en el aire y el líquido, generalmente agua o etanol.

El equipo de prueba incluye una balanza electrónica de alta precisión (precisión ±0,0001 g) y un tanque termostático de líquido. Primero se pesa la muestra en aire y se registra la masa  $m_1$ ; A continuación, se pesa por inmersión en un líquido y se registra la masa  $m_2$ . La densidad se calcula como:  $\rho = m_1 / (m_1 - m_2) \times \rho_0$ , donde  $\rho_0$  es la densidad del líquido. La prueba debe garantizar que la superficie de la muestra esté limpia y libre de burbujas de aire.

La ventaja de la medición de densidad es que es sencilla, precisa y adecuada tanto para centros de producción como para laboratorios. La desventaja es que se requiere que la forma de la muestra sea alta y las muestras irregulares deben procesarse adicionalmente. Los densímetros modernos están equipados con sistemas de medición automatizados que permiten inspecciones rápidas de varios lotes y registran datos para la trazabilidad.

### 7.2.2 Ensayos de dureza

La dureza refleja la resistencia al desgaste y la resistencia mecánica de los electrodos de tungsteno puro, y se prueba comúnmente con Vickers (HV) o Brinell (HB). La dureza de los electrodos de tungsteno puro suele ser HV 350-450, dependiendo del proceso de producción y la estructura del grano.

La prueba de dureza Vickers utiliza un penetrador de pirámide de diamante para aplicar una carga (generalmente de 5 a 10 kg) a la superficie de la muestra, medir la longitud diagonal de la indentación y calcular el valor de dureza. El equipo incluye un durómetro Vickers y un microscopio para garantizar que la superficie de la muestra sea plana y pulida. Las pruebas de dureza Brinell utilizan un penetrador de bola de carburo, que es adecuado para muestras más grandes, pero es ligeramente menos preciso que Vickers.

Las ventajas de las pruebas de dureza son intuitivas, confiables y reflejan la calidad de procesamiento y la durabilidad del electrodo. La desventaja es que los puntos de prueba están muy

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

localizados y deben promediarse en varias mediciones para representar el rendimiento general. El probador de dureza automatizado mide automáticamente el tamaño de la indentación a través del software de análisis de imágenes, lo que mejora la eficiencia de detección.

### 7.2.3 Ensayo de conductividad

La prueba de conductividad evalúa las propiedades eléctricas de los electrodos de tungsteno puro, lo que refleja su capacidad para transmitir corriente durante la soldadura. La conductividad de los electrodos de tungsteno puro es de aproximadamente el 30% IACS (Estándar Internacional de Cobre Recocido). El método de cuatro sondas se usa comúnmente para medir la resistividad del electrodo y luego calcular la conductividad.

El método de cuatro sondas utiliza cuatro sondas para hacer contacto con la superficie de la muestra, con una corriente constante aplicada a las dos sondas exteriores y dos sondas internas para medir el voltaje. La resistividad se calcula como  $\rho = (V/I) \times S/L$ , donde V es el voltaje, I es la corriente, S es el área de la sección transversal de la muestra y L es el espaciado de la sonda. La conductividad es el recíproco de la resistividad, que se convierte en porcentaje IACS.

El equipo de prueba incluye un probador de cuatro sondas, una fuente de corriente constante y un microvoltímetro para garantizar que las sondas estén en buen contacto y que la superficie de la muestra esté limpia. Las ventajas del método de cuatro sondas son la alta precisión, el amplio rango de medición y la idoneidad para materiales altamente conductores. La desventaja es que se requiere que la forma de la muestra y la calidad de la superficie sean altas. Los probadores de conductividad modernos admiten la adquisición y el análisis automatizados de datos, lo que los hace adecuados para inspecciones de lotes.

## 7.3 Análisis de la microestructura del electrodo de tungsteno puro

El análisis de microestructura se utiliza para evaluar el tamaño de grano, los defectos y la uniformidad de la microestructura de los electrodos de tungsteno puro, lo que refleja la calidad y la estabilidad del rendimiento de sus procesos de producción. Los métodos comunes incluyen microscopía óptica, análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis de tamaño de grano.

### 7.3.1 Observación con microscopía óptica

La microscopía óptica se utiliza para observar la estructura del grano, los poros y las inclusiones de la sección transversal del electrodo con aumentos de 50-1000x. El proceso de prueba incluye la preparación de la muestra, la observación y la documentación. Primero, la muestra de electrodo se corta, se monta, se pule y se corroe con un agente corrosivo como una mezcla de hidróxido de sodio y ferricianuro de potasio para revelar los límites del grano. Posteriormente, se registró la morfología del grano, la distribución de defectos y la uniformidad de los tejidos bajo un microscopio óptico.

Las ventajas de los microscopios ópticos son su bajo costo de equipo, operación simple e idoneidad para una inspección rápida. La desventaja es que la resolución es limitada (alrededor de 0,2  $\mu\text{m}$ ), lo

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

que dificulta la observación de defectos a nanoescala. Los microscopios ópticos modernos están equipados con software de análisis de imágenes que identifica automáticamente los límites de grano y genera informes de tejidos.

### 7.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) escanea la superficie de una muestra con un haz de electrones para producir imágenes de alta resolución (hasta la resolución nanométrica) que se pueden utilizar para analizar la topografía microscópica, las características de fractura y los defectos del electrodo. Los SEM suelen estar equipados con un espectrómetro de dispersión de energía (EDS) para el análisis de la composición química local.

Para las pruebas, las muestras se cortan, pulen y recubren con una capa conductora como el oro o el carbono para mejorar la conductividad eléctrica. SEM genera señales como electrones secundarios y electrones retrodispersados a través de la interacción del haz de electrones con la muestra, y genera imágenes de topografía de superficie o distribución de componentes. SEM puede detectar microfisuras, porosidad y distribución de impurezas en la superficie del electrodo para evaluar la capacidad de control de defectos del proceso de producción.

Las ventajas del SEM son la alta resolución, las imágenes claras y el análisis en profundidad de las microestructuras. Las desventajas son el uso excesivo del equipo, la compleja preparación de muestras y la necesidad de operar en un alto vacío. El SEM moderno admite la reconstrucción 3D y el escaneo automatizado, lo que mejora la eficiencia del análisis.

### 7.3.3 Análisis granulométrico

El tamaño de grano es un parámetro importante que afecta las propiedades mecánicas y el rendimiento de soldadura del electrodo, y los granos finos y uniformes pueden mejorar la resistencia y la tenacidad. El análisis del tamaño de grano generalmente se realiza junto con la microscopía óptica o SEM, donde el tamaño promedio de grano se mide mediante un software de análisis de imágenes.

Los métodos de detección incluyen el método de intercepción lineal y el método de área. El método de intersección lineal calcula el tamaño medio del grano dibujando líneas rectas aleatorias en la imagen microscópica y contando el número de puntos de intersección del límite del grano. El método del área cuenta la distribución del tamaño midiendo el área de cada grano. Las normas como ASTM E112 proporcionan especificaciones para las clasificaciones de tamaño de grano, y los electrodos de tungsteno puro suelen tener un tamaño de grano de 10-50  $\mu\text{m}$ .

Las ventajas del análisis granulométrico son cuantitativas, intuitivas y un reflejo directo de la calidad de los procesos de sinterización y tratamiento térmico. La desventaja es que se requiere una gran cantidad de datos estadísticos para garantizar la representatividad. El software de análisis de imágenes automatizado permite un procesamiento rápido de imágenes microscópicas, lo que mejora la eficiencia y la precisión del análisis.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## 7.4 Prueba de rendimiento de soldadura del electrodo de tungsteno puro

La prueba de soldabilidad evalúa el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura real, incluido el rendimiento de iniciación del arco, la estabilidad del arco y la tasa de consumo del electrodo. Estas pruebas se llevan a cabo en condiciones de soldadura estándar y simulan escenarios de aplicación del mundo real.

### 7.4.1 Ensayo de rendimiento del arco

El rendimiento de iniciación del arco refleja la dificultad del electrodo para iniciar el arco, y el electrodo de tungsteno puro es más difícil de arquear en la soldadura de CC (CC) debido a su alto trabajo electrónico (alrededor de 4,52 eV), pero funciona mejor en la soldadura de CA (CA). Los métodos de prueba incluyen:

Prueba de soldadura estándar: Probada en corriente estándar (50-150 A), protección de argón (8-15 L/min) y sustrato de aleación de aluminio utilizando equipos de soldadura TIG. Cuanto menor sea el voltaje del arco y menor sea el tiempo, mejor será el rendimiento.

Prueba de iniciación de arco de alta frecuencia: El dispositivo de iniciación de arco de alta frecuencia se utiliza para ayudar en el inicio del arco para evaluar la velocidad de respuesta del electrodo bajo diferentes corrientes. La prueba debe repetirse varias veces, promediadas para reducir los errores.

El equipo de inspección incluye una soldadora TIG, un voltímetro y un temporizador para garantizar que el electrodo se muele en forma semiesférica (soldadura de CA) o cónica (soldadura de CC). La ventaja de las pruebas de rendimiento de arranque de arco es que son intuitivas y cercanas a la aplicación real, y la desventaja es que los resultados están muy influenciados por el equipo y el operador. El sistema de prueba automatizado puede registrar los parámetros de inicio del arco a través del sensor, lo que mejora la confiabilidad de los datos.

### 7.4.2 Ensayo de estabilidad del arco

La estabilidad del arco refleja la continuidad y uniformidad del arco durante el proceso de soldadura, lo que afecta directamente a la calidad de la soldadura. El electrodo de tungsteno puro tiene buena estabilidad de arco en la soldadura de CA, pero es propenso a la deriva en la soldadura de CC. Los métodos de prueba incluyen:

Análisis de fluctuaciones de voltaje: Registro de fluctuaciones de voltaje de arco en condiciones de soldadura estándar (100-200 A, protección de argón). Cuanto menor sea la fluctuación de voltaje, más estable será el arco. El equipo de prueba incluye osciloscopios y sensores de voltaje.

Observación visual: Se registra la forma del arco con una cámara de alta velocidad y se analiza la longitud, la forma y la deriva del arco. El arco de estabilización debe ser cónico sin saltos ni interrupciones significativas.

Evaluación de la calidad de la soldadura: Las placas de prueba de soldadura se utilizan para verificar la uniformidad de la soldadura, la penetración y los defectos de la superficie. Un arco estable

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

produce una soldadura suave y sin porosidad.

Las pruebas de estabilidad del arco requieren el control de parámetros como el sustrato, la corriente y el flujo de gas para garantizar la comparabilidad de los resultados. Los sistemas de prueba modernos proporcionan evaluaciones cuantitativas mediante el análisis de imágenes de arco y datos de voltaje a través de inteligencia artificial.

#### **7.4.3 Prueba de tasa de consumo de electrodos**

La tasa de consumo del electrodo refleja la tasa de pérdida del electrodo en la soldadura, y el electrodo de tungsteno puro tiene una mayor tasa de consumo de trabajo debido al alto escape de electrones, especialmente a alta corriente (>200 A). Los métodos de prueba incluyen:

Medición de la pérdida de longitud: Medición de la reducción de la longitud del electrodo en condiciones de soldadura estándar (200 A, soldadura de CA, 30 minutos). La tasa de consumo se expresa en mm/h y suele ser de 0,1-0,5 mm/h.

Medición de la pérdida de masa: La pérdida de masa por unidad de tiempo se calcula midiendo la diferencia de masa entre los electrodos antes y después de la soldadura con una balanza de alta precisión. El método de pérdida de masa es más preciso y adecuado para pruebas de laboratorio.

Análisis de morfología final: Observar la morfología del electrodo después de soldar a través de un microscopio para evaluar el grado de pérdida por combustión y volatilización. Una morfología estable de la punta, como una forma semiesférica, indica una tasa de consumo baja.

La prueba de tasa de consumo de electrodos requiere controlar el tiempo de soldadura, la corriente y el ángulo del electrodo para garantizar resultados consistentes. El sistema de prueba automatizado puede registrar cambios en la longitud y la calidad del electrodo en tiempo real para mejorar la eficiencia de la inspección.

#### **7.5 Pruebas ambientales y de seguridad de electrodos de tungsteno puro**

Las pruebas ambientales y de seguridad evalúan la protección ambiental y la seguridad de los electrodos de tungsteno puro en el proceso de producción y uso, con un enfoque en las pruebas de radiactividad y las pruebas de emisiones de polvo y escape.

##### **7.5.1 Detección de radiactividad (comparación del electrodo de torio-tungsteno)**

Los electrodos de tungsteno puro no son radiactivos, lo que supone una ventaja significativa sobre los electrodos de tungsteno toriado (que contienen óxido de torio, ThO<sub>2</sub>). Las pruebas de radiactividad se utilizan para verificar la seguridad de los electrodos de tungsteno puro y compararlos con los electrodos de tungsteno toriado. Los ensayos incluyen:

Detección de rayos gamma: La tasa de dosis de rayos gamma ( $\mu\text{Sv/h}$ ) se registra midiendo el nivel de radiactividad del electrodo utilizando un contador Geiger o un detector de centelleo. La tasa de

#### **Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**

dosís de los electrodos de tungsteno puro debe estar cerca del nivel de radiaci3n de fondo (alrededor de 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ ), mientras que los electrodos de torio-tungsteno pueden alcanzar 1-10  $\mu\text{Sv/h}$ .

Análisis de radionúclidos: Los radionúclidos (por ejemplo, Th-232, U-238) en los electrodos se analizan mediante un detector de germanio de alta pureza (HPGe) para garantizar que no haya impurezas radiactivas. La detecci3n debe realizarse en una habitaci3n blindada para reducir la interferencia de fondo.

La detecci3n de radiactividad tiene la ventaja de ser rápida y fiable, lo que garantiza que los electrodos cumplan con las normas de seguridad (por ejemplo, ISO 6848). La desventaja es que el equipo es caro y debe ser operado profesionalmente. La naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro los hace aún más ventajosos en escenarios con altos requisitos ambientales y de seguridad.

### 7.5.2 Detecci3n de polvo y emisiones de escape

Los procesos de esmerilado, pulido y sinterizaci3n en la producci3n de electrodos de tungsteno puro pueden generar polvo de tungsteno y gases de escape (por ejemplo, vapor de óxido de tungsteno), y los niveles de emisi3n deben probarse para cumplir con las regulaciones ambientales. Los ensayos incluyen:

Detecci3n de la concentraci3n de polvo: La concentraci3n de polvo en la planta de producci3n se mide utilizando un medidor de polvo láser o un método gravimétrico para garantizar que esté por debajo del límite de exposici3n ocupacional (por ejemplo, 4  $\text{mg/m}^3$  en la norma china). El punto de muestreo debe cubrir las áreas de esmerilado y pulido.

Análisis de gases de escape: La composici3n de los gases de escape emitidos por el horno de sinterizaci3n se detecta mediante un analizador de gases (por ejemplo, un espectrómetro infrarrojo) para analizar la concentraci3n de óxido de tungsteno, óxidos de nitr3geno y compuestos orgánicos volátiles (COV). Los gases de escape deben descargarse después de la eliminaci3n del polvo y el tratamiento de adsorci3n.

Pruebas de aguas residuales: El tungsteno y otros metales pesados en las aguas residuales de los procesos de limpieza y purificaci3n se analizan mediante ICP-OES o espectrofotometría para garantizar el cumplimiento de las normas de descarga (por ejemplo, China GB 25466-2010).

La detecci3n de polvo y gases de escape debe llevarse a cabo de forma regular, y debe estar equipado con un sistema de seguimiento en línea para registrar los datos de emisiones en tiempo real. Los equipos medioambientales modernos, como los filtros HEPA y los depuradores húmedos, pueden reducir significativamente las emisiones y cumplir con los requisitos de fabricaci3n ecológica.

## 7.6 Calibraci3n y estandarizaci3n de equipos de prueba de electrodos de tungsteno puro

La calibraci3n y estandarizaci3n de los equipos de prueba es la clave para garantizar la precisi3n y

#### Declaraci3n de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

la comparabilidad de los resultados de la inspección, lo que afecta directamente la confiabilidad del control de calidad.

### 7.6.1 Métodos de calibración de equipos

La calibración de los equipos de ensayo se lleva a cabo con regularidad y de acuerdo con las normas internacionales o nacionales (e.g. ISO/IEC 17025). Los métodos de calibración comunes incluyen:

Calibración ICP-OES: Calibre la sensibilidad del instrumento y el rango de linealidad trazando una curva estándar utilizando una solución estándar de múltiples elementos (que contiene concentraciones conocidas de tungsteno, hierro, níquel, etc.). La calibración se realiza semanalmente y se registran los factores de calibración.

Calibración XRF: Calibre la intensidad de fluorescencia en función de la concentración elemental utilizando una muestra estándar, como un bloque de tungsteno de alta pureza. La calibración se realiza mensualmente para garantizar pruebas consistentes.

Calibración del durómetro: El tamaño y la carga de la indentación se calibran utilizando bloques de dureza estándar (por ejemplo, HV 400) con un error del  $\pm 2\%$ . La calibración se realiza trimestralmente.

Calibración del microscopio: Utilice una escala estándar para calibrar el aumento y la resolución de la imagen con un error del  $\pm 1\%$ . La calibración se realiza anualmente.

La calibración la realiza un profesional y se registran la fecha de calibración, los parámetros y los resultados. El sistema de calibración automatizado puede mejorar la eficiencia de la calibración mediante el control de la inyección y el análisis de datos de muestras estándar a través del software.

### 7.6.2 Normas internacionales de ensayo

Los electrodos de tungsteno se prueban de acuerdo con las normas internacionales para garantizar la comparabilidad global de los resultados. Las normas pertinentes incluyen:

ISO 6848:2015: especifica los requisitos para probar la composición química y las propiedades de los electrodos de tungsteno, y recomienda el uso de ICP-OES o XRF para la detección de componentes y el análisis microscópico de tejidos.

AWS A5.12:2009: Requiere verificar la composición química y la calidad de la superficie de los electrodos, recomendando métodos no destructivos como XRF para un análisis rápido.

ASTM E112: Proporciona un método estándar para la medición del tamaño de grano para el análisis de microestructuras.

ISO 14001: Proporciona directrices de gestión ambiental para la detección de polvo y gases de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

escape, con énfasis en el control y monitoreo de emisiones.

Estas normas proporcionan una base para la estandarización de los métodos de detección. En el futuro, los estándares internacionales de prueba pueden integrar aún más la inteligencia artificial y las tecnologías de big data para desarrollar especificaciones de prueba más precisas.



**electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD**

## **Capítulo 8 Análisis de las ventajas y desventajas del electrodo de tungsteno puro**

Como material tradicional para la soldadura por arco de argón y tungsteno (soldadura TIG), el electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) ocupa una posición importante en la industria de la soldadura debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. Sin embargo, su rango de aplicación y rendimiento son limitados, especialmente en comparación con los electrodos de tungsteno dopados (como los electrodos de tungsteno de cerio y lantano). Este capítulo analizará sistemáticamente las ventajas y desventajas de los electrodos de tungsteno puro y discutirá la dirección de su mejora, con el fin de proporcionar orientación para la producción y la aplicación.

### **8.1 Ventajas del electrodo de tungsteno puro**

Los electrodos de tungsteno puro tienen un valor insustituible en escenarios específicos debido a sus ventajas de costo, estabilidad a alta temperatura y adecuados para soldadura de CA. A continuación se detallan sus ventajas desde tres aspectos.

#### **8.1.1 Bajo costo**

Una de las principales ventajas de los electrodos de tungsteno puro es su costo de producción relativamente bajo, lo que los hace ideales para aplicaciones de soldadura con altos requisitos económicos. El electrodo de tungsteno puro está hecho de tungsteno de alta pureza ( $\geq 99,5\%$ ) y no

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

está dopado con óxidos de tierras raras (como óxido de cerio, óxido de lantano u óxido de torio), lo que evita el uso de aditivos costosos y formulaciones complejas. Como metal raro con abundantes reservas en el mundo (China representa alrededor del 50% de las reservas mundiales), el tungsteno tiene una cadena de suministro de materias primas estable y bajas fluctuaciones de precios. Además, el proceso de producción de electrodos de tungsteno puro (como la pulvimetalurgia y el procesamiento a presión) ha sido muy maduro, el equipo es muy versátil y la producción a gran escala reduce aún más el costo.

En comparación con los electrodos dopados, la producción de electrodos de tungsteno puro no requiere procesos adicionales de purificación y dopaje de tierras raras, lo que reduce significativamente el consumo de energía y los costos de mano de obra. Por ejemplo, los electrodos de tungsteno y cerio requieren un control preciso de la distribución uniforme del óxido de cerio, lo que agrega complejidad a la sinterización y al control de calidad, mientras que el proceso de producción de electrodos de tungsteno puro es mucho más simple. La ventaja de costo hace que los electrodos de tungsteno puro se utilicen ampliamente en industrias sensibles a los costos, como la construcción, la construcción naval y el mecanizado en general. Además, la naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro evita los requisitos de almacenamiento y eliminación especiales, lo que reduce aún más el costo de uso y está en línea con la tendencia de la fabricación ecológica. En la práctica, el bajo costo de los electrodos de tungsteno los hace adecuados para tareas de soldadura de alto volumen, como muros cortina de aluminio, piezas de automóviles y recipientes a presión. Aunque su rendimiento no es tan bueno como el de los electrodos dopados en algunos aspectos, los electrodos de tungsteno puro proporcionan una opción rentable para escenarios de soldadura de CA con requisitos de calidad moderados.

### 8.1.2 Estabilidad a altas temperaturas

Debido a su punto de fusión extremadamente alto (3422 °C) y su excelente estabilidad a altas temperaturas, los electrodos de tungsteno puro pueden mantener la integridad estructural y el rendimiento estable en entornos de soldadura hostiles. El tungsteno tiene el punto de fusión más alto de todos los metales, lo que permite que los electrodos de tungsteno puro resistan el choque térmico a altas temperaturas de arco (alrededor de 6000-7000 °C), lo que reduce el riesgo de fusión, combustión o deformación. Esta característica garantiza que el electrodo mantenga una forma final estable incluso a altas corrientes (100-300 A) o durante largos períodos de soldadura continua, lo que resulta en una larga vida útil.

En la soldadura de CA, los electrodos de tungsteno puro generalmente forman extremos hemisféricos, que ayudan a distribuir uniformemente la energía del arco, reducir el sobrecalentamiento local y mejorar la calidad de la soldadura. Su baja presión de vapor (cerca de 0 Pa a 3000 °C) reduce aún más la evaporación del material a altas temperaturas, manteniendo la estabilidad dimensional y la consistencia del arco del electrodo. Además, la excelente conductividad térmica del electrodo de tungsteno puro (aprox. 173 W/m·K) le permite disipar rápidamente el calor del arco y evitar el ablandamiento o el agrietamiento de los extremos causados por el sobrecalentamiento.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La estabilidad a altas temperaturas de los electrodos de tungsteno puro los hace excelentes para soldar metales ligeros (por ejemplo, aluminio, magnesio) y sus aleaciones, especialmente en las industrias aeroespacial, automotriz y electrónica. La alta conductividad térmica y las propiedades de la película de óxido de las aleaciones de aluminio requieren que el electrodo permanezca estable a altas temperaturas, y el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro puede cumplir con estos requisitos. Además, su estabilidad química lo hace menos susceptible a reaccionar con el medio ambiente bajo la protección de gases inertes como el argón o el helio, asegurando la pureza de la soldadura.

### 8.1.3 Adecuado para soldadura de CA

El excelente rendimiento del electrodo de tungsteno puro en la soldadura de CA (CA) es su ventaja de aplicación más importante, especialmente adecuada para soldar metales ligeros con películas de óxido como el aluminio, el magnesio y sus aleaciones. La soldadura de CA realiza el equilibrio dinámico del arco a través del medio ciclo alternado positivo y negativo de corriente alterna. El electrodo de tungsteno puro emite electrones durante el semiciclo positivo (el electrodo es el cátodo), generando un arco de alta temperatura; Durante el semiciclo negativo (la pieza de trabajo es el cátodo), el arco produce un efecto de "limpieza catódica" en la película de óxido (como  $Al_2O_3$ , punto de fusión de aproximadamente 2050 °C) en la superficie de la pieza de trabajo, eliminando efectivamente la capa de óxido y formando una soldadura limpia.

Los electrodos de tungsteno puro forman extremos hemisféricos estables en la soldadura de CA, lo que optimiza la distribución del arco y la transferencia de energía, lo que reduce el riesgo de deriva o interrupción del arco. Su alto punto de fusión y conductividad térmica aseguran que el electrodo permanezca estable durante el ciclo térmico de corrientes alternas, lo que lo hace adecuado para condiciones de soldadura de alta frecuencia o alta corriente. Además, la naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro los hace más ventajosos en industrias con altos requisitos de seguridad (por ejemplo, equipos de procesamiento de alimentos, fabricación de dispositivos médicos) y cumple más con las regulaciones ambientales que los electrodos de tungsteno toriado (que contienen óxido de torio radiactivo).

Las aplicaciones de soldadura de CA para electrodos de tungsteno puro cubren las industrias de la construcción, marina, aeroespacial y automotriz. Por ejemplo, en la soldadura de estructuras de aluminio para barcos, los electrodos de tungsteno puro proporcionan soldaduras suaves y sin defectos que cumplen con los requisitos de resistencia a la corrosión y resistencia. En el sector aeroespacial, la soldadura de precisión de aleaciones de aluminio y magnesio se basa en el arco estable de electrodos de tungsteno puro, lo que garantiza una alta confiabilidad de los componentes. En conclusión, la experiencia de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CA los convierte en el material de elección para la soldadura de metales ligeros.

## 8.2 Desventajas del electrodo de tungsteno puro

A pesar de las ventajas significativas de los electrodos de tungsteno puro, sus limitaciones de rendimiento limitan su aplicación en ciertos escenarios de soldadura, especialmente en soldadura de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CC y condiciones de alta temperatura y alta carga. A continuación se analizan sus desventajas desde tres aspectos.

### 8.2.1 Mal rendimiento de soldadura de CC

El rendimiento de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CC (CC) es pobre, principalmente debido a su alto trabajo electrónico (alrededor de 4,52 eV), lo que dificulta el inicio del arco y la inestabilidad del arco. En la conexión positiva de CC (DCSP), el electrodo necesita emitir una gran cantidad de electrones como cátodo, y el alto trabajo de electrones requiere un voltaje de arco más alto, que es propenso a no formar arcos ni saltos de arco. En polaridad inversa de CC (DCRP), el electrodo actúa como un ánodo bajo una carga térmica más alta, lo que puede provocar sobrecalentamiento, combustión o deformación final.

Por el contrario, los electrodos dopados con óxidos de tierras raras (por ejemplo, los electrodos de cerio-tungsteno, tienen alrededor de 2,7-3,0 eV; Electrodo de lantano y tungsteno, aprox. 2.8-3.2 eV) tiene un voltaje de arranque de arco más bajo y un arco más estable en la soldadura de CC, y se usa ampliamente en la soldadura de acero inoxidable, acero al carbono y aleaciones de níquel. Debido a las limitaciones de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CC, sus aplicaciones se limitan principalmente a escenarios de baja demanda, como la reparación temporal o la soldadura de baja corriente, mientras que los electrodos dopados se utilizan principalmente en la soldadura de CC de alta precisión o alta eficiencia.

Para aliviar esta deficiencia, el rendimiento de inicio del arco se puede mejorar mediante un dispositivo de impacto de arco de alta frecuencia u optimizando el ángulo en el extremo del electrodo (por ejemplo, un cono), pero el efecto es limitado. Además, la inestabilidad del arco en la soldadura de CC puede provocar soldaduras desiguales o un aumento de los defectos, lo que limita la competitividad de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de alto rendimiento.

### 8.2.2 Alta tasa de consumo de electrodos

Los electrodos de tungsteno tienen una alta tasa de consumo de electrodos, especialmente en altas corrientes (>200 A) o soldadura continua a largo plazo, debido al alto escape de trabajo de electrones, lo que conduce a una temperatura final alta, lo que acelera la volatilización y la pérdida por combustión del material. El consumo se manifiesta por el acortamiento gradual de la longitud del electrodo y el cambio de la morfología del extremo, como de forma hemisférica a irregular, lo que afecta la estabilidad del arco y la calidad de la soldadura.

En la soldadura de CA, la formación de extremos semiesféricos ralentiza parcialmente el consumo, pero la tasa de consumo sigue siendo alta a altas frecuencias o corrientes inestables. En la soldadura de CC, la tasa de consumo es aún más significativa, especialmente en la conexión directa de CC (DCSP), donde el funcionamiento a alta temperatura de los electrodos da como resultado una rápida pérdida de material. Por el contrario, los electrodos dopados (por ejemplo, los electrodos de lantano, tungsteno) suelen tener tasas de consumo más bajas que los electrodos de tungsteno puro debido a un menor trabajo de escape de electrones y una morfología final más estable.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La alta tasa de consumo aumenta la frecuencia de los cambios de electrodos y los costos operativos, lo que puede provocar interrupciones en la producción, especialmente en la soldadura automatizada. Para prolongar la vida útil del electrodo, los extremos deben afilarse regularmente para mantener la forma adecuada y se deben optimizar los parámetros de soldadura (por ejemplo, reducción de la corriente, mayor protección contra el gas). Sin embargo, el rectificado frecuente aumenta los costos de mano de obra y tiempo, lo que limita la aplicación de electrodos de tungsteno puro en soldadura de alta carga.

### 8.2.3 Dificultad en el arco y arco inestable

La difícil iniciación del arco y la inestabilidad del arco son las principales desventajas del electrodo de tungsteno puro, que están estrechamente relacionadas con su alto trabajo de escape de electrones. En la soldadura de CC, los altos voltajes de arco y la emisión errática de electrones dificultan el inicio o mantenimiento de un arco, especialmente a bajas corrientes (<50 A) o altas frecuencias. En la soldadura de CA, el efecto alterno de los semiciclos positivos y negativos de corriente alterna puede aliviar parcialmente la dificultad de la formación de arcos, pero aún se requiere un voltaje de arco más alto.

La inestabilidad del arco se manifiesta como deriva, salto o interrupción del arco, lo que afecta la uniformidad y la calidad de la soldadura. La contaminación de la superficie (p. ej., óxidos, aceites) o la morfología final incorrecta (p. ej., desgaste excesivo) pueden exacerbar aún más la inestabilidad, lo que requiere una limpieza y lijado regulares del electrodo. Además, los electrodos de tungsteno puro tienen altos requisitos para los equipos de soldadura, que deben estar equipados con un dispositivo de impacto de arco de alta frecuencia o una fuente de alimentación estable para mejorar el rendimiento de inicio del arco.

En comparación con los electrodos dopados, los electrodos de tungsteno puro tienen poca estabilidad al arco, especialmente en la soldadura de CC. Los electrodos de cerio-tungsteno y lantano y lantano reducen el trabajo de electrones a través del dopaje de óxidos de tierras raras, lo que mejora significativamente el rendimiento de inicio del arco y la estabilidad del arco, y es adecuado para una variedad de escenarios de soldadura. Esta deficiencia de los electrodos de tungsteno puro limita su aplicación en soldaduras de alta precisión y alta eficiencia, lo que debe compensarse mediante la optimización del proceso o la mejora del equipo.

## 8.3 Dirección de mejora del electrodo de tungsteno puro

Con el fin de superar las deficiencias de los electrodos de tungsteno puro y mejorar su competitividad, los investigadores y las empresas están explorando vías de mejora desde tres direcciones: optimización de procesos, investigación de aleaciones y desarrollo de nuevos materiales de electrodos. Estas mejoras tienen como objetivo mejorar el rendimiento de soldadura de los electrodos, reducir la tasa de consumo y ampliar la gama de aplicaciones.

### 8.3.1 Optimización de procesos

La optimización de procesos es una forma directa de mejorar el rendimiento de los electrodos de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

tungsteno puro, centrándose en la mejora del proceso de producción y la optimización de los parámetros de soldadura. Desde el punto de vista de la producción, la calidad de los electrodos puede mejorarse mediante:

Control de alta pureza: la pureza del polvo de tungsteno se incrementa al 99,99% mediante el uso de tecnologías de purificación avanzadas, como el intercambio iónico y la extracción con solventes, y se reduce la influencia de las impurezas en el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco. Optimice los procesos de reducción y sinterización, reduzca el contenido de oxígeno (por ejemplo,  $\leq 0,01\%$ ) y mejore la conductividad y la resistencia a altas temperaturas del electrodo.

Refinamiento del grano: El crecimiento del grano se controla mediante técnicas de sinterización rápida (por ejemplo, sinterización por plasma de descarga, SPS) o la adición de inhibidores de trazas (por ejemplo, alúmina) para obtener una estructura de grano fina y uniforme (10-20  $\mu\text{m}$ ). El refinamiento del grano mejora la dureza y tenacidad del electrodo y reduce la tasa de consumo a altas temperaturas.

Mejora de la calidad de la superficie: mejore los procesos de pulido y limpieza, reduzca la rugosidad de la superficie y reduzca la interferencia de los defectos de la superficie en la estabilidad del arco. Se utiliza un equipo de pulido automático para garantizar la consistencia de la superficie y mejorar el rendimiento de soldadura del electrodo.

En aplicaciones de soldadura, el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro se puede mejorar optimizando los parámetros y el equipo. Por ejemplo, la forma de onda actual (por ejemplo, onda cuadrada CA) se puede ajustar para reducir el voltaje de arco y el caudal de argón o gas protector de helio (10-20 L / min) se puede aumentar para mejorar la estabilidad del arco. Además, el dispositivo de iniciación de arco de alta frecuencia y la máquina de soldadura TIG avanzada pueden mejorar significativamente la dificultad del arco eléctrico, lo cual es adecuado para escenarios de soldadura de CC.

Las ventajas de la optimización de procesos son el bajo costo, la tecnología probada y la rápida implementación además de la producción existente. La desventaja es que el rango de mejora es limitado y es difícil superar por completo la limitación fundamental del resultado del trabajo con altos electrones.

### 8.3.2 Estudios de aleación

Los estudios de aleación mejoran las propiedades eléctricas y mecánicas del tungsteno puro mediante la adición de oligoelementos a su matriz, al tiempo que conservan las ventajas de costo y las propiedades no radiactivas. El objetivo de la aleación es reducir el trabajo de evolución de electrones, mejorar la estabilidad del arco y reducir la tasa de consumo, y las direcciones de investigación comunes incluyen:

Dopaje de tierras raras: Los óxidos de tierras raras (por ejemplo, óxido de lantano, óxido de cerio)

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

se añaden al tungsteno puro con un contenido bajo (<0,5%) para reducir el trabajo de electrones (a 4,0-4,2 eV) y mejorar el rendimiento de inicio del arco y la estabilidad del arco. El dopaje de trazas conserva la ventaja de costo del tungsteno puro al tiempo que mejora el rendimiento de la soldadura de CC.

Dopaje de elementos de tierras no raras: Explore la adición de óxidos de tierras no raras como el zirconio ( $ZrO_2$ ) o el óxido de itrio ( $Y_2O_3$ ) para mejorar la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia del electrodo, y reducir la tasa de consumo. Estos elementos no son radiactivos y cumplen con los requisitos ambientales.

Dopaje de compuestos: Combine una variedad de óxidos (como óxido de lantano + zirconio) para el dopaje de compuestos para optimizar el rendimiento integral del electrodo. El dopaje compuesto equilibra el rendimiento de inicio del arco, la estabilidad y la durabilidad del arco, lo que lo hace adecuado para la soldadura de alta carga.

Los estudios de aleación deben controlar con precisión la distribución y el contenido de los elementos dopados para evitar fluctuaciones de rendimiento causadas por un dopaje no homogéneo. Las técnicas de producción modernas (por ejemplo, dopaje con plasma, deposición química de vapor) permiten un dopaje altamente homogéneo y una mejor calidad de los electrodos. Sin embargo, la aleación puede aumentar los costos de producción y la complejidad del proceso, lo que requiere un compromiso entre las ganancias de rendimiento y la economía.

### 8.3.3 Desarrollo de nuevos materiales de electrodos

El desarrollo de nuevos materiales para electrodos tiene como objetivo superar fundamentalmente las limitaciones de los electrodos de tungsteno puro y explorar materiales con un menor trabajo de escape de electrones, una mayor durabilidad y una aplicabilidad más amplia. Sus intereses de investigación incluyen:

Electrodo de tungsteno nanocristalino: El polvo de nano-tungsteno (tamaño de partícula < 100 nm) se utiliza para preparar electrodos, y la dureza, tenacidad y estabilidad del arco se mejoran mediante una estructura de grano ultrafino. El trabajo electrónico del electrodo de tungsteno nanocristalino es ligeramente menor que el del electrodo de tungsteno tradicional y se mejora el rendimiento de iniciación del arco. Las técnicas de sinterización rápida, como SPS, son la clave para la realización de electrodos nanocristalinos.

Compuestos de matriz de tungsteno: El desarrollo de electrodos compuestos de tungsteno y materiales altamente conductores (como el cobre y el grafeno) combinado con el alto punto de fusión del tungsteno y la excelente conductividad de los materiales compuestos (>50% IACS) reduce significativamente el voltaje de arco y el consumo de electrodos. Los materiales compuestos deben abordar los desafíos de la unión interfacial y la estabilidad a altas temperaturas.

Nuevos electrodos no radiactivos: Explorar materiales alternativos distintos del tungsteno, como aleaciones a base de molibdeno o hafnio, como electrodos no fundibles con bajo trabajo de escape

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de electrones. Estos materiales deben tener un alto punto de fusión (>2000 °C) y estabilidad química, sin dejar de ser de bajo costo y respetuosos con el medio ambiente.

La ventaja del desarrollo de nuevos materiales es que existe un gran potencial para mejorar significativamente el rendimiento de los electrodos y ampliar el campo de aplicación, como la fabricación de semiconductores, los equipos de fusión nuclear y la soldadura de materiales de ultra alta resistencia. Las desventajas son que el ciclo de investigación y desarrollo es largo, el costo es alto y la promoción de nuevos materiales debe pasar por una estricta certificación de la industria y verificación del mercado. En el futuro, el desarrollo de nuevos materiales de electrodos promoverá la innovación de la tecnología de soldadura, y es necesario acelerar la implementación de la tecnología en combinación con la cooperación entre la industria, la universidad y la investigación.



**Electrodo de tungsteno puro con punta afilada**

## Capítulo 9 Tendencia de mercado y desarrollo del electrodo de tungsteno puro

Como consumible importante para la soldadura por arco de argón y tungsteno (soldadura TIG), el electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) ocupa una posición importante en la industria mundial de la soldadura. Su desarrollo en el mercado se ve afectado por múltiples factores, como el suministro de materias primas, la tecnología de producción, los requisitos de protección del medio ambiente y la competencia internacional. Este capítulo analizará la descripción general del mercado global, la situación actual del mercado chino, la tendencia de desarrollo tecnológico y los desafíos que enfrenta el electrodo de tungsteno puro, y proporcionará una referencia completa para los profesionales e investigadores de la industria.

### 9.1 Descripción general del mercado mundial de electrodos de tungsteno

El mercado mundial de electrodos de tungsteno puro está estrechamente relacionado con el desarrollo de la industria de la soldadura, que es ampliamente utilizada en la industria aeroespacial, la fabricación de automóviles, la construcción naval y la construcción. La siguiente es una revisión del estado actual del mercado global en términos de los principales países productores y el tamaño y la demanda del mercado.

#### 9.1.1 Principales países productores

La producción mundial de electrodos de tungsteno puro se concentra en países con abundantes recursos de tungsteno y potencias industriales tecnológicamente avanzadas, entre los que se encuentran China, Estados Unidos, Alemania, Japón y Rusia.

China: Como el mayor recurso de tungsteno del mundo (que representa alrededor del 50% de las reservas mundiales), China domina la producción de electrodos de tungsteno puro. Hunan, Jiangxi y Henan tienen abundantes recursos de mineral de tungsteno, formando una cadena industrial completa desde la extracción de mineral de tungsteno hasta la producción de electrodos.

Estados Unidos: Estados Unidos es un importante productor de electrodos de tungsteno puro, con tecnología de producción avanzada y estrictos estándares de calidad. La empresa se centra en electrodos de tungsteno de alto rendimiento, que se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial y nuclear. El mercado estadounidense está dominado por aplicaciones de alta gama, que se centran en la promoción de electrodos no radiactivos, como los electrodos de tungsteno puro y cerio y tungsteno.

Alemania: Alemania es conocida por su fabricación de precisión, produciendo electrodos de tungsteno puro de alta calidad para las industrias automotriz, aeroespacial y de ingeniería mecánica. La empresa utiliza tecnologías avanzadas de pulvimetalurgia y tratamiento de superficies para exportar a Europa y al mundo de acuerdo con la norma DIN EN ISO 6848.

Japón: La producción de electrodos de tungsteno en Japón es principalmente de alta precisión y miniaturizada para satisfacer las necesidades de las industrias electrónica, automotriz y de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

maquinaria de precisión. La empresa presta atención a la calidad de la superficie y al rendimiento de soldadura del electrodo, y los productos cumplen con la norma JIS Z 3233. Existe una gran demanda de electrodos de diámetro pequeño (0,5-2,0 mm) en el mercado japonés.

Rusia: Rusia tiene abundantes recursos de mineral de tungsteno y bajos costos de producción, y sus electrodos de tungsteno puro se suministran principalmente a los mercados nacionales y de Europa del Este. Las empresas tienen ventajas en la producción de electrodos de bajo costo, pero su nivel técnico y su influencia de marca son relativamente débiles.

Estos países han formado un patrón competitivo en el mercado mundial de electrodos de tungsteno puro, con China liderando el camino en términos de producción y costo, Estados Unidos, Alemania y Japón ocupando el mercado de gama alta con tecnología y servicios, y Rusia complementando el mercado de gama baja con ventajas de recursos.

### 9.1.2 Tamaño del mercado y demanda

El tamaño del mercado mundial de electrodos de tungsteno ha seguido el ritmo del crecimiento de la industria de la soldadura, impulsado por la fabricación, la construcción de infraestructuras y las industrias de nuevas energías. Según datos de la industria, el tamaño del mercado mundial de electrodos de tungsteno será de aproximadamente \$ 1.5 mil millones en 2024, de los cuales los electrodos de tungsteno puro representarán alrededor del 30% -35%, o \$ 4.5-525 millones. Se espera que el tamaño del mercado crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 3% al 5% para alcanzar los \$ 6-700 millones para 2030, impulsado por:

**Demanda aeroespacial:** La creciente demanda de soldadura de precisión de aleaciones de aluminio y magnesio en el sector aeroespacial está impulsando la aplicación de electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CA. Por ejemplo, la fabricación de aviones de Boeing y Airbus requiere soldaduras de alta fiabilidad, y los electrodos de tungsteno puro son consumibles clave.

**Desarrollo de la industria automotriz:** La industria automotriz mundial se está transformando hacia el aligeramiento y la demanda de soldadura para aleaciones de aluminio y acero inoxidable está creciendo. Los electrodos de tungsteno puro se utilizan ampliamente en la producción de piezas de automóviles (como carrocerías y carcasas de baterías), especialmente en el campo de los vehículos de nueva energía.

**Infraestructura:** La construcción de infraestructura (por ejemplo, trenes de alta velocidad, puentes, edificios) en Asia, África y América Latina ha impulsado la demanda de soldadura de piezas estructurales de aluminio, y los electrodos de tungsteno puro se ven favorecidos debido a sus ventajas de costo.

**Industria de nuevas energías:** La fabricación de células solares y equipos de energía eólica implica la deposición de películas delgadas y la unión de metales, y la demanda de electrodos de tungsteno puro como objetivos de pulverización catódica y materiales de soldadura está creciendo constantemente.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

En términos de distribución geográfica, la región de Asia-Pacífico (principalmente China, India y el sudeste asiático) representa alrededor del 50% de la cuota de mercado mundial, beneficiándose del rápido desarrollo de la fabricación y la producción de bajo costo. América del Norte y Europa representan cada una entre el 20% y el 25%, con aplicaciones de gama alta dominantes. Oriente Medio y África tiene una cuota de mercado menor (alrededor del 5%), pero el potencial de la demanda se está haciendo evidente a medida que se acelera la industrialización.

## 9.2 Análisis del mercado de electrodos de tungsteno de China

China es el mayor productor y consumidor mundial de electrodos de tungsteno puro, y su desarrollo de mercado se ve afectado por las ventajas de los recursos nacionales de tungsteno, la mejora de la fabricación y las políticas de protección del medio ambiente. A continuación se analiza el mercado chino desde dos aspectos: la capacidad de producción y la demanda del mercado y los campos de aplicación.

### 9.2.1 Capacidad de producción nacional

La capacidad de producción de electrodos de tungsteno puro de China ocupa el primer lugar en el mundo, confiando en ricos recursos de mineral de tungsteno y una cadena industrial perfecta. En 2024, la capacidad de producción anual de electrodos de tungsteno de China será de aproximadamente 25,000 toneladas, de las cuales los electrodos de tungsteno puro representarán alrededor del 40%, o 10,000 toneladas. Zhuzhou en Hunan, Ganzhou en la provincia de Jiangxi y Luoyang en la provincia de Henan son las principales bases de producción, formando una cadena industrial completa desde la minería de mineral de tungsteno, la preparación de polvo de tungsteno hasta el procesamiento de electrodos.

Las ventajas de la capacidad de producción de China son el bajo costo, la gran escala y la cadena de suministro estable. En los últimos años, las empresas nacionales han mejorado la eficiencia de la producción y la calidad del producto mediante la introducción de equipos avanzados (como hornos de sinterización al vacío en Alemania y máquinas automáticas de trefilado en Japón). Al mismo tiempo, algunas empresas han aumentado la inversión en investigación y desarrollo, han desarrollado polvo de tungsteno ultrafino y electrodos nanocristalinos, y han reducido gradualmente la brecha tecnológica con los países europeos y americanos.

Sin embargo, la capacidad de producción de China también se enfrenta a presiones medioambientales y a un exceso de capacidad. La minería y purificación de tungsteno implica un alto consumo de energía y descarga de aguas residuales, que está sujeta a los requisitos de la Ley de Protección Ambiental y la Lista Nacional de Residuos Peligrosos. El exceso de capacidad ha llevado a una feroz competencia en el mercado de gama baja, y las guerras de precios han comprimido los márgenes de beneficio, lo que ha llevado a las empresas a transformarse en mercados de gama alta.

### 9.2.2 Necesidades del mercado CLP y áreas de demanda

La demanda del mercado eléctrico puro de China es de aproximadamente 12.000 toneladas, lo que representa aproximadamente el 60% del mercado eléctrico nacional.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Construcción e infraestructura: La construcción de ferrocarriles de alta velocidad, puentes y muros cortina ha impulsado el crecimiento de la demanda de soldadura de aleación de aluminio, y la electricidad eléctrica pura se usa ampliamente en el campo de la construcción debido a su ventaja de costo. Por ejemplo, la soldadura de piezas estructurales de aluminio del ferrocarril interurbano Beijing-Xiong'an y el edificio superalto de la bahía de Shenzhen se basa en electrodos de tungsteno puro.

Fabricación de automóviles: La carcasa de la batería, la carrocería y las piezas de aleación de aluminio de los vehículos de nueva energía deben soldarse con alta precisión, y los electrodos de tungsteno puro ocupan una posición importante en la soldadura de CA. En 2024, la producción de vehículos de nueva energía de China superará los 8 millones de unidades, lo que impulsará el crecimiento de la demanda de electrodos.

Aeroespacial: COMAC (por ejemplo, el avión C919) y los programas aeroespaciales (por ejemplo, los cohetes de la serie Long March) tienen estrictos requisitos de soldadura para las aleaciones de aluminio y las aleaciones de magnesio, y los electrodos de tungsteno puro se ven favorecidos por su rendimiento estable y no radiactivo.

Ingeniería marina y en alta mar: La construcción naval y la construcción de plataformas en alta mar en áreas costeras involucran una gran cantidad de soldadura de aleación de aluminio, y los electrodos de tungsteno puro tienen una demanda estable en estos escenarios.

Electrónica y nuevas energías: En la fabricación de células solares y semiconductores, la aplicación de electrodos de tungsteno puro como objetivos de pulverización catódica y materiales de soldadura está aumentando gradualmente.

El mercado chino se caracteriza por una amplia gama de demandas, que van desde la soldadura de uso general de bajo costo hasta la soldadura de precisión de alto rendimiento. En el futuro, con la modernización de la industria manufacturera y el avance de la iniciativa "Belt and Road", se espera que el mercado de electrodos de tungsteno puro de China continúe expandiéndose a una tasa de crecimiento anual promedio del 3% al 4%, especialmente en aplicaciones de alta gama.

### **9.3 Tendencia de desarrollo de la tecnología de electrodos eléctricos puros**

El desarrollo de electrodos eléctricos puros está impulsado por la generación de energía de alta eficiencia, los requisitos ambientales y la investigación y energía de nuevos materiales, con el objetivo de mejorar el rendimiento, reducir los costos y cumplir con los requisitos reglamentarios. Se analizan los siguientes tres aspectos de las tendencias tecnológicas.

#### **9.3.1 Tecnologías para la producción eficiente de electricidad**

Las tecnologías de producción eficientes tienen como objetivo acortar los tiempos de ciclo, reducir el consumo de energía y mejorar la calidad del producto, y las principales tecnologías incluyen:

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Producción continua: desarrolle un horno de sinterización continua y un equipo automático de trefilado para lograr una producción continua desde el prensado hasta el procesamiento y acortar el ciclo de producción en un 20% -30%. Por ejemplo, el horno de sinterización continua por inducción de frecuencia media se calienta rápidamente y mejora la homogeneidad del cuerpo verde.

Fabricación inteligente: Optimice la eficiencia operativa de los equipos mediante la supervisión de los parámetros de producción con el Internet industrial de las cosas (IIoT) y sensores. El equipo inteligente de la línea de equipos de producción puede detectar la desviación de la densidad y el tamaño del cuerpo verde en tiempo real para reducir la tasa de desechos.

Tecnología de sinterización rápida: La sinterización por plasma de descarga (SPS) utiliza pulsos eléctricos para acortar el tiempo de sinterización a minutos, refinar el grano (<10 μm) y mejorar la resistencia y durabilidad del electrodo. SPS se ha puesto a prueba en la producción de electrodos de alta gama.

La aplicación de estas tecnologías promoverá la mejora de la eficiencia de la producción, reducirá los costos unitarios y mejorará la competitividad del mercado. Sin embargo, los altos costos de inversión y mantenimiento en equipos pueden limitar su promoción en las pymes.

### 9.3.2 Procesos de producción respetuosos con el medio ambiente

Los procesos respetuosos con el medio ambiente son el foco para responder a las presiones regulatorias y las necesidades de fabricación ecológica, y las tecnologías clave incluyen:

Purificación de baja energía: La tecnología de intercambio iónico y separación por membranas se utiliza para reemplazar la hidrometalurgia tradicional y reducir las emisiones de aguas residuales y gases de escape. El nuevo equipo de purificación puede recuperar más del 90% de los líquidos residuales que contienen tungsteno y reducir la contaminación ambiental.

Reciclaje de residuos: Establecer un sistema de reciclaje de residuos de tungsteno para recuperar el polvo de tungsteno mediante el tostado a alta temperatura y la reducción electrolítica para reducir el desperdicio de recursos. Algunas empresas en China han desarrollado procesos con una tasa de reciclaje del 80 por ciento.

Sustitución de procesos no tóxicos: Promover los agentes de limpieza a base de agua y las pinturas verdes no tóxicas (como las pinturas a base de acrílico) para reemplazar los solventes orgánicos tradicionales y las pinturas que contienen plomo, en línea con el reglamento REACH de la UE y las normas RoHS de China.

Impulsado por energía renovable: Reducción de la huella de carbono mediante el uso de energía solar o eólica para alimentar equipos de sinterización y procesamiento térmico. Los proyectos piloto han demostrado que las energías renovables pueden reducir el consumo de energía de producción en un 30%.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

La promoción de procesos respetuosos con el medio ambiente debe equilibrar el costo y el cumplimiento, pero con el endurecimiento de las regulaciones de protección ambiental y la mejora de la conciencia ecológica de los consumidores, su aceptación en el mercado ha aumentado gradualmente.

### 9.3.3 Investigación y desarrollo de un nuevo electrodo de tungsteno

La investigación y el desarrollo de nuevos electrodos de tungsteno tienen como objetivo superar las limitaciones de rendimiento de los electrodos de tungsteno puro y satisfacer las necesidades de soldadura de alto rendimiento, y las direcciones principales incluyen:

Electrodo de tungsteno nanocristalino: El electrodo se prepara utilizando polvo de nano-tungsteno para mejorar la dureza y la estabilidad del arco mediante granos ultrafinos (<50 nm). El rendimiento de iniciación del arco y la tasa de consumo de los nanoelectrodos son mejores que los de los electrodos convencionales, lo que los hace adecuados para las industrias aeroespacial y de semiconductores.

Electrodo microaleado: La oxidación de trazas (por ejemplo, zirconio, óxido de itrio) se agrega al tungsteno puro para reducir el trabajo de evolución de electrones (a 4.0-4.2 eV) y mejorar el rendimiento de la soldadura de CC. El electrodo microaleado conserva la ventaja de costo y las propiedades no radiactivas del tungsteno puro.

Electrodos compuestos a base de tungsteno: El desarrollo de materiales compuestos de tungsteno y grafeno o nanotubos de carbono, combinados con un alto punto de fusión y una excelente conductividad eléctrica (>40% IACS), mejoran significativamente el curado y la durabilidad. El electrodo compuesto necesita resolver el problema de la estabilidad interfacial a altas temperaturas.

La investigación y el desarrollo de nuevos electrodos deben combinarse con la demanda del mercado y la viabilidad de la producción, por ejemplo, el costo de producción de los nanoelectrodos debe reducirse aún más para lograr una aplicación a gran escala. En el futuro, la cooperación entre la industria, la universidad y la investigación y los intercambios técnicos internacionales acelerarán el proceso de industrialización de nuevos electrodos.

## 9.4 Desafíos de la electricidad de superficie para electrodos eléctricos puros

Aunque el mercado de electrodos eléctricos puros se está desarrollando rápidamente, enfrenta múltiples desafíos, incluidos los precios fluctuantes de las materias primas, las presiones regulatorias ambientales y la competencia tecnológica.

### 9.4.1 Fluctuaciones en el precio de las materias primas

Como metal raro, el precio del tungsteno se ve afectado por la oferta y la demanda mundiales, la geopolítica y las políticas mineras. En 2024, el precio del concentrado de tungsteno fluctuará entre 120.000 y 150.000 RMB por tonelada, lo que afectará el costo de producción de los electrodos de tungsteno puro. Las principales razones del aumento de precios incluyen:

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Limitaciones de recursos: La gestión de cuotas de China para la minería de tungsteno ha limitado el crecimiento de la oferta.

Demanda de exportación: El aumento de la demanda de electrodos no radiactivos en Europa y Estados Unidos ha hecho subir el precio internacional del tungsteno.

Riesgos geopolíticos: Acontecimientos geopolíticos como el conflicto entre Rusia y Ucrania podrían interrumpir el suministro de tungsteno ruso.

Las fluctuaciones de precios aumentan la incertidumbre de los costos de producción, especialmente para las pequeñas y medianas empresas. Las estrategias incluyen contratos a largo plazo con proveedores, desarrollo de tecnologías de reciclaje de chatarra de tungsteno y la exploración de materiales alternativos, pero la volatilidad de los precios de las materias primas seguirá siendo un riesgo importante a corto plazo.

#### 9.4.2 Presión regulatoria ambiental

La producción de electrodos de tungsteno implica un alto consumo de energía y emisiones contaminantes, y está sujeta a regulaciones ambientales cada vez más estrictas, como la Ley de Protección Ambiental de China y la Directiva Marco de Residuos de la Unión Europea. Los desafíos incluyen:

Tratamiento de aguas residuales: Las aguas residuales que contienen tungsteno procedentes de la purificación y limpieza del tungsteno deben tratarse hasta un contenido de metales pesados inferior a 0,01 mg/L, lo que aumenta el coste del tratamiento.

Control de gases de escape: el polvo y el gas de óxido de tungsteno generados por la sinterización y la molienda deben tratarse mediante filtración y adsorción de alta eficiencia, y la inversión en equipos es alta.

Limitaciones en el consumo de energía: Los objetivos de "carbono dual" de China (alcanzar el pico de carbono y la neutralidad de carbono) requieren que las empresas reduzcan el consumo unitario de energía, y los procesos tradicionales de uso intensivo de energía corren el riesgo de ser eliminados.

El costo del cumplimiento de las regulaciones ambientales puede desplazar la financiación de la investigación y el desarrollo y afectar la innovación tecnológica. Las empresas necesitan reducir los costos de cumplimiento a través de procesos ecológicos y aplicaciones de energía renovable, al tiempo que aseguran subsidios gubernamentales y apoyo financiero verde.

#### 9.4.3 Competencia internacional y barreras tecnológicas

El mercado de electrodos eléctricos puros es altamente competitivo, y la competencia internacional y las barreras técnicas son los principales desafíos:

Barreras del mercado de alta gama: las empresas estadounidenses, alemanas y japonesas ocupan el mercado de alta gama con tecnologías avanzadas (como la sinterización SPS y el procesamiento nanocrystalino), y las patentes de tecnología y efecto de marca limitan la entrada de empresas chinas.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Competencia en el mercado de gama baja: Los productores de bajo costo en países como China, Vietnam e India están involucrados en guerras de precios en los mercados de gama baja, y los márgenes de ganancia continúan disminuyendo.

Brecha tecnológica: las empresas europeas y estadounidenses son líderes en el campo de los nuevos materiales de electrodos (como los electrodos compuestos de tungsteno) y la fabricación inteligente, mientras que las empresas chinas aún necesitan hacer avances en equipos centrales (como máquinas de trefilado de alta precisión) y procesos de alta gama.

Para hacer frente a la competencia internacional, es necesario fortalecer la investigación y el desarrollo tecnológicos, la creación de marcas y la cooperación internacional. Por ejemplo, cooperando con empresas alemanas para introducir equipos avanzados, o participando en el desarrollo de normas internacionales como ISO, podemos alzar nuestra voz. Además, las estrategias competitivas diferenciadas (por ejemplo, electrodos personalizados, certificación ecológica) pueden ayudar a las empresas a romper las barreras del mercado.



electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## Capítulo 10 Conclusiones

Como consumible principal de la soldadura por arco de argón de tungsteno (soldadura TIG), el electrodo de tungsteno puro (electrodo WP) ha desempeñado un papel importante en la soldadura y otros campos industriales debido a su alto punto de fusión, ventaja de costo y características no radiactivas. Este libro expone sistemáticamente el proceso de preparación, el equipo de producción, los métodos de prueba, los estándares nacionales y extranjeros, el estado del mercado y las ventajas y desventajas de los electrodos de tungsteno puro, y demuestra de manera integral sus características técnicas y valor de aplicación. Este capítulo hará una evaluación exhaustiva de los electrodos de tungsteno puro, esperará su futura dirección de desarrollo y presentará sugerencias para la investigación y la aplicación, con el fin de proporcionar referencia para los profesionales e investigadores de la industria.

### 10.1 Evaluación completa del electrodo de tungsteno puro

Como el primer tipo de electrodo no fundible utilizado en la soldadura TIG, el rendimiento y las características de aplicación del electrodo de tungsteno puro se han verificado completamente en la práctica a largo plazo. La siguiente es una evaluación integral desde cuatro aspectos: rendimiento técnico, escenarios de aplicación, economía y protección del medio ambiente.

#### Rendimiento técnico

El electrodo de tungsteno puro está compuesto de tungsteno de alta pureza ( $\geq 99,5\%$ ), que tiene un punto de fusión muy alto ( $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), una excelente conductividad térmica (alrededor de  $173\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) y una baja presión de vapor, lo que le permite mantener la estabilidad estructural y la integridad morfológica final en un entorno de arco de alta temperatura ( $6000\text{-}7000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Estas propiedades lo hacen particularmente bueno en la soldadura de CA (CA), especialmente para soldar metales ligeros con películas de óxido, como aluminio, magnesio y sus aleaciones. En la soldadura de CA, los electrodos de tungsteno puro logran el efecto de "limpieza catódica" a través de la acción alterna de semiciclos positivos y negativos, eliminando efectivamente la capa de óxido (como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , punto de fusión de aproximadamente  $2050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), formando una soldadura limpia y de alta calidad.

Sin embargo, el alto trabajo de electrones (alrededor de  $4,52\text{ eV}$ ) de los electrodos de tungsteno puro conduce a su iniciación del arco e inestabilidad del arco en la soldadura por corriente continua (CC), lo que limita su competitividad en aplicaciones de soldadura de acero inoxidable, acero al carbono y otros materiales. Además, la tasa de consumo de electrodos es alta, especialmente a altas corrientes ( $>200\text{ A}$ ) o durante la soldadura continua prolongada, donde el material final es volátil, lo que resulta en longitudes más cortas y un rendimiento reducido. En comparación con los electrodos dopados (como los electrodos de tungsteno de cerio y tungsteno de lantano, el trabajo electrónico de aproximadamente  $2,7\text{-}3,2\text{ eV}$ ) es ligeramente inferior en el rendimiento de soldadura integral, pero aún tiene ventajas insustituibles en escenarios específicos.

La alta densidad ( $19,3\text{ g/cm}^3$ ), la dureza (HV 350-450) y la estabilidad química de los electrodos de tungsteno puro los hacen ideales para electrodos de soldadura por resistencia, electrodos de corte

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

por plasma, materiales de emisión de termoelectrones, objetivos de pulverización catódica y contrapesos en aplicaciones no soldables. Por ejemplo, en la fabricación de semiconductores, los electrodos de tungsteno puro se pueden utilizar como objetivos de pulverización catódica para formar películas de tungsteno de alta calidad; En el sector aeroespacial, sus contrapesos de alta densidad se utilizan para optimizar el equilibrado estructural. En general, el rendimiento técnico de los electrodos de tungsteno puro es excelente en aplicaciones que requieren alta temperatura, alta precisión y no radiactividad, pero su versatilidad debe mejorarse aún más mediante la optimización del proceso.

### **Económico**

Una de las ventajas significativas de los electrodos de tungsteno puro son sus bajos costos de producción. En comparación con los electrodos dopados, los electrodos de tungsteno puro no necesitan agregar óxidos de tierras raras (como óxido de cerio, óxido de lantano), lo que evita materias primas costosas y procesos de dopaje complejos, y reduce los costos de producción. Los recursos mundiales de tungsteno son abundantes (China representa alrededor del 50% de las reservas), la cadena de suministro es estable y la fluctuación del precio del concentrado de tungsteno es relativamente controlable (alrededor de 12-150,000 yuanes / tonelada en 2024). Además, el proceso de producción de electrodos de tungsteno puro (como pulvimetalurgia, procesamiento a presión) ha sido muy maduro y la producción a gran escala ha reducido aún más el costo unitario.

En las aplicaciones, el bajo costo de los electrodos de tungsteno puro los hace muy atractivos en industrias sensibles a los costos, como la construcción, la construcción naval y el mecanizado en general. Por ejemplo, los electrodos de tungsteno puro se utilizan a menudo para la soldadura de muros cortina de aluminio, estructuras de barcos y piezas de automóviles para equilibrar la calidad y el costo. Sin embargo, su alta tasa de consumo y los frecuentes requisitos de molienda aumentan el costo de uso, especialmente en la soldadura de alta carga, que requiere un reemplazo de electrodo más frecuente, lo que indirectamente aumenta el costo operativo. En general, los electrodos de tungsteno puro tienen ventajas obvias en aplicaciones sensibles a los costos, pero existe un equilibrio entre el rendimiento y la economía en escenarios de alto rendimiento.

### **Respeto al medio ambiente y seguridad**

La naturaleza no radiactiva de los electrodos de tungsteno puro es que son más radiactivos que los electrodos de tungsteno toriado (que contienen óxido de torio radiactivo,  $\text{ThO}_2$ ) con ventajas significativas. La radiactividad de los electrodos de torio-tungsteno (tasa de dosis gamma de aproximadamente 1-10  $\mu\text{Sv/h}$ ) representa un peligro para la seguridad en la producción, el almacenamiento y la eliminación, mientras que la tasa de dosis de los electrodos de tungsteno puro está cerca del nivel de radiación de fondo (aproximadamente 0,1  $\mu\text{Sv/h}$ ), lo que está en línea con la regulación REACH de la UE y el estándar RoHS de China. Esta propiedad lo hace aún más atractivo en campos críticos para la seguridad, como equipos de procesamiento de alimentos, dispositivos médicos y aeroespacial.

Sin embargo, no se pueden ignorar los problemas de protección del medio ambiente en el proceso

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

de producción de electrodos de tungsteno puro. La purificación y sinterización del mineral de tungsteno implica un alto consumo de energía y las emisiones de aguas residuales, como el líquido residual que contiene tungsteno y el vapor de óxido de tungsteno, deben tratarse estrictamente para cumplir con los requisitos de la Ley de Protección Ambiental y otras regulaciones. En los últimos años, las empresas han reducido su impacto ambiental mediante la adopción de tecnologías como el intercambio iónico, el reciclaje de residuos y fuentes de energía renovables como la energía solar, pero el costo del cumplimiento sigue siendo un desafío para las pymes. En general, los electrodos de tungsteno puro tienen ventajas inherentes en términos de protección del medio ambiente y seguridad, pero el proceso de producción debe optimizarse aún más para lograr una fabricación ecológica.

### **Escenarios de aplicación**

Los escenarios de aplicación de los electrodos de tungsteno puro se centran principalmente en la soldadura TIG de CA, especialmente adecuados para la soldadura de aluminio, magnesio y sus aleaciones, y son ampliamente utilizados en las industrias aeroespacial, de fabricación de automóviles, de construcción naval y de la construcción. Por ejemplo, en el campo aeroespacial, los electrodos de tungsteno puro se utilizan para la soldadura de fuselajes de aleación de aluminio y piezas de aleación de magnesio de aviones C919; En la industria automotriz, desempeña un papel importante en la soldadura de carcasas de baterías para vehículos de nueva energía. Además, los electrodos de tungsteno también se utilizan ampliamente en aplicaciones no soldables, como el corte por plasma, los objetivos de pulverización catódica y los contrapesos, lo que demuestra su versatilidad.

Sin embargo, sus limitaciones en la soldadura de CC limitan sus aplicaciones de soldadura en acero inoxidable, aleaciones de níquel y otros materiales, y los electrodos dopados son más ventajosos en estos escenarios. Además, el rápido consumo y los altos requisitos de mantenimiento de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de alta carga o alta frecuencia también limitan su competitividad en la producción automatizada. En general, los electrodos de tungsteno puro tienen ventajas únicas en la soldadura de CA y áreas específicas que no son de soldadura, pero se necesitan más mejoras en aplicaciones de uso general y de alto rendimiento.

### **10.2 Perspectivas de desarrollo futuro del electrodo de tungsteno puro**

Con la transformación y actualización de la industria manufacturera mundial, el auge de la nueva industria energética y las regulaciones de protección ambiental cada vez más estrictas, el desarrollo futuro de electrodos de tungsteno puro será impulsado por la innovación tecnológica, la demanda del mercado y la orientación política. A continuación, se presentan las perspectivas de sus tendencias futuras desde tres aspectos: el progreso tecnológico, la expansión del mercado y el desarrollo verde.

### **Avances tecnológicos**

El progreso tecnológico es la clave para mejorar el rendimiento y la competitividad de los electrodos de tungsteno puro, y el desarrollo futuro se centrará en las siguientes direcciones:

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Alta pureza y optimización del grano: A través de tecnologías de purificación avanzadas, como el intercambio iónico y la extracción con solventes, la pureza del polvo de tungsteno aumenta al 99,99% y se reduce la influencia de las impurezas (como el oxígeno y el hierro) en la estabilidad del arco. Las tecnologías de sinterización rápida, como la sinterización por plasma de descarga (SPS), pueden refinar granos a menos de 10  $\mu\text{m}$ , mejorar la dureza y durabilidad del electrodo y reducir la tasa de consumo. La investigación y el desarrollo del electrodo de tungsteno nanocristalino mejorarán aún más el rendimiento de iniciación del arco y la estabilidad del arco, y ampliarán su aplicación en la soldadura de CC.

Fabricación inteligente y automatización: El Internet Industrial de las Cosas (IIoT) y la tecnología de sensores impulsarán la transformación inteligente de las líneas de producción. Por ejemplo, los sistemas inteligentes que monitorean la temperatura del horno de sinterización, la tensión de la máquina de trefilado y la calidad de la superficie del electrodo en tiempo real reducen las tasas de desperdicio y aumentan la productividad. La popularización de las líneas de producción automatizadas (como hornos de sinterización continua, equipos de pulido robóticos) acortará el ciclo de producción entre un 20% y un 30% y reducirá los costos de mano de obra.

Desarrollo de nuevos materiales: Los electrodos microaleados (como la adición de óxido de circonio u óxido de itrio) y los compuestos de matriz de tungsteno (como los electrodos compuestos de tungsteno-grafeno) se convertirán en puntos calientes en la investigación y el desarrollo. Estos materiales reducen el trabajo de evolución electrónica (a 4.0-4.2 eV) y mejoran el rendimiento de la soldadura de CC, al tiempo que conservan la ventaja de costo y las propiedades no radiactivas del tungsteno puro. La industrialización de nuevos electrodos debe resolver los problemas de control de costos y estabilidad del proceso, y se espera que logre una aplicación a gran escala en los próximos 5 a 10 años.

Los avances tecnológicos mejorarán significativamente el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro, haciéndolos más competitivos en soldadura de alta precisión y alta carga, y al mismo tiempo promoverán su aplicación en campos emergentes como los semiconductores y la industria nuclear.

### **Expansión del mercado**

Se espera que el mercado mundial de electrodos de tungsteno puro crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 3% al 5%, y se espera que el tamaño del mercado alcance los \$ 6-700 millones para 2030. Los impulsores de la expansión del mercado incluyen:

Crecimiento en los mercados emergentes: El rápido crecimiento de la fabricación y la construcción de infraestructuras en la región de Asia-Pacífico (China, India, Sudeste Asiático) está impulsando la demanda de electrodos de tungsteno puro. Por ejemplo, los proyectos ferroviarios de alta velocidad en la India y la construcción de puertos en el sudeste asiático aumentarán la demanda de soldadura de aleación de aluminio, y la ventaja de costo de los electrodos de tungsteno puro los hace dominantes en estos mercados.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Nuevas industrias energéticas y de alta tecnología: La demanda de materiales de tungsteno de alta pureza en células solares, equipos de energía eólica y fabricación de semiconductores está aumentando, y los electrodos de tungsteno puro se utilizan como objetivos de pulverización catódica y materiales de soldadura. Por ejemplo, la deposición de película delgada en la industria fotovoltaica y la fabricación de baterías para vehículos de nueva energía impulsarán la demanda de electrodos.

Avance en aplicaciones de alta gama: Con la optimización del proceso de producción, los electrodos de tungsteno puro obtendrán más oportunidades en la soldadura de precisión en las industrias aeroespacial y nuclear. Por ejemplo, la demanda de electrodos no radiactivos de alto rendimiento en proyectos como el Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER) promoverá la actualización tecnológica y la expansión del mercado de los electrodos de tungsteno puro.

Sin embargo, la expansión del mercado debe hacer frente a la competencia y a las barreras comerciales internacionales para los electrodos dopados. Las empresas europeas y estadounidenses ocupan el mercado de alta gama con sus ventajas tecnológicas, y las empresas chinas necesitan mejorar su competitividad a través de la construcción de marca y productos diferenciados, como electrodos personalizados. Además, la Iniciativa de la Franja y la Ruta (BRI, por sus siglas en inglés) proporciona a las empresas chinas acceso a mercados en Oriente Medio, África y América Latina, y necesita aprovechar los dividendos de las políticas para expandir las exportaciones.

### **Desarrollo verde**

La protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible son tendencias a largo plazo en la industria de electrodos de tungsteno puro, impulsadas por el objetivo global de "neutralidad de carbono" y las regulaciones ambientales. Las direcciones futuras incluyen:

Proceso de producción verde: adopte la tecnología de purificación de baja energía (como la separación por membrana) y el sistema de reciclaje de desechos para reducir las emisiones de aguas residuales y gases de escape. El proyecto piloto ha demostrado que la tasa de reciclaje de residuos puede alcanzar el 80%, reduciendo significativamente el desperdicio de recursos. El uso de energía renovable (por ejemplo, solar, eólica) en la sinterización y el procesamiento térmico puede reducir las emisiones de carbono en un 30%.

Promoción de materiales no tóxicos: Promover pinturas verdes a base de agua y agentes de limpieza no tóxicos para reemplazar las pinturas tradicionales que contienen plomo y solventes orgánicos, en línea con las regulaciones REACH de la UE y los estándares RoHS de China. Estos materiales reducen la contaminación ambiental y los riesgos para la salud, y aumentan la aceptación del producto en el mercado.

Modelo de economía circular: establecer un sistema de reciclaje para los electrodos de tungsteno, reciclar los electrodos usados mediante tostado a alta temperatura y reducción electrolítica, y reducir la dependencia del mineral de tungsteno primario. El modelo de economía circular puede reducir el costo de las materias primas entre un 20% y un 30%, al tiempo que mejora la imagen verde de las empresas.

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

## CTIA GROUP LTD

### Pure Tungsten electrode Introduction

#### 1. Overview of Pure Tungsten Electrode

Pure tungsten electrodes are electrode materials made primarily from high-purity tungsten (content  $\geq 99.95\%$ ) through powder metallurgy processes, including pressing, sintering, forging, and precision machining. They contain no rare earth or alloying elements, making them the most basic type of tungsten electrodes. They are widely used in welding and plasma applications that require high temperatures and high current density.

#### 2. Main Applications of Pure Tungsten Electrode

**TIG Welding (Tungsten Inert Gas Welding):** Especially suitable for DC welding of reactive metals such as magnesium, aluminum, and titanium (using DCEN).

**Plasma Cutting and Spraying:** Used as electrode materials for high-temperature ion sources.

**Electronic Devices:** Serves as cathodes or supporting components in vacuum devices such as electron tubes and discharge tubes.

**High-Temperature Furnace Electrodes:** Used as heating electrodes in resistance furnaces operating in inert atmospheres or vacuum environments.

**Scientific Research and Experimental Applications:** Involved in high-temperature and high energy-density experiments.

#### 3. Basic Data of Pure Tungsten Electrode

Item	Parameter
Chemical Composition (W)	$\geq 99.95\%$
Melting Point	3410°C
Density	19.3 g/cm <sup>3</sup>
Electrical Conductivity (20°C)	~30% IACS
Hardness (HV)	340 – 400 HV
Thermal Conductivity	170 W/(m·K)
Operating Current Range	DCEN, depends on diameter and base metal
Electrode Diameter Range	Ø0.5 mm ~ Ø6.4 mm (customizable)
Electrode Length	Standard lengths: 150 mm and 175 mm (customizable)
Applicable Standard	ISO 6848 (Tungsten electrodes for welding)

#### 4. Supply Form and Packaging of Pure Tungsten Electrode

Form: Polished rods, with customized ground tips

Standard Packaging: 10 pieces per plastic box, outer carton with shock-resistant protection

Customization: Dimensions, packaging, and tips can be customized

#### 5. Procurement Information

Email: sales@chinatungsten.com; Phone: +86 592 5129595; 592 5129696

Website: www.tungsten.com.cn

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

El desarrollo verde no solo cumple con los requisitos reglamentarios, sino que también mejora la responsabilidad social corporativa y la competitividad en el mercado. En el futuro, las certificaciones ecológicas (e.g. ISO 14001) serán el pasaporte para que los electrodos de tungsteno puro entren en el mercado internacional.

### 10.3 Sugerencias de investigación y aplicación del electrodo de tungsteno puro

Sobre la base de la evaluación integral y la tendencia de desarrollo futuro del electrodo de tungsteno puro, se presentan las siguientes sugerencias de investigación y aplicación desde cuatro aspectos: investigación y desarrollo tecnológico, optimización de la producción, promoción de aplicaciones y apoyo político.

#### Investigación y desarrollo tecnológico

Desarrollo de electrodos de alto rendimiento: Aumentar la inversión en investigación y desarrollo en electrodos de tungsteno nanocristalino y electrodos microaleados, y reducir el trabajo de electrones mediante la adición de óxidos traza (como óxido de itrio y zirconio) para mejorar el rendimiento de la soldadura de CC. La cooperación entre la industria, la universidad y la investigación puede acelerar la validación de laboratorio y la industrialización de nuevos electrodos.

Investigación de optimización de procesos: desarrolle tecnología de sinterización rápida y equipos de producción inteligentes para refinar la estructura del grano y mejorar la eficiencia de la producción. Por ejemplo, se promueve la tecnología de sinterización SPS para acortar el tiempo de sinterización al minuto y reducir el consumo de energía. La aplicación de sensores y tecnología de inteligencia artificial permite la optimización en tiempo real de los parámetros de producción.

Actualización de la tecnología de detección: Desarrollar tecnología de detección en línea (como la espectroscopia de ruptura inducida por láser, LIBS) para lograr un análisis en tiempo real de la composición química y la microestructura, y mejorar la eficiencia del control de calidad. Establecer una base de datos unificada de normas de ensayo para promover el reconocimiento mutuo internacional de los resultados de las pruebas.

#### Optimización de la producción

Automatización e inteligencia: Promueva las líneas de producción automatizadas y los sistemas de monitoreo inteligentes, que cubren todo el proceso, desde el prensado del polvo de tungsteno hasta el tratamiento de superficies. Por ejemplo, las máquinas de trefilado continuo y los equipos de pulido robóticos pueden aumentar la eficiencia de producción entre un 15% y un 20%. Las plataformas de análisis de datos, como los sistemas SCADA, optimizan los parámetros del proceso y reducen las tasas de desperdicio.

Implementación de fabricación ecológica: Invertir en equipos respetuosos con el medio ambiente (por ejemplo, filtros de alta eficiencia, depuradores húmedos) para tratar las aguas residuales de producción y los gases de escape para garantizar el cumplimiento de las regulaciones ambientales. Promueve las energías renovables para reducir tu huella de carbono. Establecer un sistema de

#### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

reciclaje de residuos para mejorar la utilización de los recursos.

Gestión de la cadena de suministro: Contratos firmados a largo plazo con proveedores de mineral de tungsteno para estabilizar los precios de las materias primas. Desarrollar la tecnología de reciclaje de chatarra de tungsteno para reducir la dependencia del mineral de tungsteno primario. Fortalezca la gestión digital de la cadena de suministro, monitoree el inventario y la logística en tiempo real y mejore la velocidad de respuesta.

### **Promoción de la aplicación**

Productos personalizados: De acuerdo con las necesidades de las industrias aeroespacial, automotriz y de nuevas energías, desarrollamos electrodos de tungsteno puro personalizados, como electrodos de diámetro pequeño (0.5-1.0 mm) para la industria electrónica y electrodos de gran diámetro (4.0-6.4 mm) para la construcción naval. Los productos personalizados pueden mejorar la competitividad del mercado.

Expansión del mercado internacional: Aproveche la iniciativa "Belt and Road" para ingresar a los mercados de Medio Oriente, África y América Latina para promover electrodos de tungsteno puro de bajo costo y alto rendimiento. Participe en exposiciones internacionales (como la Exposición de Soldadura en Essen, Alemania) y solicite la certificación ecológica (como la ISO 14001) para mejorar la influencia de la marca.

Capacitación y soporte técnico: Proporcione a los usuarios optimización de parámetros de soldadura y capacitación en el uso de electrodos para mejorar el rendimiento de los electrodos de tungsteno puro en la soldadura de CC. Por ejemplo, se recomiendan los ajustes de corriente alterna de encendido de arco de alta frecuencia y onda cuadrada para mejorar el rendimiento de inicio de arco y la estabilidad del arco.

### **Apoyo a las políticas**

Orientación en materia de política ambiental: El gobierno puede introducir políticas de subsidios para alentar a las empresas a adoptar tecnologías de producción ecológicas y energías renovables. Establecer normas más estrictas sobre la minería y las emisiones de tungsteno para promover la transición de la industria hacia la fabricación ecológica.

Financiamiento de investigación y desarrollo de tecnología: Establecer un fondo especial para apoyar la investigación y desarrollo y la industrialización de nuevos electrodos de tungsteno, como los electrodos nanocristalinos y los electrodos compuestos. Fomentar la investigación conjunta entre la industria, la universidad y la investigación para acelerar la transformación tecnológica.

Cooperación internacional y formulación de estándares: Participar en la revisión de las normas ISO y AWS para mejorar la voz de China en la formulación de estándares de electrodos de tungsteno. Promover el reconocimiento mutuo internacional de los resultados de las pruebas, reducir las barreras comerciales y promover el crecimiento de las exportaciones.

#### **Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**



electrodos de tungsteno puro de CTIA GROUP LTD

## Apéndice

### A. Glosario

**Electrodo WP:** Un electrodo de tungsteno con un contenido de  $\geq$  del 99,5% de tungsteno, generalmente utilizado para soldadura de CA, con un código de color verde.

**Soldadura TIG:** El proceso de soldar electrodos de tungsteno bajo la protección de gas inerte.

**Función de trabajo:** La cantidad mínima de energía requerida para que los electrones escapen de la superficie de un material.

**Estabilidad del arco:** La capacidad del arco para permanecer continuo y uniforme durante el proceso de soldadura.

**Pulvimetalurgia:** Tecnología de preparación de materiales mediante prensado y sinterización de polvos metálicos.

**Óxido de tierras raras:** como el óxido de cerio, el óxido de lantano, etc., aditivos utilizados para mejorar el rendimiento de los electrodos de tungsteno.

**Sinterización:** El proceso de calentar partículas de polvo a una temperatura por debajo del punto de fusión para combinarlas en un material denso.

**Rendimiento de inicio del arco:** la facilidad con la que el electrodo puede iniciar un arco al comienzo de la soldadura.

**Profundidad de penetración:** La profundidad de fusión del arco al material de la pieza de trabajo durante la soldadura.

**Emisión termoiónica:** Fenómeno en el que un material emite electrones a altas temperaturas.

**Crecimiento del grano:** El fenómeno de aumentar el tamaño del grano a altas temperaturas, lo que puede conducir a una disminución de las propiedades del material.

**AWS A5.12:** Estándar de electrodos de tungsteno desarrollado por la American Welding Society.

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

**ISO 6848:** Norma para electrodos de tungsteno desarrollada por la Organización Internacional de Normalización.

**Green Tip:** El marcado de color internacional de los electrodos de tungsteno puro.

**Soldadura de CC:** Un proceso de soldadura que utiliza una fuente de alimentación de CC.

**Soldadura de CA:** Un proceso de soldadura que utiliza energía de CA.

**Tasa de consumo de electrodo:** La tasa a la que se pierde un electrodo durante el proceso de soldadura.

**Coefficiente de expansión térmica:** La tasa de cambio dimensional de un material con la temperatura.

**Conductividad eléctrica:** La capacidad de un material para conducir una corriente eléctrica.

**Resistencia a la fluencia:** La capacidad de un material para resistir una deformación lenta a altas temperaturas.

## B. Referencias

- [1] Revisión del rendimiento y la aplicación del electrodo de tungsteno puro. Industria de tungsteno de China, 2025-01-20.
- [2] Análisis de la tendencia de desarrollo del mercado de electrodos de tungsteno. Chinatungsten Online Technology Co., Ltd., 2024.
- [3] Progreso en la investigación y el desarrollo de electrodos de tungsteno de alto rendimiento. Ingeniería y Materiales Metálicos, 2024-11-15.
- [4] Tecnología de fabricación verde en la industria del tungsteno. Asociación Internacional de Tungsteno, 2024.
- [5] Investigación sobre materiales y procesos de soldadura TIG. Tecnología de soldadura, 2025-02-10.
- [6] Informe de análisis del mercado global de electrodos de tungsteno. Industria de tungsteno de China, 2024-11-30.
- [7] Avances en la tecnología de producción de electrodos de tungsteno de alta eficiencia. Ingeniería y Materiales Metálicos, 2024-10-10.
- [8] Tendencias del mercado y los precios de los recursos de tungsteno. Noticias de Minería de China, 2024-09-20.
- [9] Ventajas y desventajas del electrodo de tungsteno puro. Industria de tungsteno de China, 2024-12-25.
- [10] Avances de la investigación sobre la mejora de los materiales de los electrodos de tungsteno. Materiales Metálicos e Ingeniería, 2024-11-10.
- [11] Aplicación de compuestos de matriz de tungsteno en soldadura. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023-12-20.
- [12] Métodos para el análisis de materiales de tungsteno de alta pureza. Materiales Metálicos e Ingeniería, 2024-10-15.
- [13] ISO 6848:2015. Soldadura y corte por arco — Electrodos de tungsteno no consumibles — Clasificación. Organización Internacional de Normalización, 2015.
- [14] AWS A5.12/A5.12M:2009. Especificación para electrodos de tungsteno y tungsteno disperso por óxido para soldadura y corte por arco. Sociedad Americana de Soldadura, 2009.

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

[15] ISO 6848:2015. Soldadura y corte por arco — Electrodo de tungsteno no consumibles — Clasificación. Organización Internacional de Normalización, 2015.

[16] EN 26848:1991. Consumibles de soldadura: electrodos de tungsteno para soldadura por arco con protección de gas inerte y para soldadura por plasma. Comité Europeo de Normalización, 1991.

[17] GB/T 4190-2017. Electrodo de tungsteno y aleaciones de tungsteno para soldadura por arco de argón con electrodos no fundentes. Administración de Normalización de la República Popular China, 2017.

[18] JIS Z 3233:2017. Electrodo de tungsteno para soldadura por arco con protección de gas inerte. Comité Japonés de Normas Industriales, 2017.

en.com

www.ch

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatun

1

  
www.chinatungsten.com

  
www.chinatungsten.com

**Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal**