

# Enciclopedia de filamentos de tungsteno por haz de electrones

中钨智造科技有限公司  
CTIA GRUPO 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

## 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

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

## Contenido

### Capítulo 1 Introducción

- 1.1 Definición e importancia del filamento de tungsteno por haz de electrones
- 1.2 Desarrollo histórico y evolución tecnológica
- 1.3 El papel del filamento de tungsteno por haz de electrones en la tecnología moderna

### Capítulo 2 Principios básicos del filamento de tungsteno en el cañón de electrones

- 2.1 Principio de funcionamiento del cañón de electrones
- 2.2 Bases físicas y químicas del filamento de tungsteno como material catódico
- 2.3 Mecanismo de emisión termoiónico
- 2.4 Comparación de filamentos de tungsteno y materiales alternativos

### Capítulo 3 Tecnología de preparación y producción de filamento de tungsteno para cañón de electrones

- 3.1 Selección y preparación de materias primas para el filamento de tungsteno por haz de electrones
  - 3.1.1 Origen y purificación del metal de wolframio
  - 3.1.2 Requisitos de tamaño de partícula y pureza del polvo de wolframio
  - 3.1.3 Selección de aditivos y materiales dopantes (como potasio, aluminio, etc.)
  - 3.1.4 Pruebas de materias primas y control de calidad
- 3.2 Metalurgia de filamentos de tungsteno por haz de electrones
  - 3.2.1 Prensado y sinterización de polvo de tungsteno
    - 3.2.1.1 Parámetros del proceso de prensado
    - 3.2.1.2 Tipo de horno de sinterización y control de temperatura
  - 3.2.2 Forja y estirado de varillas de tungsteno
    - 3.2.2.1 Tecnología de forja en caliente y forja en frío
    - 3.2.2.2 Diseño de troqueles de trefilado y selección de lubricantes
  - 3.2.3 Recocido y control del grano del alambre de wolframio
    - 3.2.3.1 Temperatura y atmósfera de recocido
    - 3.2.3.2 Efecto del tamaño de grano en el rendimiento
- 3.3 Formación y procesamiento de filamentos de tungsteno por haz de electrones
  - 3.3.1 Bobinado y conformado de alambre de tungsteno
    - 3.3.1.1 Hélice simple, doble hélice y diseños geométricos complejos
    - 3.3.1.2 Automatización y precisión de los equipos de moldeo
  - 3.3.2 Tecnología de tratamiento de superficies
    - 3.3.2.1 Limpieza y pulido químico
    - 3.3.2.2 Proceso de recubrimiento de superficies (por ejemplo, recubrimiento de óxido)
  - 3.3.3 Corte y conformación de filamentos
- 3.4 Equipo de producción y automatización de filamentos de tungsteno por haz de electrones
  - 3.4.1 Descripción general de los principales equipos de producción de filamentos de

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

tungsteno por haz de electrones

3.4.1.1 Horno de sinterización

3.4.1.2 Máquina de trefilado

3.4.1.3 Máquina envolvedora

3.4.2 Automatización e inteligencia de las líneas de producción

3.4.3 Control ambiental y requisitos de sala limpia

3.5 Control de calidad e inspección del filamento de tungsteno por haz de electrones

3.5.1 Tecnología de detección en línea

3.5.1.1 Inspección de precisión dimensional y geométrica

3.5.1.2 Detección de defectos superficiales

3.5.2 Pruebas de rendimiento

3.5.2.1 Ensayo de resistencia y conductividad

3.5.2.2 Ensayo de comportamiento de las emisiones térmicas de electrones

3.5.3 Análisis de fallos y medidas de mejora

#### Capítulo 4 Características del producto del filamento de tungsteno por haz de electrones

4.1 Propiedades físicas y químicas del filamento de tungsteno por haz de electrones

4.1.1 Punto de fusión y estabilidad térmica del filamento de wolframio

4.1.2 Resistividad y coeficiente de temperatura del filamento de tungsteno

4.1.3 Propiedades antioxidantes y anticorrosivas del filamento de tungsteno

4.1.4 Resistencia mecánica y ductilidad del filamento de wolframio

4.2 Características eléctricas y térmicas del filamento de tungsteno por haz de electrones

4.2.1 Eficiencia de emisión termoiónica del filamento de wolframio

4.2.2 Rango de temperatura de funcionamiento del filamento de tungsteno

4.2.3 Comportamiento de expansión térmica y fatiga térmica del filamento de wolframio

4.2.4 Estabilidad del arco del filamento de wolframio

4.3 Relación entre la microestructura y el rendimiento del filamento de haz de electrones

4.3.1 Estructura y orientación del grano

4.3.2 Efecto de los elementos dopantes sobre la microestructura

4.3.3 Morfología de la superficie y comportamiento de las emisiones

4.4 Vida útil y fiabilidad del filamento de tungsteno por haz de electrones

4.4.1 Factores que afectan a la vida útil del filamento

4.4.2 Análisis del modo de fallo (por ejemplo, evaporación, fractura)

4.4.3 Método de ensayo de fiabilidad

4.5 MSDS del filamento de tungsteno de haz de electrones CTIA GROUP LTD

#### Capítulo 5 Usos y aplicaciones del filamento de tungsteno por haz de electrones

5.1 Aplicación en cañón de electrones

5.1.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

5.1.2 Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

5.1.3 Soldadura y corte por haz de electrones

5.1.4 Litografía por haz de electrones

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

- 5.2 Dispositivos electrónicos de vacío
  - 5.2.1 Tubos de microondas (como magnetrones y tubos de onda viajera)
  - 5.2.2 Tubo de rayos X
  - 5.2.3 Tubo de rayos catódicos (CRT)
- 5.3 Otras aplicaciones de la investigación industrial y científica
  - 5.3.1 Deposición de película delgada (como deposición física de vapor)
  - 5.3.2 Fuente de iones y espectrómetro de masas
  - 5.3.3 Dispositivo experimental de fusión nuclear
- 5.4 Nuevas áreas de aplicación
  - 5.4.1 Fusión por haz de electrones en la impresión 3D
  - 5.4.2 Fuentes de electrones en sistemas de propulsión espacial
  - 5.4.3 Nanotecnología y micro-nanoprocésamiento

## Capítulo 6 Desafíos técnicos y desarrollo futuro del filamento de haz de electrones

- 6.1 Desafíos técnicos actuales del filamento de tungsteno por haz de electrones
  - 6.1.1 Prolongación de la vida útil del filamento
  - 6.1.2 Mejora de la eficiencia de la transmisión
  - 6.1.3 Requisitos de miniaturización y alta precisión
- 6.2 Nuevos materiales y tecnologías para los filamentos de tungsteno por haz de electrones
  - 6.2.1 Materiales compuestos a base de tungsteno
  - 6.2.2 Filamento de tungsteno nanoestructurado
  - 6.2.3 Materiales catódicos alternativos (por ejemplo, nanotubos de carbono, cátodos de emisión de campo)
- 6.3 Fabricación inteligente y ecológica de filamento de tungsteno por haz de electrones
  - 6.3.1 Supervisión inteligente y control adaptativo
  - 6.3.2 Tecnología de producción que ahorra energía y es respetuosa con el medio ambiente
  - 6.3.3 Reciclaje y tratamiento de residuos
- 6.4 Tendencias futuras de desarrollo de los filamentos de tungsteno por haz de electrones
  - 6.4.1 Diseño de un cañón de electrones de alto rendimiento
  - 6.4.2 Integración interdisciplinaria (como la integración con inteligencia artificial)
  - 6.4.3 Aplicaciones en el espacio y en entornos extremos

## Capítulo 7 Normas y especificaciones para filamentos de tungsteno por haz de electrones

- 7.1 Normas nacionales (GB)
  - 7.1.1 Normas relacionadas con GB/T (como las normas de materiales de tungsteno y aleaciones de tungsteno)
  - 7.1.2 Normas de ensayo y evaluación para materiales de cátodos de cañones de electrones
  - 7.1.3 Especificaciones de fabricación y aceptación de dispositivos electrónicos de vacío
- 7.2 Normas internacionales (ISO)
  - 7.2.1 Materiales relacionados con ISO y normas de ensayo
  - 7.2.2 Aplicación de la norma ISO 4618-2006 al tratamiento superficial de filamentos de tungsteno

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

7.2.3 Implementación de la norma ISO 14001 en producción

7.3 Norma americana

7.3.1 Normas ASTM (como ASTM B387)

7.3.2 Aplicación de las normas ASME en la fabricación de pistolas de electrones

7.3.3 Normas SAE (si son aplicables a la soldadura por haz de electrones)

7.4 Otras normas internacionales y de la industria

7.4.1 Norma japonesa (JIS)

7.4.2 Norma alemana (DIN)

7.4.3 Norma rusa (GOST)

7.5 Implementación y certificación de normas

7.5.1 Aplicación de normas en producción y ensayos

7.5.2 Certificación del sistema de gestión de la calidad (como ISO 9001)

7.5.3 Exportación de productos y cumplimiento de normas internacionales

**Apéndice**

A. Glosario

B. Referencias

## Capítulo 1 Introducción

### 1.1 Definición e importancia del filamento de tungsteno por haz de electrones

El filamento de tungsteno por haz de electrones es un componente del cátodo con metal de [tungsteno](#) como material principal. Produce emisión térmica de electrones a través del calentamiento eléctrico y es el componente central del cañón de electrones. Los cañones de electrones utilizan campos eléctricos o magnéticos para acelerar los electrones y formar haces de electrones de alta energía. Son ampliamente utilizados en microscopios electrónicos de barrido (SEM), microscopios electrónicos de transmisión (TEM), soldadura por haz de electrones, tubos de rayos X y otros equipos. La importancia de los filamentos de tungsteno radica en sus excelentes propiedades físicas y químicas: alto punto de fusión (alrededor de 3422 °C), baja presión de vapor, alta función de trabajo (aproximadamente 4,5 eV) y excelente estabilidad térmica y resistencia mecánica. Estas propiedades permiten que los filamentos de tungsteno funcionen de manera estable en entornos de alta temperatura y alto vacío y proporcionen haces de electrones confiables.

El filamento de tungsteno en el cañón de electrones debe calentarlo a 2000-2800 °C encendiéndolo, excitando los electrones en la superficie de tungsteno para superar la función de trabajo y escapar, formando un flujo de electrones. Estos electrones se aceleran bajo la acción del campo eléctrico para generar un haz de electrones enfocado para la obtención de imágenes, procesamiento o análisis. Por ejemplo, en SEM, la estabilidad de la emisión y el brillo del filamento de tungsteno afectan directamente la resolución de la imagen; En la litografía por haz de electrones, la vida útil y la consistencia del filamento determinan la precisión del procesamiento del patrón a nanoescala. Además, como metal raro, la escasez y el alto valor de los recursos de tungsteno destacan aún más la posición estratégica de los filamentos de tungsteno en la cadena de suministro industrial y de ciencia y tecnología mundial. Según información de [Chinatungsten Online](#), la tecnología de fabricación de filamentos de tungsteno está directamente relacionada con el rendimiento y el costo de los equipos electrónicos, y es una de las tecnologías clave en el campo de la alta tecnología.

### 1.2 Desarrollo histórico y evolución tecnológica

Los filamentos de tungsteno comenzaron a finales del siglo XIX y están estrechamente relacionados con el auge de la electrónica de vacío. En 1878, Thomas Edison utilizó por primera vez el tungsteno en filamentos incandescentes y descubrió su tolerancia a altas temperaturas y su baja tasa de evaporación, sentando las bases del tungsteno en aplicaciones de alta temperatura. A principios del siglo XX, los avances en la tecnología de tubos de vacío condujeron al nacimiento de los cañones de electrones, y el tungsteno se convirtió en el material preferido para los cátodos de los cañones de electrones debido a su alto punto de fusión y estabilidad química. En la década de 1920, los [filamentos de tungsteno](#) comenzaron a usarse en los primeros tubos de rayos catódicos (CRT), lo que marca su uso generalizado en dispositivos electrónicos.

En la década de 1950, la llegada de los microscopios electrónicos de barrido impuso mayores exigencias a los filamentos de tungsteno, lo que llevó a los investigadores a optimizar su microestructura y proceso de fabricación. En la década de 1960, la introducción de la tecnología de

dopaje se convirtió en un avance importante. Por ejemplo, la adición de elementos como el potasio, el aluminio y el silicio ( [conocimiento del tungsteno](#) ) mejoró significativamente la resistencia a la fluencia y la eficiencia de la emisión térmica de electrones del filamento. Al entrar en el siglo XXI, los avances en nanotecnología y fabricación de precisión han promovido aún más el desarrollo de la tecnología de filamentos de tungsteno. Por ejemplo, la tecnología de control de grano a nanoescala puede optimizar las propiedades mecánicas del filamento, y las tecnologías de recubrimiento de superficies (como el recubrimiento de óxido) pueden prolongar la vida útil.

### 1.3 El papel del filamento de tungsteno por haz de electrones en la tecnología moderna

En la tecnología moderna, los filamentos de tungsteno son un componente indispensable de los cañones de electrones y se utilizan ampliamente en la investigación científica, la fabricación industrial, el tratamiento médico y los campos de tecnología emergente. Sus principales funciones incluyen:

Investigación científica: En SEM y TEM, los filamentos de tungsteno proporcionan haces de electrones de alto brillo para observar estructuras a nanoescala. Por ejemplo, la estabilidad de la emisión de los filamentos de tungsteno afecta directamente a la resolución a nivel atómico de TEM.

Fabricación industrial: Los equipos de soldadura, corte y litografía por haz de electrones se basan en haces de electrones de alta energía generados por filamentos de tungsteno para lograr un procesamiento de alta precisión.

Aplicaciones médicas: Los filamentos de tungsteno en tubos de rayos X se utilizan para generar los haces de electrones necesarios para el diagnóstico por imágenes y se utilizan ampliamente en la exploración por TC y la radioterapia.

Campos emergentes: Los filamentos de tungsteno se utilizan cada vez más en la impresión 3D (fusión por haz de electrones), en los sistemas de propulsión espacial (como los propulsores iónicos) y en la nanotecnología. Por ejemplo, la tecnología de fusión por haz de electrones utiliza un haz de electrones de alta energía generado por un filamento de tungsteno para fundir con precisión polvos metálicos y crear estructuras complejas.

Los filamentos de tungsteno afectan directamente la eficiencia y precisión del equipo. Por ejemplo, en la litografía por haz de electrones, la consistencia de la emisión y la vida útil de los filamentos determinan la calidad de los patrones a nanoescala. Con requisitos cada vez más estrictos para la protección del medio ambiente y el desarrollo sostenible, la fabricación ecológica y el reciclaje de filamentos de tungsteno se han convertido en un tema candente en la industria. Las empresas globales están explorando tecnologías de reciclaje de tungsteno de desecho y procesos de producción de baja energía para hacer frente a la escasez de recursos y los desafíos ambientales.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

## Capítulo 2: Principios básicos del filamento de tungsteno en el cañón de electrones

### 2.1 Principio de funcionamiento del cañón de electrones

Un cañón de electrones es un dispositivo que acelera un haz de electrones a través de un campo eléctrico o magnético y es ampliamente utilizado en dispositivos electrónicos de vacío. Su estructura básica incluye un cátodo (generalmente un filamento de tungsteno), un ánodo y un electrodo de control (como una rejilla). Cuando funciona, el filamento de tungsteno se calienta a alta temperatura (2000-2800 °C) mediante electricidad, liberando electrones calientes; Estos electrones son acelerados por el campo eléctrico formado por el alto voltaje (varios miles de voltios a decenas de kilovoltios) aplicado por el ánodo para formar un haz de electrones de alta energía. El electrodo de control ajusta la intensidad, la forma y el enfoque del haz de electrones para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones.

El rendimiento de un cañón de electrones depende de la eficiencia de emisión, la estabilidad del haz y la precisión de enfoque del filamento. Los filamentos de tungsteno son el material catódico preferido para los cañones de electrones debido a su alto punto de fusión, baja presión de vapor y características de emisión térmica de electrones estables. Por ejemplo, en un microscopio electrónico de barrido, el cañón de electrones debe proporcionar un haz de electrones de haz estrecho y alto brillo, y la microestructura y el estado de la superficie del filamento de tungsteno afectan directamente a estos parámetros. Según datos de Chinatungsten Online, los diseños modernos de cañones de electrones pueden enfocar el haz de electrones a nivel subnanométrico optimizando la geometría del filamento y la configuración del electrodo.

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

## 2.2 Bases físicas y químicas del filamento de tungsteno como material catódico

El tungsteno como material catódico radica en sus propiedades físicas y químicas únicas:

Alto punto de fusión: el punto de fusión del tungsteno es de 3422 °C, que puede soportar el entorno de alta temperatura cuando el cañón de electrones está funcionando.

Baja presión de vapor: El tungsteno tiene una baja tasa de evaporación a altas temperaturas, lo que reduce la pérdida de filamento y la contaminación del sistema de vacío.

Alta función de trabajo: la función de trabajo del tungsteno es de aproximadamente 4,5 eV, que es adecuada para la emisión termoiónica y proporciona un flujo de electrones estable.

Estabilidad química: El tungsteno resiste la oxidación y la corrosión en un entorno de vacío y es adecuado para uso a largo plazo.

La estructura de cristal cúbico centrada en el cuerpo del tungsteno le da una excelente resistencia mecánica y estabilidad térmica. La adición de elementos dopantes (como potasio, aluminio y silicio) puede optimizar aún más el rendimiento, por ejemplo, reduciendo la función de trabajo o mejorando la resistencia a la fluencia. Según datos de Chinatungsten Online, la eficiencia de emisión de los filamentos dopados con tungsteno se puede aumentar entre un 10 y un 20%, mejorando significativamente el rendimiento de los cañones de electrones. Además, la morfología y la limpieza de la superficie de tungsteno son fundamentales para el rendimiento de las emisiones, y las diminutas impurezas o capas de óxido pueden reducir significativamente la eficiencia de las emisiones.

## 2.3 Mecanismo de emisión termoiónica

El filamento de tungsteno en el cañón de electrones es emisión termoiónica. Cuando el filamento de tungsteno se calienta a alta temperatura, los electrones libres en el interior pueden superar la barrera de potencial (llamada función de trabajo) formada en la superficie del material debido a la energía térmica suficiente, y luego escapar al vacío para formar un flujo de electrones.

De acuerdo con la ecuación de Richardson-Dushman, la relación entre la densidad de corriente  $J$  de emisión térmica de electrones y la temperatura  $T$  y la función de trabajo del material  $\phi$  se puede expresar como:

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

En:

$J$ : Densidad de corriente de emisión de electrones (A/cm<sup>2</sup>)

$A$ : Constante de Richardson (normalmente alrededor de 120 A/cm<sup>2</sup>/K<sup>2</sup>)

$T$ : Temperatura de la superficie del filamento de tungsteno (K)

$\phi$ : función de trabajo electrónico del material (eV)

$k$ : Constante de Boltzmann (8.617×10<sup>-5</sup> eV /K)

### Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Para el tungsteno, su función de trabajo es de aproximadamente 4,5-4,6 eV. Aunque no es el más bajo, debido a su alto punto de fusión, puede soportar temperaturas de funcionamiento superiores a 2000 °C, lo que hace que su eficiencia de emisión térmica de electrones sea suficiente para satisfacer las necesidades de los cañones de electrones.

La característica de la emisión térmica de electrones es que la densidad de corriente de electrones aumenta rápidamente con la relación exponencial de la temperatura. Por lo tanto, el diseño del cañón de electrones debe controlar con precisión la corriente de calentamiento del filamento de tungsteno para obtener la intensidad de haz de electrones requerida y evitar la pérdida o rotura del filamento por sobrecalentamiento.

En aplicaciones prácticas, el estado de la superficie del filamento tiene un impacto significativo en el rendimiento de las emisiones. Por ejemplo, los óxidos o impurezas de la superficie aumentarán la función de trabajo y reducirán la eficiencia de las emisiones; La morfología microscópica (como la orientación del grano y la rugosidad de la superficie) afecta la eficiencia de escape de electrones. Por lo tanto, las técnicas químicas de limpieza, pulido y recubrimiento de superficies se utilizan a menudo en la producción de filamentos para optimizar el rendimiento.

#### 2.4 Comparación de filamentos de tungsteno y materiales alternativos

Aunque los filamentos de tungsteno tienen un rendimiento excelente, su alta función de trabajo y su vida útil limitada han llevado a los investigadores a explorar materiales alternativos. Aquí hay una comparación de filamentos de tungsteno con materiales alternativos comunes:

Lantano, tungsteno (LaB6): Tiene una función de trabajo baja (alrededor de 2,7 eV) y una alta eficiencia de emisión, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alto brillo, pero tiene requisitos estrictos sobre el vacío y se contamina fácilmente con oxígeno.

Nanotubos de carbono (CNT): Tienen propiedades de emisión de campo, no requieren calentamiento y son adecuados para aplicaciones miniaturizadas, pero sus costos de fabricación son altos y su estabilidad necesita una verificación adicional.

Cátodo de óxido: alta eficiencia de emisión y baja temperatura de funcionamiento (alrededor de 1000 °C), pero poca resistencia mecánica y no es adecuado para cañones de electrones de alta potencia.

Materiales compuestos a base de tungsteno: como los materiales de tungsteno dopados con óxidos o carburos, tienen una alta eficiencia de emisión y una larga vida útil, pero el proceso es complejo y el costo es alto.

El filamento de tungsteno lo hace dominar el cañón de electrones de alta potencia y larga vida. Sin embargo, bajo la demanda de miniaturización y bajo consumo de energía, nuevos materiales como los nanotubos de carbono y el tungsteno nanoestructurado se están convirtiendo en puntos calientes

de investigación.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

### Capítulo 3: Proceso de preparación y producción del filamento de tungsteno por haz de electrones

El filamento de tungsteno por haz de electrones es un eslabón clave para garantizar su alto rendimiento y confiabilidad, cubriendo todo el proceso desde la selección de la materia prima hasta la formación final. Este capítulo analiza en detalle la preparación de la materia prima, el proceso metalúrgico, el procesamiento de conformado, el equipo de producción, el control de calidad, etc., combinando tecnología avanzada global y prácticas industriales, y analizando en profundidad los detalles técnicos y los desafíos de cada paso.

#### 3.1 Selección y preparación de materias primas para filamento de tungsteno por haz de electrones

La calidad de las materias primas determina directamente el rendimiento de los filamentos de tungsteno, lo que implica la purificación del metal de tungsteno, las características del polvo de tungsteno, la selección de materiales dopantes y un estricto control de calidad.

##### 3.1.1 Origen y purificación del metal de wolframio

El metal de tungsteno se extrae principalmente de la wolframita ( $\text{FeMnWO}_4$ ) y la scheelita ( $\text{CaWO}_4$ ), con reservas mundiales concentradas principalmente en China (alrededor del 60%), Rusia, Australia y Canadá. La wolframita se debe principalmente a su alto contenido de tungsteno y sus características de fácil separación, mientras que la scheelita requiere un proceso de purificación más complejo debido al calcio asociado. El proceso de minería incluye la minería a cielo abierto o la minería subterránea, seguida de la separación del concentrado de tungsteno mediante trituración, molienda y separación por gravedad (como mesa vibratoria, concentrador en espiral).

El proceso de purificación de tungsteno se divide en dos etapas: beneficio físico y fundición química. El beneficio físico mejora aún más la pureza del concentrado de tungsteno a través de la flotación, la separación magnética y la separación por gravedad, y el contenido típico de  $\text{WO}_3$  debe alcanzar el 65-70%. La fundición química convierte el concentrado de tungsteno en paratungstato de amonio o ácido tungstálico. El proceso específico incluye:

El concentrado de tungsteno se lixivia con hidróxido de sodio o solución de carbonato de sodio para formar una solución de tungstato de sodio.

Intercambio iónico o extracción con disolventes: elimina las impurezas (como silicio, fósforo, arsénico) para producir APT de alta pureza.

Calcinación y reducción: APT se calienta a 800-1000 °C para generar trióxido de tungsteno, y luego se reduce a polvo de tungsteno en una atmósfera de hidrógeno a una temperatura de 700-900 °C.

Durante el proceso de purificación, el control de impurezas es crucial. Las impurezas metálicas

como el hierro, el cobre y el azufre deben tener menos de 50 ppm, y las impurezas no metálicas como el oxígeno y el carbono deben tener menos de 100 ppm. El polvo de tungsteno de alta pureza (99,95%) se utiliza en filamentos de cañones de electrones de alta gama, lo que puede mejorar significativamente la eficiencia de las emisiones y la vida útil.

### 3.1.2 Requisitos de tamaño de partícula y pureza del polvo de wolframio

El polvo de tungsteno es un factor clave que afecta a la densidad de los blancos sinterizados y a la microestructura de los filamentos. El filamento de tungsteno por haz de electrones requiere que el polvo de tungsteno tenga un tamaño de partícula uniforme, generalmente en el rango de 1 a 10 micras, y que la desviación estándar de la distribución del tamaño de partícula se controle dentro de  $\pm 0.5$  micras. El tamaño de partícula fino y uniforme ayuda a formar un cuerpo sinterizado denso con una porosidad reducida (el objetivo es inferior al 2%). Un tamaño de partícula demasiado grande puede dar lugar a una sinterización desigual, mientras que un tamaño de partícula demasiado pequeño puede aumentar la dificultad de prensado.

En términos de pureza, el contenido de impurezas metálicas (como hierro, níquel y molibdeno) en polvo de tungsteno debe ser inferior a 30 ppm, y las impurezas no metálicas (como oxígeno, nitrógeno y carbono) deben ser inferiores a 80 ppm. El polvo de tungsteno de ultra alta pureza (grado 5N, 99,999%) tiene una demanda cada vez mayor en aplicaciones de alta gama, como la fabricación de filamentos para SEM de alta resolución. Los métodos de detección incluyen:

**Análisis del tamaño de partícula:** Un analizador láser de tamaño de partícula (como el Malvern Mastersizer) mide la distribución del tamaño de partícula con una precisión de  $\pm 0,1$  micras.

**Detección de pureza:** La espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) se utiliza para analizar el contenido de impurezas, con un límite de detección tan bajo como el nivel de ppb.

**Observación de la microestructura:** Se utilizó la microscopía electrónica de barrido (SEM) para examinar la morfología del polvo y asegurarse de que no hubiera aglomerados ni partículas anormales.

### 3.1.3 Selección de aditivos y materiales dopantes (como potasio, aluminio, silicio, etc.)

El dopaje es la tecnología central para optimizar el rendimiento de los filamentos de tungsteno. Mejora su rendimiento a altas temperaturas, eficiencia de emisiones y resistencia a la fluencia mediante la adición de oligoelementos. Los elementos de dopaje comúnmente utilizados incluyen:

**Potasio (K):** añadido en forma de óxido de potasio ( $K_2O$ ), con un contenido de 0,01-0,05 % en peso. El potasio forma pequeñas burbujas durante la sinterización, inhibe el crecimiento del grano y mejora la resistencia a la fluencia a altas temperaturas.

**Aluminio (Al):** Añadido en forma de óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) al 0,005-0,02 % en peso. El

aluminio reduce la función de trabajo (de 4,5 eV a aproximadamente 4,3 eV) y mejora la eficiencia de la emisión térmica de electrones.

Silicio (Si): Añadido en forma de dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) con un contenido de 0,01-0,03 % en peso. El silicio mejora la resistencia a altas temperaturas y reduce la oxidación de la superficie.

Otros elementos: como el renio (Re, 0,1-1 % en peso) se utiliza para mejorar la ductilidad, y el óxido de itrio (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se utiliza para mejorar las propiedades de emisión.

La adición de elementos dopantes debe distribuirse uniformemente a través de la mezcla húmeda o la aleación mecánica. El dopaje excesivo puede provocar un crecimiento anormal del grano o la fragilización del filamento. Por ejemplo, un contenido de potasio superior al 0,1 % en peso reducirá la resistencia mecánica.

### 3.1.4 Pruebas de materias primas y control de calidad

Las pruebas de materias primas abarcan la composición química, la distribución del tamaño de partícula, la morfología y el análisis de trazas de impurezas. Los equipos de uso común incluyen:

Espectrómetro de fluorescencia de rayos X (XRF): Analice rápidamente la composición química del polvo de tungsteno y los elementos dopantes con una precisión del  $\pm 0,01$  % en peso.

Microscopía electrónica de barrido (SEM): observe la morfología del polvo y detecte partículas aglomeradas o irregulares.

Microscopía electrónica de transmisión (TEM): Analice estructuras a nanoescala y evalúe la distribución de elementos dopantes.

ICP -MS: Detecta trazas de impurezas con una sensibilidad de nivel de ppb.

El control de calidad sigue las normas ISO 9001 y establece un sistema de trazabilidad completo desde el almacenamiento de la materia prima hasta la producción. Cada lote de polvo de tungsteno debe pasar al menos tres rondas de pruebas independientes y la tasa de aprobación debe alcanzar más del 99.9%. Las materias primas no calificadas se vuelven a purificar o desechan para evitar afectar los procesos posteriores.

## 3.2 Metalurgia de filamentos de tungsteno por haz de electrones

El proceso metalúrgico transforma el polvo de tungsteno en filamento de tungsteno de alto rendimiento, lo que implica pasos como prensado, sinterización, forja, estirado y recocido. Cada paso debe controlarse con precisión para garantizar la microestructura y el rendimiento del filamento.

### 3.2.1 Prensado y sinterización de polvo de tungsteno

#### 3.2.1.1 Parámetros del proceso de prensado

El prensado de polvo de tungsteno consiste en poner polvo de tungsteno en un molde y presionarlo hasta convertirlo en un blanco a través de una prensa hidráulica o una prensa isostática. Los parámetros del proceso incluyen:

Presión: 100-300 MPa, el valor típico es de 200 MPa. Una presión demasiado alta puede causar desgaste del troquel, una presión demasiado baja afectará la densidad de la palanquilla.

Tiempo de retención: 10-30 segundos para garantizar que las partículas de polvo se combinen completamente.

Material del molde: carburo de tungsteno ([www.tungsten-carbide-powder.com](http://www.tungsten-carbide-powder.com)) o acero de alta resistencia, pared interior pulida a Ra 0,1 micras para reducir la adherencia.

Aglutinante: Agregue 0.5-2 % en peso de alcohol polivinílico (PVA) o parafina para mejorar la resistencia de la pieza en bruto, que debe eliminarse por completo al comienzo de la sinterización.

La densidad relativa de la pieza en bruto prensada debe alcanzar el 60-70% y la porosidad debe controlarse dentro del 30%. La tecnología CIP puede mejorar aún más la uniformidad de la densidad y es adecuada para la fabricación de filamentos de alto rendimiento.

### 3.2.1.2 Tipo de horno de sinterización y control de temperatura

La sinterización es el proceso de densificar la palanquilla prensada a alta temperatura, con el objetivo de reducir la porosidad a menos del 2% y formar una estructura de grano uniforme. Los hornos de sinterización comunes incluyen:

Horno de calentamiento por resistencia: adecuado para la producción de lotes pequeños, rango de temperatura 1800-2800 °C.

Horno de calentamiento por inducción: adecuado para la producción a gran escala, alta velocidad de calentamiento y buena uniformidad.

Horno de sinterización por microondas: una tecnología emergente que consigue una rápida densificación mediante el calentamiento por microondas, reduciendo el consumo energético en un 20-30%.

El proceso de sinterización se divide en tres etapas:

Etapas de baja temperatura (800-1200°C): elimina aglutinantes e impurezas volátiles, con una duración de 30-60 minutos.

Etapas de temperatura media (1500-2000 °C): Promueve la unión del grano y los poros comienzan a cerrarse, durando 1-2 horas.

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

Etapa de alta temperatura (2500-2800°C): logra una densificación completa, dura 30-90 minutos.

La atmósfera de sinterización es hidrógeno de alta pureza (pureza 99.999%) o vacío ( $10^{-4}$  Pa) para evitar la oxidación. La precisión del control de temperatura debe alcanzar los  $\pm 5$  °C. Una temperatura demasiado alta causará un crecimiento anormal del grano, mientras que una temperatura demasiado baja afectará la densidad.

### 3.2.2 Forja y estirado de varillas de tungsteno

#### 3.2.2.1 Tecnología de forja en caliente y forja en frío

La palanquilla de tungsteno sinterizado se procesa en varillas de tungsteno mediante forja para mejorar la estructura interna y la densidad. La forja se divide en forja en caliente y forja en frío:

**Forja en caliente:** Se lleva a cabo a 1500-1800 °C, utilizando una máquina de forja rotativa o una máquina de forja hidráulica. La cantidad de deformación se controla al 10-20% cada vez, y la tasa de deformación total alcanza el 50-70%. La forja en caliente puede eliminar los poros de sinterización y aumentar la densidad a más del 99%.

**Forja en frío:** Se realiza a temperatura ambiente y es apta para el acabado final. La forja en frío mejora el acabado superficial y la precisión dimensional, pero la velocidad de deformación debe controlarse (0,1-0,5 mm/s) para evitar grietas.

El equipo de forja debe estar equipado con moldes de alta precisión y sistemas de monitoreo de temperatura para garantizar que la tolerancia del diámetro de la varilla de tungsteno esté dentro de  $\pm 0.05$  mm.

#### 3.2.2.2 Diseño de troqueles de trefilado y selección de lubricantes

La varilla de tungsteno se procesa en un alambre de 0,01-0,5 mm de diámetro a través de múltiples procesos de trefilado. Los elementos clave del proceso de trefilado incluyen:

**Material del molde:** carburo de tungsteno o diamante policristalino (PCD), precisión de apertura del molde  $\pm 0,1$  micras, rugosidad de la superficie Ra 0,05 micras.

**Pasadas de trefilado:** 20-40, con una tasa de reducción de superficie del 10-15% para cada pasada y una tasa de reducción de superficie total de más del 99%.

**Lubricante:** Emulsión de grafito, lubricante a base de molibdeno o suspensión de nano-diamante, reduciendo el coeficiente de fricción por debajo de 0,1.

**Velocidad de trefilado:** 0,5-5 m/s, debe ajustarse dinámicamente de acuerdo con el diámetro del alambre y el estado del molde.

Durante el proceso de trefilado, la temperatura de la superficie del alambre de tungsteno puede alcanzar los 300-500 °C, y la acumulación de calor debe controlarse mediante un sistema de

enfriamiento (como enfriamiento por agua o refrigeración por aire). La máquina de trefilado está equipada con un sensor de tensión y un medidor de diámetro láser para controlar la desviación del diámetro del hilo ( $\pm 0,5$  micras) en tiempo real.

### 3.2.3 Recocido y control del grano del alambre de wolframio

#### 3.2.3.1 Temperatura y atmósfera de recocido

El recocido se utiliza para eliminar la tensión interna durante el proceso de estirado y optimizar la estructura del grano y la ductilidad del alambre de tungsteno. Los parámetros del proceso de recocido incluyen:

Temperatura: 1200-1600 °C, el valor típico es 1400 °C. El recocido a baja temperatura (1200 °C) es adecuado para alambres delgados, el recocido a alta temperatura (1600 °C) se utiliza para alambres gruesos.

Tiempo: 10-60 segundos, tiempo de recocido corto para evitar el crecimiento excesivo del grano.

Atmósfera: Hidrógeno de alta pureza (99,999%) o gas inerte (como el argón) para evitar la oxidación.

Equipo: Horno de recocido continuo u horno de recocido al vacío, precisión de control de temperatura  $\pm 3$  °C.

Durante el proceso de recocido, el alambre de tungsteno se calienta mediante calentamiento por resistencia o calentamiento por inducción, y se debe evitar el sobrecalentamiento local.

#### 3.2.3.2 Efecto del tamaño de grano en el rendimiento

El tamaño de grano afecta directamente la resistencia mecánica, la ductilidad y el rendimiento de emisión térmica de electrones del alambre de tungsteno. El tamaño de grano ideal es de 1-5 micras:

Granos demasiado grandes ( $>10$  micras): reducen la resistencia a la tracción y aumentan la fluencia a alta temperatura.

Granos demasiado pequeños ( $<1$  micra): aumentan la fragilidad y reducen la ductilidad.

El control del grano se logra a través de procesos de dopaje y recocido. El dopaje de potasio forma pequeñas burbujas, lo que dificulta la migración del límite del grano y mantiene los granos finos; El control preciso de la temperatura y el tiempo de recocido evita la recristalización secundaria. La microscopía electrónica de barrido y la difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) se utilizan para analizar el tamaño y la orientación del grano para garantizar la formación de estructuras fibrosas.

### 3.3 Formación y procesamiento de filamentos de tungsteno por haz de electrones

La formación y el mecanizado es el proceso de procesamiento de filamentos de tungsteno en formas

geométricas específicas (como espirales o conos) para garantizar el rendimiento de emisión y la estabilidad mecánica del filamento en el cañón de electrones.

### 3.3.1 Bobinado y conformado de alambre de tungsteno

#### 3.3.1.1 Hélice simple, doble hélice y diseños geométricos complejos

La geometría del filamento de tungsteno afecta directamente el brillo y el rendimiento de enfoque del haz de electrones. Los diseños comunes incluyen:

Filamento helicoidal simple: adecuado para cañones de electrones de baja potencia (como SEM pequeños).

Filamento de doble hélice: Dos filamentos de tungsteno se enrollan en paralelo para aumentar el área de emisión, adecuado para aplicaciones de alto brillo (como TEM).

Diseños geométricos complejos: como espirales cónicas, espirales de varios segmentos o espirales planas, para cañones de electrones especiales, por ejemplo, en equipos de litografía de alta resolución.

Se deben tener en cuenta los siguientes parámetros para el diseño en espiral:

Diámetro de la espiral: 0,5-2,0 mm.

Uniformidad de espaciado: Garantiza la uniformidad de las emisiones.

Ángulo de hélice: 30-60 °, afecta las características de enfoque del haz de electrones.

El complejo diseño geométrico se optimiza mediante el diseño asistido por ordenador (CAD) y el análisis de elementos finitos (FEA) para garantizar la distribución térmica y la estabilidad mecánica.

#### 3.3.1.2 Automatización y precisión de los equipos de moldeo

El equipo de bobinado adopta un sistema CNC, equipado con un servomotor de alta precisión y un telémetro láser. Las tecnologías clave incluyen:

Servocontrol: velocidad de bobinado 0,1-10 rpm, precisión  $\pm 0,01$  rpm.

Alcance láser: control en tiempo real del diámetro y el paso de la espiral, precisión de  $\pm 1$  micra.

Control de tensión: 0,1-5 N, para evitar que el alambre de tungsteno se deforme o se rompa.

La máquina bobinadora automatizada admite enlaces multiteje, lo que permite la creación rápida de prototipos de formas geométricas complejas. Los equipos modernos integran sistemas de visión artificial para detectar defectos en espiral (como espaciado desigual y arañazos en la superficie), lo

que reduce la tasa de desperdicio a menos del 0,5%.

### 3.3.2 Tecnología de tratamiento de superficies

#### 3.3.2.1 Limpieza y pulido químico

La superficie del alambre de tungsteno debe estar libre de óxidos, aceites y residuos de trefilado para garantizar el rendimiento de las emisiones. El proceso de limpieza química incluye:

Decapado: Utilice una mezcla de ácido fluorhídrico (HF) y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) (proporción 1:3), remoje durante 10-30 segundos para eliminar los óxidos de la superficie.

Limpieza alcalina: use una solución de hidróxido de sodio (NaOH) para neutralizar los residuos ácidos, y el tiempo de limpieza es de 5 a 15 segundos.

Limpieza ultrasónica: se realiza en agua desionizada, frecuencia 40 kHz, tiempo 1-3 minutos, para eliminar partículas diminutas.

Después de la limpieza, el pulido electroquímico se realiza utilizando un electrolito mixto de ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) y ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), una densidad de corriente de 0,1-0,5 A/cm<sup>2</sup> y un tiempo de pulido de 10-20 segundos. Después del pulido, la rugosidad de la superficie Ra cae por debajo de 0,05 micras, mejorando significativamente la uniformidad de la emisión.

#### 3.3.2.2 Proceso de recubrimiento de superficies (por ejemplo, recubrimiento de óxido)

Los recubrimientos superficiales reducen la función de trabajo y mejoran la eficiencia de las emisiones y la vida útil. Los recubrimientos comunes incluyen óxido de itrio (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido de circonio (ZrO<sub>2</sub>) y óxido de torio (ThO<sub>2</sub>). Los procesos de recubrimiento incluyen:

Deposición química de vapor (CVD): Deposición de recubrimientos de óxido a 600-800 °C con un espesor de 0,1-1 micras y una uniformidad de ±0,01 micras.

Pulverización de plasma: adecuado para recubrimientos gruesos (1-5 micras), fuerte adherencia a altas temperaturas.

Método sol-gel: produce recubrimientos a nanoescala, adecuados para filamentos de alta precisión.

El recubrimiento debe ser firme para evitar que se despegue debido a las altas temperaturas.

### 3.3.3 Corte y conformación de filamentos

El corte de filamentos utiliza el corte por láser o el corte por electroerosión con una precisión de ±5 micras. El corte por láser utiliza láser pulsado (longitud de onda 1064 nm, potencia 10-50 W), velocidad de corte 0,1-1 mm/s, evitando la zona afectada por el calor. El corte por electroerosión es adecuado para formas complejas y el espacio entre electrodos se controla a 10-20 micras.

Después del corte, se da forma al filamento utilizando un accesorio de alta precisión y un microscopio para ajustar la forma del filamento. El equipo de conformación está equipado con un servosistema con una precisión de posicionamiento de  $\pm 2$  micras para garantizar que la geometría de la espiral cumpla con los requisitos de diseño.

### 3.4 Equipo de producción y automatización de filamentos de tungsteno por haz de electrones

Los equipos de producción y la tecnología de automatización son la clave para mejorar la consistencia y la eficiencia del filamento, cubriendo hornos de sinterización, máquinas de trefilado, máquinas de bobinado y líneas de producción inteligentes.

#### 3.4.1 Descripción general de los equipos de producción clave

##### 3.4.1.1 Horno de sinterización

El horno de sinterización debe soportar entornos de alta temperatura ( $2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y alto vacío ( $10^{-5}$  Pa). Los hornos de sinterización modernos utilizan las siguientes tecnologías:

Control PLC: programa de calefacción de varias etapas, desviación de temperatura  $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Sistema de atmósfera: hidrógeno o argón de alta pureza, precisión de control de flujo  $\pm 0,1$  L/min.

Sistema de refrigeración: refrigeración por agua o refrigeración por aire, velocidad de refrigeración  $10\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

Los hornos de sinterización por microondas son una tendencia emergente, ya que reducen el consumo de energía en un 30% y acortan el tiempo de sinterización en un 50%.

##### 3.4.1.2 Máquina de trefilado

La trefiladora está equipada con matrices de varias pasadas y un sistema de lubricación automática. Los parámetros clave incluyen:

Número de moldes: 20-40, tasa de reducción de apertura 10-15%.

Velocidad de trefilado: 0,5-10 m/s, ajustada dinámicamente para evitar la rotura del hilo.

Sistema de medición de diámetro: Instrumento de medición de diámetro láser, precisión  $\pm 0,5$  micras.

Las máquinas de trefilado de alta velocidad admiten una producción continua, con una sola longitud de trefilado de varios miles de metros.

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

### 3.4.1.3 Máquina envolvedora

La máquina bobinadora adopta un sistema CNC de seis ejes para admitir diseños espirales complejos. Las tecnologías clave incluyen:

Servomotor: precisión de velocidad  $\pm 0,01$  rpm.

Monitorización láser: Detección en tiempo real de la geometría de la espiral con una precisión de  $\pm 1$  micra.

Control de tensión: 0,1-5 N, ajustable dinámicamente.

La máquina bobinadora automatizada puede producir entre 150 y 200 espirales por minuto con una tasa de desecho de menos del 0,3%.

### 3.4.2 Automatización e inteligencia de las líneas de producción

La línea de producción automatizada integra las siguientes tecnologías:

Sensor: monitorea la temperatura, la presión, el diámetro del cable y otros parámetros con una precisión del  $\pm 0,1\%$ .

Visión artificial: Detecte defectos superficiales y desviaciones geométricas con una tasa de reconocimiento del 99,9%.

Algoritmos de IA: Analice los datos de producción, prediga los fallos de los equipos y optimice los parámetros del proceso.

Las líneas de producción inteligentes conectan dispositivos a través del Internet Industrial de las Cosas (IIoT), y los datos se cargan en la nube en tiempo real para su análisis.

### 3.4.3 Control ambiental y requisitos de sala limpia

La producción de filamentos de tungsteno debe llevarse a cabo en una sala limpia ISO Clase 5 (Clase 100). Los parámetros ambientales incluyen:

Temperatura:  $20 \pm 1$  °C, para evitar que la expansión térmica afecte la precisión.

Humedad: 40-60%, para evitar la acumulación de electricidad estática.

Limpeza del aire: menos de 100 partículas de 0,5 micras por metro cúbico.

La sala limpia está equipada con un filtro de alta eficiencia (HEPA) y un sistema de presión positiva para evitar la contaminación por polvo. La concentración de partículas en el aire se somete a pruebas periódicas para garantizar el cumplimiento de las normas ISO 14644-1.

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

### 3.5 Control de calidad e inspección del filamento de tungsteno por haz de electrones

El control de calidad se lleva a cabo a lo largo de todo el proceso de producción, cubriendo la inspección en línea, las pruebas de rendimiento y el análisis de fallas para garantizar que el rendimiento del filamento cumpla con los requisitos del cañón de electrones.

#### 3.5.1 Tecnología de detección en línea

##### 3.5.1.1 Inspección de precisión dimensional y geométrica

La inspección dimensional utiliza un medidor de diámetro láser y un microscopio óptico para medir el diámetro del alambre de tungsteno, el paso en espiral y la desviación geométrica:

Diámetro: precisión  $\pm 0,1$  mm, desviación inferior a  $\pm 1,0$  mm.

Paso en espiral: precisión  $\pm 2,0$  mm, lo que garantiza la uniformidad de la emisión.

Desviación geométrica: medida por escáner 3D, la desviación es inferior a  $\pm 0,5$  mm.

El sistema de detección en línea recopila 1.000 puntos de datos por segundo, proporciona información en tiempo real al sistema de control y ajusta automáticamente los parámetros del proceso.

##### 3.5.1.2 Detección de defectos superficiales

Los defectos superficiales (por ejemplo, grietas, residuos de óxido, arañazos) se identifican mediante las siguientes técnicas:

Microscopio electrónico de barrido (SEM): Aumento 1000-10000 veces, detecta defectos a nanoescala.

Ensayos no destructivos de rayos X: Identificación de grietas y poros internos, profundidad de penetración 0,1-1 mm.

Visión artificial: Cámaras de alta resolución combinadas con algoritmos de IA, con una tasa de detección del 99,8%.

La detección de defectos cubre el 100% de los productos y la tasa de desperdicio se controla por debajo del 0,2%.

#### 3.5.2 Pruebas de rendimiento

##### 3.5.2.1 Ensayo de resistencia y conductividad

La prueba de resistencia utiliza el método de cuatro sondas para medir la resistividad ( $5,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ ,  $20^\circ\text{C}$ ) y el coeficiente de temperatura ( $0,0045/^\circ\text{C}$ ) del alambre de tungsteno. Las condiciones de la prueba incluyen:

Rango de temperatura: 20-2800 °C, simulando el entorno de trabajo real.

Precisión de corriente:  $\pm 0,1 \mu\text{A}$ , lo que garantiza la precisión de la medición.

La prueba de conductividad se realiza en una cámara de vacío para verificar la estabilidad eléctrica del filamento a altas temperaturas.

### 3.5.2.2 Ensayo de comportamiento de las emisiones térmicas de electrones

Las pruebas de emisión termoiónica se realizan en un entorno de alto vacío ( $10^{-6}$  Pa) para medir la densidad de corriente de emisión del filamento a 2000-2800 °C. El equipo de prueba incluye:

Cámara de vacío: equipada con colector de electrones y fuente de voltaje.

Monitoreo de temperatura: termómetro infrarrojo, precisión  $\pm 5$  °C.

Medición de corriente: Picoamperímetro, precisión  $\pm 0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ .

Los resultados de la prueba deben ajustarse a la ecuación de Richardson-Dushman, y el objetivo de densidad de corriente de emisión es de 1-5 A/cm<sup>2</sup>.

### 3.5.3 Análisis de fallos y medidas de mejora

El análisis de fallos identifica la causa de la rotura del filamento, la evaporación o la degradación de la superficie. Los métodos comunes incluyen:

SEM y espectrómetro de dispersión de energía (EDS): Analice la morfología y la composición química de la fractura, e identifique defectos o impurezas en el límite del grano.

Tomografía de rayos X (TC): Detecta grietas y poros internos con una precisión de  $\pm 1$  micra.

Análisis termogravimétrico (TGA): mide la tasa de evaporación a alta temperatura y evalúa la vida útil.

Las mejoras incluyen la optimización de la fórmula de dopaje (como el aumento del contenido de potasio), el ajuste de la temperatura de sinterización (reduciéndola en 50 °C) y el fortalecimiento del recubrimiento de la superficie.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

#### Capítulo 4: Características del producto del filamento de tungsteno por haz de electrones

Los filamentos de tungsteno por haz de electrones determinan directamente su rendimiento en equipos electrónicos de alta precisión, incluidos microscopios electrónicos de barrido, equipos de soldadura por haz de electrones y tubos de rayos X. Este capítulo analiza en detalle las propiedades físicas y químicas, las propiedades eléctricas y térmicas, la microestructura y las relaciones de rendimiento, la vida útil y la confiabilidad de los filamentos de tungsteno y la hoja de datos de seguridad del material (MSDS) proporcionada por CTIA GROUP LTD. A través de un análisis en profundidad de estas características, se revela el comportamiento de los filamentos de tungsteno en condiciones extremas y su dirección de optimización.

##### 4.1 Propiedades físicas y químicas del filamento de tungsteno por haz de electrones

Los filamentos de tungsteno son la base para su uso como materiales catódicos en cañones de electrones y determinan su estabilidad y funcionalidad en entornos de alta temperatura y alto vacío.

##### 4.1.1 Punto de fusión y estabilidad térmica del filamento de wolframio

Los filamentos de tungsteno son conocidos por su punto de fusión extremadamente alto (3422 °C), uno de los puntos de fusión más altos de los metales que se encuentran en la naturaleza. Esta propiedad le permite mantener su integridad estructural a las temperaturas de funcionamiento del cañón de electrones (normalmente 2000-2800 °C) sin fundirse ni deformarse significativamente. El alto punto de fusión del tungsteno proviene de su estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC), que tiene enlaces metálicos extremadamente fuertes entre los átomos.

La estabilidad térmica es otra ventaja clave de los filamentos de tungsteno, reflejada en su presión

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

de vapor extremadamente baja. A 2800 °C, la presión de vapor del tungsteno es de solo  $10^{-7}$  Pa, lo que significa que incluso a altas temperaturas durante mucho tiempo, la tasa de evaporación del material es extremadamente baja. Por ejemplo, a 2500 °C, la tasa de pérdida de masa del filamento de tungsteno es de aproximadamente  $0,01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ , que es mucho menor que la de otros materiales catódicos como el tungsteno lantano (LaB6). Esta característica de baja evaporación reduce el adelgazamiento del diámetro del filamento, prolongando la vida útil y evitando la contaminación dentro del sistema de vacío.

Otra manifestación de la estabilidad térmica es la tolerancia del filamento de tungsteno al choque térmico. Durante la puesta en marcha y el apagado del cañón de electrones, el filamento se somete a rápidos ciclos de calor y frío (desde temperatura ambiente hasta 2500 °C, con una velocidad de calentamiento de hasta  $100 \text{ °C/s}$ ). La alta capacidad calorífica del tungsteno ( $0,13 \text{ J/g} \cdot \text{K}$ ) y una excelente conductividad térmica ( $173 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) le permiten dispersar rápidamente el calor, reduciendo el sobrecalentamiento local y el estrés térmico. Los elementos dopantes (como el potasio) mejoran aún más la estabilidad térmica, inhiben el crecimiento del grano al formar pequeñas burbujas y reducen las tasas de fluencia a alta temperatura. Las pruebas reales han demostrado que los filamentos de tungsteno dopados con potasio pueden funcionar de forma continua durante más de 5000 horas a 2600 °C con una pérdida de masa de menos del 5%.

#### 4.1.2 Resistividad y coeficiente de temperatura del filamento de tungsteno

Los filamentos de tungsteno son el parámetro central de su rendimiento eléctrico, lo que afecta directamente la eficiencia de calentamiento y la estabilidad de la corriente. A 20 °C, la resistividad del tungsteno es de  $5,6 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , y a medida que aumenta la temperatura, la resistividad aumenta de forma no lineal. A 2500 °C, la resistividad puede aumentar a  $50\text{-}60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ , un aumento de aproximadamente 10 veces. Este cambio se debe al efecto de la temperatura en la dispersión de electrones. A altas temperaturas, la vibración de la red aumenta, dificultando el movimiento de los electrones.

El TCR del tungsteno es de aproximadamente  $0,0045/\text{°C}$  en el rango de 20-1000 °C, lo que indica que la resistividad aumenta linealmente con la temperatura, pero a temperaturas más altas (como  $>2000 \text{ °C}$ ), el TCR disminuye ligeramente (alrededor de  $0,0038/\text{°C}$ ), reflejando ligeros cambios en la estructura cristalina. La estabilidad de la resistividad asegura que el filamento tenga propiedades eléctricas predecibles en condiciones de temperatura dinámica. Por ejemplo, en los cañones de electrones, el filamento generalmente se calienta mediante una fuente de alimentación de corriente constante (corriente 0.5-5 A), y el cambio estable de la resistividad permite un control preciso de la potencia de calentamiento (50-200 W) para evitar sobrecalentamiento o subcalentamiento.

Los elementos dopantes tienen un pequeño efecto sobre la resistividad. Por ejemplo, agregar 0.01 % en peso de aluminio puede reducir la resistividad en aproximadamente un 5% porque los átomos de aluminio reemplazan parcialmente a los átomos de tungsteno, optimizando la ruta de conducción de electrones. Los tratamientos superficiales (como los recubrimientos de óxido) tienen un efecto

menor sobre la resistividad, pero pueden aumentar ligeramente la resistencia de la superficie a altas temperaturas debido a la descomposición del recubrimiento. En aplicaciones prácticas, la resistencia del filamento se mide mediante el método de cuatro sondas con una precisión de  $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$  para garantizar la consistencia de un lote a otro.

#### 4.1.3 Propiedades antioxidantes y anticorrosivas del filamento de tungsteno

Los filamentos de tungsteno exhiben una excelente resistencia a la oxidación en entornos de alto vacío ( $10^{-6}$  Pa) porque su superficie es difícil de reaccionar con el oxígeno residual para formar óxidos. En condiciones típicas de funcionamiento del cañón de electrones ( $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , vacío  $10^{-7}$  Pa), la tasa de oxidación es casi cero y la superficie permanece lisa y libre de acumulación de óxido. Sin embargo, en entornos de vacío no ideales (como  $10^{-4}$  Pa) o en el aire, el tungsteno reacciona fácilmente con el oxígeno a altas temperaturas para formar trióxido de tungsteno, un compuesto volátil amarillo. Por ejemplo, en el aire a  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ , la tasa de oxidación de la superficie del tungsteno es de aproximadamente  $0,1 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{min}$ , lo que resulta en una rápida pérdida de material.

La resistencia a la corrosión permite que los filamentos de tungsteno resistan los gases residuales en los cañones de electrones, como el vapor de agua, el nitrógeno y las trazas de hidrocarburos. Bajo alto vacío, la presión parcial de estos gases es extremadamente baja ( $<10^{-8}$  Pa) y su efecto sobre el tungsteno es insignificante. Sin embargo, a niveles de vacío más bajos (como  $10^{-5}$  Pa), el vapor de agua puede causar microcorrosión en la superficie, formando una capa delgada de óxido y reduciendo la eficiencia de emisión. Los recubrimientos superficiales como la itria o el óxido de circonio mejoran significativamente la resistencia a la corrosión al formar una capa protectora que bloquea la penetración de las moléculas de gas. Las pruebas muestran que el recubrimiento de óxido de itrio puede reducir la tasa de oxidación en un 60% y no mantener una degradación obvia durante 2000 horas bajo un vacío de  $10^{-5}$  Pa.

Los filamentos de tungsteno a la corrosión química también se refleja en su resistencia a los productos de descarga de arco. En los cañones de electrones, la descarga de arco puede producir plasma que contiene iones activos (como  $\text{O}^{2+}$ ,  $\text{N}^{2+}$ ). La alta estabilidad química del tungsteno hace que su superficie sea menos susceptible al daño por bombardeo de iones, manteniendo el rendimiento a largo plazo.

#### 4.1.4 Resistencia mecánica y ductilidad del filamento de wolframio

Los filamentos de tungsteno son una propiedad importante para ellos en entornos de alta temperatura y alta tensión. A temperatura ambiente, el tungsteno tiene una resistencia a la tracción de 800-1000 MPa y un límite elástico de aproximadamente 600 MPa. Incluso a  $2500 \text{ }^\circ\text{C}$ , la resistencia a la tracción se mantiene en 300-500 MPa, que es mucho más alta que otros materiales de cátodo como el níquel ( $<100$  MPa). La alta resistencia proviene de la estructura cristalina BCC del tungsteno y la baja densidad de defectos, y los elementos dopantes optimizan aún más las propiedades. Por ejemplo, agregar 0.05 % en peso de potasio puede aumentar la resistencia a la tracción en un 20% a través del fortalecimiento del límite de grano y reducir la deformación a alta temperatura.

La ductilidad es un parámetro clave de los filamentos de tungsteno durante el estirado y el bobinado. El tungsteno puro es quebradizo a temperatura ambiente, con una elongación a la rotura de sólo el 1-2%, pero mediante procesos de dopaje (como el renio, 0,1-1% en peso) y recocido, el alargamiento a la rotura puede aumentarse al 5-10%. El dopaje de renio reduce la barrera energética para el movimiento de dislocación y mejora la capacidad de deformación plástica. El recocido (1200-1600 °C, atmósfera de hidrógeno) elimina la tensión de estirado, forma una estructura de grano fibroso uniforme y mejora aún más la ductilidad. Las pruebas reales muestran que la tasa de rotura del alambre de tungsteno dopado con renio durante el trefilado es inferior al 0,1%, lo que es adecuado para la formación en espiral compleja.

El equilibrio entre la resistencia mecánica y la ductilidad es fundamental para la resistencia a las vibraciones del filamento. En los cañones de electrones, el filamento puede estar sujeto a vibraciones mecánicas (10-100 Hz) o choques térmicos. El filamento de tungsteno optimizado mostró una excelente fiabilidad mecánica sin grietas en 1000 pruebas de vibración (amplitud de 0,5 mm).

#### 4.2 Características eléctricas y térmicas del filamento de tungsteno por haz de electrones

Las propiedades eléctricas y térmicas determinan la eficiencia de calentamiento, el rendimiento de la emisión de electrones y las capacidades de gestión térmica del filamento de tungsteno en el cañón de electrones, y son el núcleo de su funcionalidad.

##### 4.2.1 Eficiencia de emisión termoiónica del filamento de tungsteno

La eficiencia de la emisión termoiónica es el indicador central del filamento de tungsteno como material catódico, que está determinado por la función de trabajo, el estado de la superficie y la temperatura de funcionamiento. La función de trabajo del tungsteno puro es de 4,5 eV, lo que indica que la energía necesaria para que los electrones escapen de la superficie es alta. A 2500 °C, la densidad de corriente de emisión del filamento de tungsteno es de 1-5 A / cm<sup>2</sup> y el brillo es de aproximadamente 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup> A / cm<sup>2</sup>·SR, que es adecuado para la mayoría de las aplicaciones de cañones de electrones. La eficiencia de las emisiones sigue la ecuación de Richardson-Dushman:

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi}{kT}}$$

Donde (J) es la densidad de la corriente de emisión, (A) es la constante de Richardson (alrededor de 120 A/cm<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>), (T) es la temperatura absoluta, (phi) es la función de trabajo y (k) es la constante de Boltzmann (8.617×10<sup>-5</sup> eV/K). La ecuación muestra que la eficiencia de las emisiones aumenta exponencialmente con la temperatura, pero las altas temperaturas aceleran la evaporación y es necesario optimizar el equilibrio.

El dopaje y los recubrimientos superficiales aumentan significativamente la eficiencia de las emisiones. La adición de 0,01 % en peso de aluminio puede reducir la función de trabajo a 4,3 eV y aumentar la densidad de corriente de emisión en un 15-20%. El recubrimiento de óxido de itrio

(Y2O3) (espesor de 0,1-1 micra) reduce aún más la función de trabajo a 4,2 eV y aumenta la eficiencia de emisión en un 30%, alcanzando 8 A / cm<sup>2</sup> a 2600 °C. La limpieza de la superficie tiene un impacto significativo en el rendimiento de las emisiones, y la contaminación por óxido traza o carbono puede aumentar la función de trabajo en 0,1-0,2 eV y reducir la eficiencia en un 10%. La limpieza química (ácido fluorhídrico + ácido nítrico) y el pulido electroquímico (Ra < 0,05 micras) garantizan una superficie pura y optimizan la uniformidad de las emisiones.

En aplicaciones prácticas, la eficiencia de emisión se mide mediante un banco de pruebas de vacío equipado con un colector de electrones y un picoamperímetro con una precisión de ±0,1 μA/cm<sup>2</sup>. Los filamentos dopados y recubiertos pueden proporcionar un brillo de 10<sup>7</sup> A/cm<sup>2</sup>·sr en SEM de alta resolución, satisfaciendo las necesidades de imágenes subnanométricas.

#### 4.2.2 Rango de temperatura de funcionamiento del filamento de tungsteno

Los filamentos de tungsteno son de 2000-2800 °C, dependiendo del escenario de aplicación. Los dispositivos de baja potencia (como los tubos de rayos catódicos) utilizan 2000-2200 °C y una corriente de emisión de 0,1-1 mA; Los dispositivos de alto brillo (como los microscopios electrónicos de transmisión) utilizan 2600-2800 °C y una corriente de emisión de 5-10 mA. La selección de la temperatura debe equilibrar la eficiencia de las emisiones y la vida útil. Por cada aumento de 100 °C en la temperatura, la densidad de corriente de emisión aumenta aproximadamente 2 veces, pero la tasa de evaporación aumenta 3-4 veces y la vida útil se acorta en un 30-50%.

El control de temperatura se logra a través de una fuente de alimentación de corriente constante o voltaje constante, con una potencia de calentamiento típica de 50-200 W. Un termómetro infrarrojo (precisión ±5 °C) o termopar monitorea la temperatura del filamento en tiempo real para evitar el sobrecalentamiento local. El diseño de la geometría del filamento (como la doble hélice) aumenta el área de disipación de calor, reduce los gradientes de temperatura y reduce el estrés térmico. Por ejemplo, la uniformidad de la temperatura de un filamento de doble hélice es un 20% más alta que la de una sola hélice, y los puntos calientes locales se reducen en un 50%.

En condiciones extremas (como los dispositivos de fusión nuclear), el filamento puede alcanzar brevemente más de 3000 °C, momento en el que se requiere un dopaje especial (como el renio) o un recubrimiento (como el óxido de circonio) para mantener el rendimiento. Las pruebas han demostrado que los filamentos dopados con renio pueden funcionar a 2900 °C durante 100 horas con menos del 10% de pérdida de masa.

#### 4.2.3 Comportamiento de expansión térmica y fatiga térmica del filamento de wolframio

El coeficiente de expansión térmica del tungsteno es de 4,5×10<sup>-6</sup>/C (20-1000 °C), que es relativamente bajo entre los metales, lo que indica que tiene poca deformación a altas temperaturas. A 2500 °C, el coeficiente de expansión térmica aumenta ligeramente a 5.0×10<sup>-6</sup>/C, pero aún mantiene una excelente estabilidad dimensional. La baja expansión térmica reduce la tensión mecánica del filamento durante los ciclos de frío y calor, lo que es particularmente adecuado para

el arranque y apagado frecuente de cañones de electrones. Por ejemplo, la longitud del filamento cambia solo un 1,1% cuando sube de 20 °C a 2500 °C, y el efecto sobre la geometría de la espiral es insignificante.

El rendimiento de fatiga térmica refleja la durabilidad del filamento en ciclos repetidos de calentamiento-enfriamiento. En 1000 pruebas de ciclo frío-calor (20-2500 °C, velocidad de calentamiento 100 °C/s), la tasa de incidencia de grietas de los filamentos de tungsteno dopados con potasio fue inferior al 1%, que es mucho mejor que el tungsteno puro (tasa de agrietamiento del 5%). La mejora de la fatiga térmica se debe a los siguientes factores:

Optimización de la estructura del grano: Los granos finos (1-5 micras) dispersan la tensión a través de los límites del grano y reducen la propagación de grietas.

Fortalecimiento del dopaje: Las burbujas de potasio y el dopaje de renio aumentan la resistencia del límite del grano e inhiben la formación de microfisuras.

Tratamiento de superficies: El pulido y el recubrimiento reducen la concentración de tensiones superficiales y reducen los puntos de partida de fatiga.

Las pruebas de fatiga térmica utilizan un horno de ciclo de alta temperatura y un microscopio electrónico de barrido (SEM) para analizar la morfología de las grietas, combinadas con la simulación de elementos finitos para predecir la distribución de la tensión y optimizar el diseño del filamento.

#### 4.2.4 Estabilidad del arco del filamento de wolframio

La estabilidad del arco se refiere a la capacidad del filamento para evitar descargas anormales (como la ruptura del arco) a alto voltaje (5-20 kV), que es la clave de la calidad del haz de cañón de electrones. La formación de arcos puede ser causada por defectos en la superficie, gas residual o falta de homogeneidad del campo eléctrico, lo que resulta en fluctuaciones del haz de electrones o daños en el equipo. La alta estabilidad química y el acabado superficial ( $R_a < 0,05$  micras) del filamento de tungsteno reducen significativamente el riesgo de formación de arcos.

El grado de vacío es un factor importante en la estabilidad del arco. A  $10^{-7}$  Pa, la presión parcial del gas residual es extremadamente baja y la probabilidad de ocurrencia de arco es inferior al 0.01%. A grados de vacío más bajos (como  $10^{-5}$  Pa), el vapor de agua o el oxígeno pueden causar microdescargas. Los recubrimientos superficiales (como el óxido de circonio) reducen el riesgo de descarga en un 50% al aumentar la rigidez dieléctrica. El diseño de la geometría del filamento también afecta a la estabilidad. El filamento de doble hélice reduce la tasa de ocurrencia del arco en un 30% a través de una distribución uniforme del campo eléctrico.

La prueba de estabilidad del arco se llevó a cabo en una cámara de alto vacío, con un voltaje de 10-20 kV aplicado y la corriente de descarga monitoreada ( $<1 \mu A$  se consideró aceptable). Los

resultados de las pruebas mostraron que el filamento con un tratamiento superficial optimizado podía funcionar de forma continua durante 1000 horas a 15 kV sin arco eléctrico, cumpliendo con los requisitos de los cañones de electrones de alta precisión.

### 4.3 Relación entre la microestructura y el rendimiento del filamento de tungsteno por haz de electrones

La microestructura de los filamentos de tungsteno, incluida la estructura del grano, la distribución de los elementos dopantes y la morfología de la superficie, afecta directamente a sus propiedades mecánicas, eléctricas y de emisión.

#### 4.3.1 Estructura y orientación del grano

Los filamentos de tungsteno suelen ser cristales finos equiaxiales con un tamaño medio de 1-5 micras. El proceso de estirado y recocido forma una estructura fibrosa a lo largo de la dirección axial, con la orientación del grano principalmente en la dirección  $\langle 110 \rangle$ , lo que representa el 70-80%. La estructura fibrosa mejora la resistencia a la tracción al fortalecer los límites de grano (aumentar en un 15-20%), al tiempo que optimiza la trayectoria conductora electrónica y reduce la resistividad en un 5%. El análisis de difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) muestra que los granos orientados a  $\langle 110 \rangle$  tienen una tasa de fluencia más baja a altas temperaturas y prolongan la vida útil del filamento en un 30%.

El tamaño de grano tiene un efecto significativo en el rendimiento. Los granos demasiado grandes ( $>10$  micras) reducen la resistencia mecánica y aumentan la deformación a alta temperatura; Los granos demasiado pequeños ( $<1$  micra) aumentan la densidad del límite de grano y causan fragilidad. El tamaño ideal (2-4 micras) se controla mediante dopaje y recocido, por ejemplo, el dopado de potasio forma pequeñas burbujas, lo que dificulta la migración del límite del grano y mantiene granos uniformes. Las observaciones de SEM y microscopía electrónica de transmisión (TEM) muestran que el filamento con estructura de grano optimizada tiene una resistencia a la tracción de 400 MPa y un alargamiento a la rotura del 8% a 2500 °C.

#### 4.3.2 Efecto de los elementos dopantes sobre la microestructura

Los elementos dopantes (como potasio, aluminio, renio) optimizan el rendimiento del filamento al cambiar el crecimiento del grano y la estructura electrónica de la superficie:

Potasio (K, 0,01-0,05 % en peso): forma burbujas con un diámetro de 0,1-0,5  $\mu\text{m}$  durante la sinterización, que se distribuyen en los límites de grano, dificultando el crecimiento del grano y manteniendo el tamaño de grano de 2-3  $\mu\text{m}$ . Las burbujas de potasio también aumentan la resistencia del límite del grano, reducen las grietas a alta temperatura y prolongan la vida útil en un 20-40%.

Aluminio (Al, 0,005-0,02 % en peso): promueve la exposición del plano de cristal  $\{100\}$ , reduce la función de trabajo en 0,2 eV y aumenta la densidad de corriente de emisión en un 15%. La distribución uniforme de los átomos de aluminio en la red (verificada por TEM-EDS) optimiza la conductividad electrónica.

Renio (Re, 0,1-1 % en peso): Mejora la plasticidad de la red, reduce la densidad de dislocación y aumenta la ductilidad en un 10%. El renio también inhibe la recristalización a alta temperatura y mantiene la estructura fibrosa.

La distribución de los elementos dopantes debe ser uniforme para evitar que el enriquecimiento local conduzca a un rendimiento desigual. El análisis de espectroscopia de dispersión de energía (EDS) muestra que el dopaje de tungsteno reduce los defectos del límite del grano en un 30%, mejora la consistencia de la orientación del grano en un 20% y mejora significativamente las propiedades mecánicas y de emisión.

#### 4.3.3 Morfología de la superficie y comportamiento de las emisiones

La morfología de la superficie, incluida la rugosidad, la exposición de la cara cristalina y los defectos microscópicos, afecta directamente la uniformidad y la eficiencia de la emisión térmica de electrones. La rugosidad superficial ideal  $R_a < 0,05$  micras se logra mediante pulido electroquímico, lo que reduce la concentración del campo eléctrico local y mejora la consistencia de las emisiones en un 10%. El análisis de microscopía de fuerza atómica (AFM) muestra que la altura de pico a valle de la superficie pulida es de  $< 10$  nm, que es mucho menor que la de la superficie no tratada (50-100 nm).

La exposición de la cara del cristal es fundamental para el rendimiento de las emisiones.  $\{100\}$  facetas son más favorables para el escape de electrones que las facetas  $\{110\}$  (4,6 eV) debido a su menor función de trabajo (4,3 eV). El dopaje con aluminio y recubrimientos superficiales (como el óxido de itrio) aumenta la proporción de facetas de  $\{100\}$  en un 20% y mejora la densidad de corriente de emisión en un 15%. Los recubrimientos de óxido de itrio (espesor de 0,1-1 micra) optimizan los estados electrónicos de la superficie mediante la formación de estructuras cristalinas a nanoescala, lo que reduce aún más la función de trabajo a 4,2 eV.

Los defectos de la superficie (como arañazos y residuos de óxido) pueden causar sobrecalentamiento local o descarga de arco, lo que reduce la eficiencia de las emisiones. La limpieza química y el tratamiento con plasma eliminan los defectos, y la limpieza de la superficie alcanza el 99,9%, lo que garantiza la uniformidad de las emisiones. Las pruebas reales muestran que la desviación de la densidad de la corriente de emisión del filamento con morfología de superficie optimizada a 2600 °C es inferior al 1%, cumpliendo con los requisitos de los cañones de electrones de alta resolución.

#### 4.4 Vida útil y fiabilidad de los filamentos de tungsteno de cañón de electrones

La vida útil y la confiabilidad de los filamentos de tungsteno con cañón de electrones son indicadores clave que determinan su rendimiento de aplicación en equipos de alta precisión (como microscopios electrónicos de barrido, tubos de rayos X y equipos de litografía por haz de electrones). La vida útil de los filamentos de tungsteno suele ser de entre 500 y 2000 horas y se ve afectada por muchos factores, como las condiciones de trabajo, las propiedades de los materiales, los procesos de fabricación y los factores ambientales. En esta sección se analizan en detalle los factores que afectan a la vida útil del filamento, los principales modos de fallo y sus métodos de análisis, así

como el proceso estandarizado de pruebas de fiabilidad para proporcionar soporte técnico para optimizar el diseño del filamento y prolongar la vida útil.

#### 4.4.1 Factores que afectan a la vida útil del filamento

La vida útil de los filamentos de tungsteno se ve afectada por una combinación de múltiples factores internos y externos. Los siguientes son los principales factores y sus mecanismos de acción:

##### Temperatura de trabajo

**Función:** Los filamentos de tungsteno generalmente funcionan a 2500-2800 °C. La alta temperatura acelera la evaporación de los átomos de tungsteno, lo que resulta en un adelgazamiento del diámetro y una mayor resistencia.

**Detalles técnicos:** A 2700 °C, la tasa de evaporación es de aproximadamente 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h, y la tasa de adelgazamiento del diámetro es de 0,1-0,5 μm/h. Por ejemplo, en un microscopio electrónico de barrido (SEM), después de que el diámetro del filamento se adelgaza de 0,2 mm a 0,15 mm, la densidad de corriente de emisión disminuye en un 20% y la vida útil se acorta a 500 horas. Por cada aumento de 100 °C en la temperatura, la tasa de evaporación aumenta aproximadamente 4 veces y la vida útil disminuye en un 50%.

**Estrategia de optimización:** Inhibir el crecimiento del grano mediante dopaje con potasio (0,01-0,05 % en peso) y reducir la tasa de evaporación en un 30%. Los recubrimientos superficiales (como el óxido de circonio, espesor de 0,5-1 micra) reducen la tasa de evaporación en un 50% y extienden la vida útil a 1500 horas.

##### Entorno de vacío

**Acción:** Los gases residuales (como el oxígeno y el nitrógeno) desencadenan la oxidación de la superficie o la descarga del arco, acelerando la degradación del filamento.

**Detalles técnicos:** Bajo un vacío de 10<sup>-5</sup> Pa, la presión parcial de oxígeno > 0.01 Pa conducirá a la formación de trióxido de tungsteno (WO<sub>3</sub>, [www.tungsten-oxide.com](http://www.tungsten-oxide.com)), aumentará la función de trabajo en 0.1-0.2 eV y reducirá la eficiencia de emisión en un 15%. La descarga del arco (tasa de ocurrencia del 0,01%) puede causar la rotura del filamento o daños en el electrodo. Por ejemplo, en los tubos de rayos X, cuando el grado de vacío es insuficiente a 10<sup>-7</sup> Pa, la vida útil del filamento se reduce de 2000 horas a 1000 horas.

**Estrategia de optimización:** Utilice un sistema de alto vacío (10<sup>-8</sup> Pa) equipado con una bomba turbomolecular (velocidad de bombeo 500-2000 L/s) para reducir la tasa de oxidación en un 80%. El horneado a alta temperatura (400 °C, 24 horas) elimina el gas residual y prolonga la vida útil en un 25%.

##### Ciclo térmico y estrés térmico

**Acción:** El ciclo de calor y frío del cañón de electrones (20-2700 °C, velocidad de calentamiento 100 °C/s) induce estrés térmico, lo que resulta en micro grietas en los límites de grano.

**Detalles técnicos:** Después de 1000 ciclos térmicos, la tasa de agrietamiento de los filamentos de tungsteno puro alcanzó el 5% y la resistencia a la tracción disminuyó en un 10% (de 800 MPa a 720 MPa). En la microscopía electrónica de transmisión (TEM), la tensión térmica hizo que el haz se

desplazara 0,5 nm, lo que afectó a la resolución. El dopaje con renio (0,1-1% en peso) mejoró la ductilidad y redujo la tasa de agrietamiento al 1%.

Estrategia de optimización: La optimización de la geometría del filamento (por ejemplo, doble hélice, aumentando el área de emisión en un 30%) dispersa el estrés térmico y reduce la tasa de grieta en un 20%. El calentamiento lento (50 °C/s) reduce la acumulación de tensión y prolonga la vida útil en un 15%.

#### Carga de corriente

Efecto: La alta corriente de emisión (por ejemplo, 10-100 mA) aumenta la carga térmica del filamento, acelerando la evaporación y la fatiga mecánica.

Detalles técnicos: En la soldadura por haz de electrones (EBW), una corriente de 100 mA provoca un aumento local de la temperatura del filamento en 50 °C, aumenta la tasa de evaporación en un factor de 2 y reduce la vida útil de 1000 horas a 600 horas. La fluctuación de corriente >1% provoca falta de uniformidad térmica, lo que resulta en un aumento del 10% en la tasa de rotura.

Estrategia de optimización: Utilizando una fuente de alimentación de corriente constante (precisión  $\pm 0,1$  mA) para controlar la estabilidad de la corriente, la tasa de rotura se reduce en un 50%. Los filamentos en espiral multisección reducen el sobrecalentamiento local a través de la emisión segmentada y prolongan la vida útil en un 20%.

#### Defectos de fabricación

Efecto: Los defectos superficiales (como arañazos, inclusiones,  $Ra > 0,05$  micras) o los poros internos provocan un sobrecalentamiento local y roturas.

Detalles técnicos: Los arañazos superficiales causan una desviación del 5% en la densidad de corriente y una desviación del patrón de  $>1$  nm en EBL. Los poros internos (diámetro  $>1$  micra) reducen la resistencia a la tracción en un 15% y la tasa de rotura alcanza el 2%. Por ejemplo, la vida útil de los filamentos SEM se reduce de 1500 horas a 800 horas debido a la acumulación de óxido en la superficie.

Estrategia de optimización: El pulido electroquímico ( $Ra < 0,05$  micras) elimina los defectos superficiales y mejora la uniformidad de las emisiones en un 15%. La tomografía de rayos X (resolución de 0,1 micras) detecta defectos internos y reduce la tasa de desechos al 0,3%.

#### Dopaje y calidad del recubrimiento

Función: La falta de uniformidad de los elementos dopantes y el recubrimiento afecta la estabilidad térmica y la eficiencia de las emisiones.

Detalles técnicos: El dopaje de potasio (0,01-0,05 % en peso) con una desviación del  $>5\%$  conduce a un tamaño de grano desigual (2-10 micras) y una disminución del 10% en la estabilidad térmica. El recubrimiento de itria (espesor de 0,1-1 micra) con una tasa de pelado del  $>1\%$  expone el sustrato de tungsteno y aumentará la tasa de oxidación en un 50%. En TEM, los defectos del recubrimiento reducen el brillo en un 20% (de  $10^7$  a  $8 \times 10^6$  A/cm<sup>2</sup>·sr).

Estrategia de optimización: La pulvimetalurgia garantiza la uniformidad del dopaje (desviación  $<1\%$ ), la deposición química de vapor (CVD) controla la desviación del espesor del recubrimiento  $<5\%$  y prolonga la vida útil en un 30%.

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

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

#### 4.4.2 Análisis del modo de fallo (como evaporación, fractura)

Los modos de falla de los filamentos de tungsteno incluyen principalmente evaporación, fractura, degradación de la superficie y descarga de arco, cada uno de los cuales tiene un impacto significativo en la vida útil y el rendimiento. A continuación se presenta un análisis detallado:

##### Evaporación

Definición: Los átomos de tungsteno escapan de la superficie a altas temperaturas, lo que resulta en un adelgazamiento del diámetro del filamento y una degradación del rendimiento.

Mecanismo: A 2700 °C, la tasa de evaporación es de 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h, el diámetro se adelgaza entre 0,1 y 0,5 μm/h, la resistencia aumenta en un 20% y la densidad de corriente de emisión disminuye en un 30%. Por ejemplo, en SEM, después de que el filamento se evapora a un diámetro de <0,15 mm, el brillo cae de 10<sup>6</sup> a 5×10<sup>5</sup> A/cm<sup>2</sup>·sr, y la calidad de la imagen disminuye.

Factores que influyen: temperatura de trabajo (>2600 °C), vacío (>10<sup>-7</sup> Pa), rugosidad de la superficie (Ra>0,05 micras).

Método de análisis: Observar el cambio de diámetro mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) (precisión ±0,1 micras) y medir la tasa de evaporación mediante análisis termogravimétrico (TGA, precisión ±0,01 mg).

Medidas de optimización: El dopaje de aluminio (0,005-0,02 % en peso) reduce la tasa de evaporación en un 30%, y el recubrimiento de óxido de circonio (espesor de 0,5 micras) reduce la tasa de evaporación en un 50%. El sistema de monitoreo inteligente (medición de temperatura por infrarrojos, precisión ± 2 °C) ajusta la temperatura en tiempo real y prolonga la vida útil en un 20%.

##### Fractura

Definición: Fractura frágil o dúctil del filamento causada por estrés térmico o fatiga mecánica.

Mecanismo: El ciclo térmico (20-2700 °C, 1000 veces) induce microgrietas (longitud de 1 a 10 micras) en los límites de grano y la resistencia a la tracción disminuye en un 15%. La alta corriente (>10 mA) provoca un sobrecalentamiento local y aumenta la tasa de fractura en un 10%. Por ejemplo, en EBW, la rotura del filamento provoca la interrupción de la soldadura y un tiempo de inactividad >4 horas.

Factores que influyen: Tamaño de grano (>5 micras), estrés térmico (>100 MPa), defectos superficiales (profundidad de rayado >1 micra).

Métodos de análisis: Análisis de fracturas (SEM, aumento 1000 veces) para determinar la causa de las grietas (límite de grano o superficie), difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) para analizar la orientación del grano (<110> representa el 80%).

Medidas de optimización: El dopaje con renio (0,1-1 % en peso) mejora la ductilidad en un 20%, el diseño de doble hélice dispersa la tensión y la tasa de fractura se reduce en un 30%. El calentamiento lento (50 °C/s) reduce el choque térmico y prolonga la vida útil en un 15%.

##### Degradación de la superficie

Definición: Degradación del rendimiento de la superficie causada por oxidación, acumulación de contaminantes o descamación del recubrimiento.

Mecanismo: A 10<sup>-5</sup> Pa, el oxígeno desencadena la formación de WO<sub>3</sub> (espesor de 0,1-1 micras),

la función de trabajo aumenta en 0,2 eV y la eficiencia de emisión disminuye en un 15%. El peeling del recubrimiento ( $>1\%$ ) expone el sustrato de tungsteno y aumenta la tasa de oxidación en un 50%. Por ejemplo, en los tubos de rayos X, la degradación de la superficie reduce la resolución de la imagen a 0,8 mm.

Factores que influyen: grado de vacío ( $>10^{-7}$  Pa), calidad del recubrimiento (desviación de uniformidad $>5\%$ ), gas residual ( $O_2>0.01$  Pa).

Método de análisis: La espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS, precisión  $\pm 0,1$  at%) analiza la composición química de la superficie, y la microscopía de fuerza atómica (AFM, precisión  $\pm 1$  nm) mide la rugosidad ( $R_a<0,05$  micras).

Medidas de optimización: El alto vacío ( $10^{-8}$  Pa) reduce la tasa de oxidación en un 80%, y el recubrimiento de deposición de capa atómica (ALD) (espesor 10-50 nm) mejora la adherencia y reduce la tasa de pelado al 0,5%.

#### Descarga de arco

Definición: Descarga anormal causada por gas residual o defectos superficiales, que resulta en daño o rotura del filamento.

Mecanismo: A  $10^{-6}$  Pa, la tasa de ocurrencia del arco es del 0.01% y la temperatura local aumenta  $>3000$  °C, causando fusión o fractura. Por ejemplo, en TEM, el arco hace que el haz se desplace 1 nm y la resolución caiga a 0,3 nm.

Factores que influyen: grado de vacío ( $>10^{-7}$  Pa), rugosidad de la superficie ( $R_a>0,05$  micras), espaciado de electrodos (desviación $>0,01$  mm).

Método de análisis: el osciloscopio de alta frecuencia (frecuencia de muestreo de 1 GHz) registra la forma de onda del arco, el espectrómetro de masas (precisión  $\pm 0,01$  ppm) analiza el gas residual.

Medidas de optimización: el diseño de precisión del electrodo (tolerancia de espaciado  $\pm 0,01$  mm) reduce el riesgo de arco en un 50%, el horneado a alta temperatura (400 °C, 24 horas) elimina el gas y la tasa de incidencia cae a 0 ascendido.

Medidas de optimización: el diseño de electrodos de precisión (tolerancia de espaciado  $\pm 0,01$  mm) reduce el riesgo de arco en un 50%, el horneado a alta temperatura (400 °C, 24 horas) elimina el gas y la tasa de incidencia cae al 0,001%.

#### 4.4.3 Método de ensayo de fiabilidad

La prueba de confiabilidad evalúa la vida útil, el rendimiento, la estabilidad y el riesgo de falla de los filamentos de tungsteno a través de métodos estandarizados para garantizar su confiabilidad en aplicaciones prácticas. Los siguientes son los principales métodos de prueba:

##### Prueba de vida acelerada

Definición: simular el funcionamiento a largo plazo en condiciones de alta temperatura y alta corriente para predecir la vida útil del filamento.

Método: Opere en una cámara de vacío a 2700 °C,  $10^{-7}$  Pa durante 1000 horas, con una corriente de emisión de 10-100 mA y registrando la disminución de la densidad de corriente (objetivo  $<5\%$ ).

Mida el diámetro (SEM, precisión  $\pm 0,1$  micras) y la resistencia (método de cuatro sondas,  $\pm 0,1$

$\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) cada 100 horas.

Escenario de aplicación: En las pruebas de filamentos SEM, la prueba de vida acelerada predice una vida útil de 1500 horas y una tasa de evaporación de  $0,02\text{ mg/cm}^2\cdot\text{h}$ , que cumple con la norma GB/T 15065.

Detalles técnicos: Utilice un picoamperímetro (precisión  $\pm 0,1\ \mu\text{A}$ ) para medir la corriente y un termómetro infrarrojo ( $\pm 5\ ^\circ\text{C}$ ) para controlar la temperatura. Ajuste los datos a la distribución de Weibull y prediga el tiempo de fallo (error  $< 5\%$ ).

Optimización: La plataforma de pruebas automatizada (tiempo de respuesta  $< 1\ \text{s}$ ) mejora la eficiencia en un  $50\%$  y la consistencia de los lotes en un  $> 99\%$ .

#### Prueba de ciclo térmico

Definición: Simular ciclos térmicos y fríos ( $20\text{-}2700\ ^\circ\text{C}$ , 1000 veces) para evaluar el estrés térmico y la estabilidad mecánica.

Método: Velocidad de calentamiento  $100\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ , enfriamiento a  $20\ ^\circ\text{C}$ , tiempo de ciclo 10 minutos.

Detección de grietas (SEM, aumento 1000 veces) y resistencia a la tracción (máquina de ensayo universal,  $\pm 0,1\ \text{MPa}$ ).

Escenario de aplicación: En las pruebas de filamentos TEM, las pruebas de ciclo térmico muestran que la tasa de agrietamiento de los filamentos dopados con renio es del  $< 1\%$  y la resistencia a la tracción se mantiene en  $400\ \text{MPa}$ .

Detalles técnicos: EBSD se utiliza para analizar la orientación del grano ( $< 110$  representa el  $80\%$ ), y el análisis de fracturas determina la causa de las grietas (límite de grano o superficie). La prueba cumple con la norma ISO 11539.

Optimización: El calentamiento lento ( $50\ ^\circ\text{C}/\text{s}$ ) reduce la tasa de grietas en un  $20\ \%$  y el sistema de registro automático (precisión  $\pm 0,1\ \%$ ) mejora la fiabilidad de los datos.

#### Ensayo de estabilidad de emisiones

Definición: Mide las fluctuaciones de corriente y la disminución del brillo durante el funcionamiento a largo plazo.

Método: Funcionamiento a  $2600\ ^\circ\text{C}$ ,  $10^{-8}\ \text{Pa}$  durante 500 horas, corriente de emisión  $1\text{-}10\ \mu\text{A}$ , fluctuaciones récord (objetivo  $< 0,5\%$ ). Utilice picoamperímetro ( $\pm 0,01\ \mu\text{A}$ ) y medidor de brillo ( $10^5\text{-}10^8\ \text{A/cm}^2\cdot\text{sr}$ ).

Escenario de aplicación: En las pruebas de filamentos EBL, las pruebas de estabilidad muestran una fluctuación de corriente del  $0,1\%$  y una disminución del brillo del  $< 3\%$ , cumpliendo con los requisitos de la fabricación de chips de nodo de  $7\ \text{nm}$ .

Detalles técnicos: La corriente se ajusta mediante un sistema de control de retroalimentación (tiempo de respuesta  $< 1\ \text{ms}$ ) y los datos se ajustan a la distribución normal ( $\sigma < 1\%$ ). La prueba sigue la norma DIN EN 60695.

Optimización: El algoritmo de IA (precisión  $> 95\%$ ) predice las tendencias de fluctuación, ajusta los parámetros de la fuente de alimentación y mejora la estabilidad en un  $10\%$ .

#### Prueba de antioxidación

Definición: Evaluar la estabilidad de la superficie del filamento en un entorno de trazas de oxígeno.

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

Método: Mida el espesor de la capa de óxido (XPS,  $\pm 0,1$  nm) a  $10^{-5}$  Pa, 2600 °C durante 1000 horas con una presión parcial de oxígeno de 0,01 Pa.

Escenario de aplicación: Espesor de la capa de óxido de filamento recubierto de itria  $< 0,1$  micras y cambio de función de trabajo  $< 0,1$  eV en pruebas de filamentos de tubos de rayos X.

Detalles técnicos: Observación SEM de la morfología de los óxidos (granos  $WO_3 < 100$  nm), medición TGA de la pérdida de masa ( $\pm 0,01$  mg). Las pruebas cumplen con la norma ISO 6848.

Optimización: El alto vacío ( $10^{-8}$  Pa) reduce la tasa de oxidación en un 80%, el recubrimiento ALD (espesor 10 nm) mejora la resistencia a la oxidación en un 50%.

Análisis del modo de error

Definición: Identificar las causas de los fallos y proponer medidas de mejora a través de múltiples medios técnicos.

Método: Combine SEM (análisis de fracturas), XPS (química de superficies), EBSD (estructura de granos) y TGA (tasa de evaporación) para analizar la evaporación, fractura, degradación de la superficie y descarga de arco.

Escenario de aplicación: En la prueba de filamento EBW, el análisis muestra que el 80% de las fallas son causadas por la oxidación de la superficie, y la vida útil se extiende en un 40% después de mejorar el proceso de recubrimiento.

Detalles técnicos: Los datos se integran en el modelo FMECA (Failure Mode, Effects and Hazard Analysis) y la prioridad de riesgo (RPN) es de  $< 100$ . El informe de análisis cumple con los requisitos de la norma ISO 9001.

Optimización: El aprendizaje automático (precisión  $> 95\%$ ) predice los modos de fallo, optimiza el dopaje (renio 0,1% en peso) y el recubrimiento (circonio 0,5 micras), y la tasa de desechos se reduce al 0,2%.

Las pruebas de fiabilidad garantizan la estabilidad de los filamentos en aplicaciones reales. Los datos de prueba deben registrarse durante 5 años de acuerdo con las normas ISO 9001 y GB/T 9383. En el futuro, es necesario desarrollar una plataforma de pruebas integrada multiparamétrica (coste reducido al 50% del nivel actual) y mejorar la eficiencia en un 30%.

#### 4.5 MSDS de filamento de tungsteno de cañón de electrones de CTIA GROUP LTD

La hoja de datos de seguridad de materiales (MSDS) proporciona información estandarizada sobre el uso, el almacenamiento y la eliminación seguros de los filamentos de tungsteno para pistolas de electrones, de acuerdo con los requisitos de GB/T 16483 y OSHA. Los siguientes son detalles para garantizar el cumplimiento de la seguridad durante la producción, el transporte y el uso.

Parte I: Nombre del producto

Nombre en inglés: filamento de tungsteno por haz de electrones

Nº CAS: 7440-33-7

Parte II: Ingredientes/Información de composición

Contenido en  $\geq 99,95\%$

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

Contenido total de impurezas  $\leq 0.05\%$

### Parte III: Resumen de Peligros

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

Contacto con los ojos: Levante los párpados y enjuague con agua corriente o solución salina. Busca atención médica.

Inhalación: Dejar la escena al aire libre. Si tiene dificultad para respirar, administre oxígeno. Busca atención médica.

Ingestión: Beba abundante agua tibia e induzca el vómito. Busca atención médica.

### Parte V: Medidas de extinción de 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 ignífugos de cuerpo completo y extinguir los incendios en la dirección de barlovento. Agente extintor de incendios: Polvo de cuero seco, arena y tierra.

### Parte VI: Tratamiento de emergencia por fugas

Tratamiento de emergencia: Aísle el área contaminada con fugas y restrinja la entrada y salida. Corta la fuente de fuego. Se recomienda que el personal de respuesta a emergencias use máscaras contra el polvo (máscaras faciales completas) y ropa antitóxica. Evite levantar polvo, límpielo con cuidado, colóquelo en una bolsa y transfíralo a un lugar seguro. Si hay una gran cantidad de fugas, cúbrala con láminas de plástico o lona. Recójalo y recíclalo o transpórtelo a un sitio de tratamiento de desechos para su eliminación.

### Parte VII: Explotación, eliminación y almacenamiento

Precauciones de operación: Los operadores deben someterse a una capacitación especial y cumplir estrictamente con los procedimientos operativos. Se recomienda que los operadores usen máscaras antipolvo con filtro autocebante, gafas protectoras de seguridad química, ropa de trabajo anti-penetración tóxica 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 generar polvo. Evite el contacto con oxidantes y halógenos. Cargue y descargue suavemente durante el transporte para evitar daños al embalaje y a los contenedores. Equipar con los tipos y cantidades correspondientes de equipos de extinción de incendios y equipos de tratamiento de emergencia de fugas. Los recipientes vacíos pueden tener sustancias nocivas residuales.

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

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

debe mezclarse. Equipar con los tipos y cantidades correspondientes de equipos de extinción de incendios. El área de almacenamiento debe estar equipada con materiales adecuados para contener las fugas.

Parte VIII.: Control de contactos/Protección personal

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

MAC de la antigua Unión Soviética (mg/m<sup>3</sup>): 6

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

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

Método de monitoreo: Espectrofotometría de tiocianato de potasio-cloruro de titanio

Control de ingeniería: El proceso de producción está libre de polvo y totalmente ventilado.

Protección del sistema respiratorio: Cuando la concentración de polvo en el aire supera la norma, se debe usar una mascarilla antipolvo con filtro autocebante. Al rescatar y evacuar en una emergencia, se debe usar un respirador de aire.

Protección ocular: Use anteojos de seguridad química.

Protección corporal: Use ropa de trabajo que evite la penetración tóxica.

Protección de las manos: Use guantes de goma.

Parte IX: Propiedades físicas y químicas

Ingredientes principales: Puro

Apariencia y Propiedades: Sólido, metálico 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 saturado (kPa): Sin datos

Calor de combustión (kJ/mol): Sin datos

Temperatura crítica (°C): Sin datos

Presión crítica (MPa): Sin datos

Logaritmo del coeficiente de partición del agua: sin datos

Punto de inflamación (°C): Sin datos

Temperatura de ignición (°C): Sin datos

% del límite superior de explosión (v/v): sin datos

% del límite inferior de explosión (v/v): sin datos

Solubilidad: Soluble en ácido nítrico y ácido fluorhídrico

Parte X: Estabilidad y reactividad

Incompatibilidad prohibida: ácidos y bases fuertes

Parte XI:

Toxicidad aguda: No hay datos

LC50: Sin datos

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

Parte XII: Información ecológica

No hay datos para esta parte

Parte XIII: Eliminación de residuos

Propiedades de los residuos Métodos de eliminación de residuos: Consulte las normativas nacionales y locales pertinentes antes de eliminarlos. Recicla si es posible.

Parte XIV: Información de transporte

Categoría de embalaje: Z01

Precauciones de transporte: El embalaje debe estar completo y la carga debe ser segura en el momento del envío. Durante el transporte, asegúrese de que el contenedor no tenga fugas, colapse, caiga o se dañe. Está terminantemente prohibido mezclar y transportar con oxidantes, halógenos, productos químicos comestibles, etc. Durante el transporte, debe protegerse de la exposición a la luz solar, la lluvia y las altas temperaturas. El vehículo debe limpiarse a fondo después del transporte.

Parte XV: Información para proveedores

Proveedor: CTIA GROUP LTD

Tel: 0592-5129696/5129595



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

## Capítulo 5: Propósito y aplicación del filamento de tungsteno en el cañón de electrones

Los filamentos de tungsteno en los cañones de electrones se utilizan ampliamente en la investigación científica, la fabricación industrial, los equipos médicos y las tecnologías emergentes. Su alto punto de fusión, baja presión de vapor y alta eficiencia de emisiones los convierten en los componentes centrales de los cañones de electrones, impulsando una variedad de aplicaciones, desde imágenes a nanoescala hasta procesamiento de alta precisión. Este capítulo analiza en detalle los usos específicos de los filamentos de tungsteno en pistolas de electrones, dispositivos electrónicos de vacío, aplicaciones de investigación industrial y científica y campos emergentes, y analiza sus requisitos de rendimiento, desafíos técnicos y direcciones de optimización.

### 5.1 Aplicación en cañón de electrones

Los cañones de electrones utilizan filamentos de tungsteno para generar haces de electrones de alta energía y se utilizan ampliamente en microscopios, equipos de procesamiento y fabricación de semiconductores. Esta sección explora el papel clave de los filamentos de tungsteno en la microscopía electrónica de barrido (SEM), la microscopía electrónica de transmisión (TEM), la soldadura y el corte por haz de electrones y la litografía por haz de electrones.

#### 5.1.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM) utiliza un haz de electrones generado por un filamento de tungsteno para escanear la superficie de una muestra y forma una imagen de alta resolución mediante la detección de electrones secundarios, electrones retrodispersados o rayos X característicos. Es ampliamente utilizado en ciencia de materiales, biología y análisis de semiconductores. La resolución de SEM suele ser de 1-5 nm y la profundidad de campo es grande, lo que es adecuado para observar estructuras tridimensionales complejas.

El filamento de tungsteno en SEM debe proporcionar un alto brillo y un haz de electrones estable. Las condiciones de trabajo típicas incluyen:

Corriente de emisión: 1-10  $\mu\text{A}$ , la fluctuación debe mantenerse por debajo del 1% para garantizar la estabilidad de la imagen.

Brillo:  $10^5$ - $10^6$  A/cm<sup>2</sup>·sr, afecta a la resolución y a la intensidad de la señal.

Temperatura de trabajo: 2500-2700 °C, equilibrando la eficiencia de emisiones y la vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-7}$  Pa, para evitar la oxidación y la descarga del arco.

Los filamentos de tungsteno afectan directamente a la resolución y la calidad de imagen del SEM. Por ejemplo, en el modo de alta resolución, el filamento debe proporcionar un haz de electrones con un ancho de haz estrecho (<5 nm), y el dopaje de potasio (0,01-0,05 % en peso) puede mejorar la uniformidad de las emisiones en un 15% optimizando la estructura del grano. Los recubrimientos

superficiales (como el óxido de itrio, de 0,1-1 micras de espesor) reducen la función de trabajo (de 4,5 eV a 4,2 eV) y aumentan el brillo en un 20%, lo que es adecuado para observar características a nanoescala, como defectos en obleas semiconductoras o ultraestructuras de muestras biológicas.

La vida útil del filamento es un factor clave en los costes operativos del SEM. La vida útil estándar del filamento de tungsteno es de 500 a 2000 horas y se puede extender a 3000 horas optimizando el dopaje y el recubrimiento. Por ejemplo, los filamentos de doble hélice aumentan el área de emisión para reducir el sobrecalentamiento local y aumentar la vida útil en un 30%. En aplicaciones prácticas, el ciclo de reemplazo de filamento afecta el tiempo de inactividad del equipo, y el sistema de alineación de filamento automatizado (precisión  $\pm 1$  micra) puede reducir el tiempo de mantenimiento en un 50%.

Los desafíos técnicos incluyen:

**Estabilidad de la emisión:** Las fluctuaciones de corriente ( $>1\%$ ) causan ruido en la imagen, lo que requiere una fuente de alimentación de corriente constante (precisión  $\pm 0,1$  mA) y un entorno de alto vacío.

**Vida útil y costo:** La sustitución frecuente de los filamentos aumenta los costos operativos y es necesario desarrollar filamentos de larga duración (objetivo de 5.000 horas).

**Miniaturización:** El SEM portátil requiere que el diámetro del filamento se reduzca a 0,05-0,1 mm manteniendo un alto brillo.

Las estrategias de optimización incluyen el uso de tratamiento de superficies a nanoescala (como pulido por plasma,  $R_a < 0,02$  micras) y sistemas de monitoreo inteligentes (detección en tiempo real de corriente y temperatura) para reducir la tasa de desperdicio a menos del 0,5% y mejorar la calidad de la imagen en un 10%.

### 5.1.2 Microscopía electrónica de transmisión (TEM)

La microscopía electrónica de transmisión (TEM) utiliza haces de electrones de alta energía para penetrar en muestras delgadas y generar imágenes de resolución a nivel atómico (0,1-0,2 nm). Es ampliamente utilizado en el análisis de estructuras cristalinas, la caracterización de nanomateriales y la obtención de imágenes biomoleculares. TEM tiene requisitos de rendimiento más altos para los filamentos de tungsteno que SEM, lo que requiere un mayor brillo y un ancho de haz más estrecho.

El filamento de tungsteno en TEM incluye:

**Corriente de emisión:** 10-50  $\mu$ A, con una fluctuación inferior al 0,5% necesaria para garantizar una resolución a nivel atómico.

**Brillo:**  $10^7$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·SR, se requiere una alta eficiencia de emisiones para admitir imágenes de alta resolución.

Temperatura de trabajo: 2600-2800 °C, se requiere una alta estabilidad térmica para mantener el funcionamiento a largo plazo.

Grado de vacío:  $10^{-8}$  Pa, para evitar la dispersión del haz de electrones y la oxidación del filamento.

Los filamentos de tungsteno son la clave para la resolución TEM. Por ejemplo, en TEM de alta resolución (HRTEM), el filamento debe proporcionar un haz de electrones con un ancho de haz de  $<0,5$  nm. El dopaje con recubrimiento de aluminio (0,005-0,02 % en peso) y óxido de itrio aumenta el brillo en un 30% y reduce la función de trabajo a 4,2 eV, cumpliendo con los requisitos de las imágenes sub-angstrom. Los filamentos de doble hélice o cónicos mejoran el enfoque del haz al optimizar la distribución del campo eléctrico y reducen la desviación del ancho del haz en un 20%.

La vida útil del filamento es particularmente importante para los TEM debido al alto costo de reemplazo (incluido el mantenimiento del sistema de vacío). Los filamentos optimizados tienen una vida útil de 800-1500 horas a 2600 °C, y los filamentos dopados con renio (0,1-1 % en peso) pueden alcanzar las 2000 horas, lo que reduce la fractura mecánica al aumentar la ductilidad. El pulido de superficies ( $R_a < 0,05$  micras) y el entorno de alto vacío ( $10^{-8}$  Pa) reducen la tasa de evaporación en un 50% y prolongan la vida útil en un 25%.

Los desafíos técnicos incluyen:

Alto requisito de brillo: TEM requiere  $10^8$  A/cm<sup>2</sup>· Brillo SR, que es difícil de cumplir con filamentos de tungsteno puro. Se necesitan nuevos recubrimientos o materiales compuestos.

Deriva térmica: Las fluctuaciones de la temperatura del filamento ( $>5$  °C) provocan una deriva del haz y requieren un control preciso de la temperatura ( $\pm 2$  °C).

Larga vida útil: La alta temperatura de funcionamiento acelera la evaporación y es necesario desarrollar recubrimientos resistentes a altas temperaturas (como el óxido de circonio).

Las estrategias de optimización incluyen el uso de filamentos de tungsteno nanoestructurados (tamaño de grano  $<100$  nm) para mejorar la eficiencia de las emisiones en un 20% y la integración de un sistema de monitoreo de IA para predecir la vida útil del filamento y reducir los fallos inesperados en un 50%.

### 5.1.3 Soldadura y corte por haz de electrones

La soldadura y el corte por haz de electrones (EBBW) utilizan un haz de electrones de alta energía (10-100 kW) generado por un filamento de tungsteno para derretir o vaporizar materiales para un procesamiento de alta precisión. Es ampliamente utilizado en las industrias aeroespacial, automotriz y nuclear. EBW puede formar soldaduras profundas (relación profundidad-ancho  $>20:1$ ) y tiene una precisión de corte de  $\pm 0,01$  mm.

El filamento de tungsteno en EBW y corte incluye:

Corriente de emisión: 10-100 mA, alta corriente admite salida de alta potencia.

Voltaje de aceleración: 50-150 kV, generando haz de electrones de alta energía.

Temperatura de trabajo: 2600-2800 °C, debe soportar altas cargas de calor.

Grado de vacío:  $10^{-5}$  Pa, se permite un ligero gas residual.

El filamento debe proporcionar un haz de electrones estable y de alta potencia. Por ejemplo, en EBW, el filamento genera un haz de electrones de 60 kW, y al soldar aleación de titanio (50 mm de espesor), el ancho de soldadura es de <1 mm y la zona afectada por el calor es de <0,5 mm. Los filamentos dopados con potasio mejoran la estabilidad térmica al inhibir el crecimiento del grano y tienen una vida útil de 1000 horas. Los recubrimientos superficiales (como el óxido de circonio) reducen la función de trabajo y aumentan la densidad de corriente de emisión en un 20%, lo que admite una salida de alta potencia.

En aplicaciones de corte, el filamento debe proporcionar un haz de electrones con un ancho de haz estrecho (<0,1 mm). Al cortar acero inoxidable (espesor 10 mm), la suavidad de corte Ra es de <0,1 micras. El filamento de doble hélice aumenta el área de emisión para mejorar la estabilidad del haz, y la fluctuación de corriente es del <1%. El entorno de alto vacío ( $10^{-5}$  Pa) reduce la dispersión del haz y garantiza la precisión del procesamiento.

Los desafíos técnicos incluyen:

Estabilidad de alta potencia: Las fluctuaciones de corriente (>2%) conducen a soldaduras desiguales, lo que requiere una fuente de alimentación de corriente constante (precisión  $\pm 0,5$  mA).

Vida útil del filamento: La alta corriente acelera la evaporación, lo que requiere un filamento de larga duración (objetivo de 2000 horas).

Gas residual: El oxígeno a  $10^{-5}$  Pa puede causar oxidación y requerir una capa protectora de la superficie.

Las estrategias de optimización incluyen el uso de filamentos compuestos de tungsteno (como el óxido de tungsteno-itrinio) para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 30% y un sistema de monitoreo de corriente de haz en tiempo real (precisión  $\pm 0,1$   $\mu$ A) para garantizar la consistencia del procesamiento.

#### 5.1.4 Litografía por haz de electrones

La litografía por haz de electrones (EBL) utiliza un haz de electrones generado por un filamento de

tungsteno para escribir directamente patrones a nanoescala para fabricar dispositivos semiconductores, máscaras y nanoestructuras. La resolución puede alcanzar los  $<10$  nm y es ampliamente utilizada en la investigación y desarrollo de chips y la fabricación de dispositivos cuánticos.

El filamento de tungsteno en el EBL incluye:

Corriente de emisión: 1-10 nA, se requiere una estabilidad extremadamente alta (fluctuación  $<0,1\%$ ).

Brillo:  $10^7$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·sr, admite enfoque a nanoescala.

Temperatura de funcionamiento: 2500-2700 °C, emisión equilibrada y vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-8}$  Pa, para evitar la dispersión del haz.

La consistencia de la emisión del filamento es la clave del EBL. Por ejemplo, cuando se fabrican chips de nodo de 7 nm, el filamento debe proporcionar un haz de electrones con un ancho de haz de  $<5$  nm. El dopaje con recubrimientos de óxido de aluminio e itrio aumentará el brillo en un 25%, lo que garantiza una precisión del patrón de  $\pm 1$  nm. El filamento de doble hélice mejora la estabilidad del haz al optimizar la distribución del campo eléctrico, y la desviación de corriente es del  $<0,05\%$ . La vida útil del filamento debe ser de más de 500 horas. Debido al alto costo de mantenimiento de los equipos EBL, los filamentos dopados con renio pueden alcanzar las 1.000 horas y la tasa de evaporación se reduce en un 40%.

Los desafíos técnicos incluyen:

Estabilidad ultra alta: Las fluctuaciones de corriente ( $>0,1\%$ ) causan distorsión del patrón, lo que requiere una fuente de alimentación ultraprecisa (precisión  $\pm 0,01$  nA).

Larga vida útil: La demanda de alto brillo acelera la pérdida de filamento y requiere nuevos materiales (como el tungsteno nanoestructurado).

Enfoque del haz: Los patrones a nanoescala requieren anchos de haz subnanométricos, lo que requiere una geometría de filamento y un diseño de electrodo optimizados.

Las estrategias de optimización incluyen el uso de recubrimientos de emisión asistida por campo (como thoria) para aumentar el brillo en un 30% y un sistema integrado de retroalimentación de haz (tiempo de respuesta  $<1$  ms) para garantizar la calibración en tiempo real.

## 5.2 Dispositivos electrónicos de vacío

Los dispositivos de electrones de vacío utilizan filamentos de tungsteno para generar corrientes de electrones, impulsando tecnologías de microondas, rayos X y pantallas. En esta sección se analizan

sus aplicaciones en tubos de microondas, tubos de rayos X y tubos de rayos catódicos.

### 5.2.1 Tubos de microondas (como magnetrones y tubos de onda viajera)

Los tubos de microondas utilizan filamentos de tungsteno para generar flujo de electrones, que genera ondas electromagnéticas de alta frecuencia bajo la acción de campos magnéticos o eléctricos. Son ampliamente utilizados en radar, comunicaciones por satélite y calentamiento por microondas. Los magnetrones se utilizan en hornos de microondas y radares militares, y los tubos de onda viajera (TWT) se utilizan en comunicaciones de alta frecuencia.

El filamento de tungsteno en el tubo de microondas incluye:

Corriente de emisión: 1-10 mA, estabilidad <1% requerida para garantizar la calidad de la señal.

Temperatura de funcionamiento: 2400-2600 °C, emisión equilibrada y vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-6}$  Pa, para evitar la formación de arcos y la oxidación.

Potencia de salida: Magnetron 1-10 kW, TWT 10-100 W.

En un magnetron, el filamento proporciona 5 mA de corriente de electrones, generando microondas de 2,45 GHz con una potencia de 1 kW. Los filamentos dopados con potasio prolongan su vida útil a 5.000 horas al mejorar la estabilidad térmica, lo que los hace adecuados para hornos microondas domésticos. Los tubos de onda viajera requieren una mayor estabilidad, con fluctuaciones de corriente de filamento del <0,5%. El dopaje con recubrimientos de aluminio y óxido de itrio aumenta la eficiencia de las emisiones en un 20%, soportando señales de alta frecuencia de 10 GHz.

Los desafíos técnicos incluyen:

Alta estabilidad: Las fluctuaciones de corriente (>1%) causan distorsión de la señal y requieren una fuente de alimentación de precisión (precisión  $\pm 0,1$  mA).

Larga vida útil: La salida de alta potencia acelera la evaporación y requiere un recubrimiento resistente a altas temperaturas.

Miniaturización: El satélite TWT requiere un diámetro de filamento < 0,1 mm para mantener una alta emisión.

Las estrategias de optimización incluyen el uso de filamentos de grano a nanoescala (granos <100 nm) para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 15 % y la tecnología de envasado al vacío ( $10^{-7}$  Pa) para prolongar la vida útil en un 30 %.

### 5.2.2 Tubo de rayos X

Los tubos de rayos X utilizan filamentos de tungsteno para generar haces de electrones, que bombardean objetivos metálicos (como el tungsteno o el molibdeno) para producir rayos X. Son ampliamente utilizados en imágenes médicas (tomografías computarizadas, máquinas de rayos X) y pruebas industriales no destructivas.

El filamento de tungsteno en el tubo de rayos X incluye:

Corriente de emisión: 1-10 mA, admite rayos X de alta intensidad.

Voltaje de aceleración: 30-150 kV, determina la energía de rayos X.

Temperatura de trabajo: 2500-2700 °C, se requiere alta estabilidad térmica.

Grado de vacío:  $10^{-7}$  Pa, para evitar la oxidación y la formación de arcos.

El filamento debe proporcionar una alta eficiencia de emisión y una larga vida útil. Por ejemplo, en la tomografía computarizada, el filamento genera una corriente de electrones de 5 mA, produce rayos X de 120 kV y tiene una resolución de imagen de <0,5 mm. Los filamentos dopados con potasio tienen una vida útil de 1000 a 3000 horas, y los recubrimientos de superficie (como el óxido de circonio) aumentan la densidad de corriente de emisión en un 20%, lo que respalda imágenes de alto rendimiento. Los filamentos de doble hélice reducen el sobrecalentamiento local al aumentar el área de emisión y prolongan la vida útil en un 25%.

Los desafíos técnicos incluyen:

Requisitos de alta intensidad: Los rayos X de alta dosis requieren una alta corriente (>10 mA), lo que acelera la pérdida de filamento.

Gestión térmica: La distancia entre el filamento y el objetivo es pequeña (<10 mm) y se requiere una disipación de calor eficiente.

Coste de por vida: La sustitución frecuente de filamentos aumenta los costes de mantenimiento de los equipos médicos.

Las estrategias de optimización incluyen el uso de un filamento compuesto de tungsteno (por ejemplo, óxido de tungsteno-itrio) para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 30%, y un sistema de refrigeración integrado (refrigeración por agua, caudal de 0,5 L/min) para reducir la temperatura del filamento en 50 °C.

### 5.2.3 Tubo de rayos catódicos (CRT)

Los tubos de rayos catódicos (CRT) utilizan filamentos de tungsteno para generar haces de electrones que bombardean una pantalla fluorescente para producir imágenes. Se utilizan en

pantallas tradicionales, monitoreo industrial e instrumentos de aviación. Aunque los LCD y los OLED están reemplazando gradualmente a los CRT, todavía se utilizan en áreas específicas (como las pantallas de alta confiabilidad).

El filamento de tungsteno en CRT incluye:

Corriente de emisión: 0,1-1 mA, baja corriente admite la función de visualización.

Temperatura de trabajo: 2000-2200 °C, la baja temperatura prolonga la vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-6}$  Pa, para evitar la contaminación de la pantalla fluorescente.

Voltaje de aceleración: 10-30 kV, produce imágenes brillantes.

El filamento debe proporcionar un flujo de electrones estable y de baja potencia. Por ejemplo, en las pantallas de aviación, el filamento genera un flujo de electrones de 0,5 mA, produce imágenes de alto contraste y tiene una vida útil de 5.000 a 10.000 horas. Los filamentos dopados con potasio aumentan la eficiencia de las emisiones en un 15% al reducir la función de trabajo. Los filamentos de una sola hélice tienen una estructura simple y un bajo costo, lo que los hace adecuados para la producción a gran escala.

Los desafíos técnicos incluyen:

Larga vida útil: el CRT debe tener una vida útil ultralarga (>10.000 horas), y la evaporación a alta temperatura es el cuello de botella.

Bajo consumo de energía: La pantalla requiere una baja potencia calorífica (<50 W) y una geometría de filamento optimizada.

Adaptabilidad al entorno: Los CRT de aviación deben soportar vibraciones (10-100 Hz) y cambios de temperatura (-40 a 70 °C).

Las estrategias de optimización incluyen el uso de recubrimientos de baja función de trabajo (como el óxido de torio) para reducir la temperatura de funcionamiento en 100 °C y un diseño antivibración (precisión de fijación del filamento de  $\pm 1$  micra) para mejorar la confiabilidad en un 20%.

### 5.3 Otras aplicaciones de la investigación industrial y científica

Los filamentos de tungsteno tienen aplicaciones importantes en la deposición de películas delgadas, fuentes de iones, espectrómetros de masas y dispositivos experimentales de fusión nuclear, apoyando la producción industrial y la investigación científica de vanguardia.

#### 5.3.1 Deposición de película delgada (como deposición física de vapor)

La deposición física de vapor (PVD) utiliza un filamento de tungsteno para generar un haz de

electrones para evaporar o pulverizar materiales para depositar películas delgadas (0,1-10 micras de espesor) para aplicaciones en recubrimientos ópticos, fabricación de semiconductores y recubrimientos resistentes al desgaste.

El filamento de tungsteno en PVD incluye:

Corriente de emisión: 1-10 mA, admite la evaporación del material.

Temperatura de trabajo: 2500-2700 °C, se requiere alta estabilidad térmica.

Grado de vacío:  $10^{-6}$  Pa, para evitar la contaminación de la película.

Potencia de salida: 1-10 kW, impulsando la fuente de evaporación.

El filamento debe proporcionar un haz de electrones estable y de alta energía. Por ejemplo, en los recubrimientos ópticos, el filamento genera una corriente de electrones de 5 mA, evapora el dióxido de silicio (SiO<sub>2</sub>) y deposita una película antirreflectante con un espesor de 0,5 micras y una uniformidad del  $\pm 1\%$ . Los filamentos dopados con aluminio aumentan la eficiencia de las emisiones en un 20%, y los filamentos de doble hélice reducen las fluctuaciones de corriente al  $< 1\%$ , lo que garantiza la calidad de la película.

Los desafíos técnicos incluyen:

Uniformidad de película delgada: La corriente desigual del haz conduce a una desviación del espesor y es necesario optimizar la geometría del filamento.

Larga vida útil: La alta potencia acelera la evaporación y requiere un recubrimiento resistente a altas temperaturas.

Compatibilidad de materiales: Diferentes materiales de evaporación requieren un ajuste de los parámetros del haz.

La estrategia de optimización incluye el uso de un filamento en espiral multisegmento para mejorar la uniformidad del haz en un 15% y un sistema de control del haz en tiempo real (precisión  $\pm 0,1 \mu\text{A}$ ) para garantizar la consistencia de la deposición.

### 5.3.2 Fuente de iones y espectrómetro de masas

La fuente de iones utiliza un filamento de tungsteno para generar un flujo de electrones, ionizando las moléculas de gas para formar un haz de iones, que se utiliza en espectrometría de masas, implantación de iones y análisis de superficies. Los espectrómetros de masas se utilizan para el análisis químico con una resolución de  $10^{-6}$  Da.

El filamento de tungsteno en la fuente de iones incluye:

Corriente de emisión: 0,1-1 mA, se requiere alta estabilidad (fluctuación <0,1%).

Temperatura de funcionamiento: 2400-2600 °C, emisión equilibrada y vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-7}$  Pa, para evitar la dispersión del haz de iones.

Eficiencia de ionización: >10%, lo que admite análisis de alta sensibilidad.

El filamento debe proporcionar un flujo de electrones estable y de baja potencia. Por ejemplo, en un espectrómetro de masas, el filamento genera un flujo de electrones de 0,5 mA, ionizando helio y produciendo una señal de iones de  $10^6$  cps. El filamento dopado con potasio tiene una vida útil de 2000 horas, y el pulido de la superficie ( $R_a < 0,05$  micras) reduce las fluctuaciones de corriente en un 50%, mejorando la precisión analítica.

Los desafíos técnicos incluyen:

Estabilidad ultra alta: Las fluctuaciones de corriente (>0,1%) reducen la resolución y requieren una fuente de alimentación de precisión.

Larga vida útil: La sustitución frecuente de los filamentos afecta a la eficiencia del análisis.

Miniaturización: Los espectrómetros de masas portátiles requieren filamentos pequeños (diámetro < 0,1 mm).

Las estrategias de optimización incluyen el uso de recubrimientos de asistencia a las emisiones en el campo para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 20% y un sistema integrado de retroalimentación de corriente (tiempo de respuesta <1 ms) para garantizar la estabilidad.

### 5.3.3 Dispositivo experimental de fusión nuclear

Los dispositivos experimentales de fusión nuclear (como los tokamaks y la fusión por confinamiento inercial) utilizan filamentos de tungsteno para generar flujo de electrones de alta energía, impulsar plasma o sistemas de diagnóstico y estudiar el comportamiento del plasma a alta temperatura.

El filamento de tungsteno en el dispositivo de fusión nuclear incluye:

Corriente de emisión: 10-100 mA, admite plasma de alta potencia.

Temperatura de trabajo: 2700-3000 °C, se requiere una estabilidad térmica extremadamente alta.

Grado de vacío:  $10^{-8}$  Pa, para evitar la contaminación.

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

Resistencia a la radiación: Resistente a los neutrones y a los rayos gamma.

El filamento debe soportar condiciones extremas. Por ejemplo, en un tokamak, el filamento genera 50 mA de corriente de electrones, impulsa un plasma de 1 keV y funciona durante 1000 horas. Los filamentos dopados con renio resisten el choque térmico al aumentar la ductilidad, y los recubrimientos de óxido de circonio reducen la tasa de evaporación en un 50%, lo que permite el funcionamiento a alta temperatura.

Los desafíos técnicos incluyen:

Ambientes extremos: Las altas temperaturas (>3000°C) y la radiación aceleran la degradación del filamento.

Alta potencia: La alta corriente (>100 mA) requiere una alta eficiencia de transmisión.

Larga vida: El dispositivo tiene altos costos de mantenimiento y requiere filamentos de ultra larga vida (>5000 horas).

Las estrategias de optimización incluyen el uso de materiales compuestos a base de tungsteno (como el carburo de tungsteno-tungsteno) para mejorar la resistencia a la radiación en un 30 % y la tecnología de sellado al vacío ( $10^{-9}$  Pa) para prolongar la vida útil en un 40 %.

#### 5.4 Áreas de aplicación emergentes

Los filamentos de tungsteno han mostrado un gran potencial en campos emergentes como la impresión 3D, la propulsión espacial y la nanotecnología, impulsando la innovación tecnológica.

##### 5.4.1 Fusión por haz de electrones en la impresión 3D

La fusión por haz de electrones (EBM) utiliza un filamento de tungsteno para generar un haz de electrones de alta energía (50-100 kW) para fundir polvos metálicos y fabricar piezas complejas con una precisión de  $\pm 0,1$  mm. Es ampliamente utilizado en implantes aeroespaciales y médicos.

El filamento de tungsteno en EBM incluye:

Corriente de emisión: 10-50 mA, admite fusión de alta potencia.

Voltaje de aceleración: 60-100 kV, generando haz de alta energía.

Temperatura de trabajo: 2600-2800 °C, se requiere alta estabilidad térmica.

Grado de vacío:  $10^{-5}$  Pa, se permite un ligero polvo.

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

El filamento debe proporcionar un haz de electrones estable y de alta potencia. Por ejemplo, cuando se fabrican piezas de aviación de aleación de titanio, el filamento genera un flujo de electrones de 30 mA, funde el polvo para formar un espesor de capa de 0,05 mm y la rugosidad de la superficie  $Ra < 5$  micras. La vida útil del filamento dopado con potasio es de hasta 1000 horas, y el filamento de doble hélice mejora la estabilidad del haz en un 20%.

Los desafíos técnicos incluyen:

Estabilidad de alta potencia: Las fluctuaciones de corriente ( $>2\%$ ) dan como resultado un espesor de capa desigual.

Contaminación por polvo: El polvo metálico puede contaminar el filamento y requerir una capa protectora.

Larga vida útil: La alta potencia acelera la evaporación y requiere materiales resistentes a altas temperaturas.

La estrategia de optimización incluye el uso de un recubrimiento de óxido de torio para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 30% y un sistema de escaneo de haz (precisión  $\pm 0,1$  mm) para garantizar la uniformidad de la fusión.

#### 5.4.2 Fuentes de electrones en sistemas de propulsión espacial

Los filamentos de tungsteno se utilizan como fuentes de electrones en propulsores iónicos y propulsores de efecto Hall para ionizar propulsores (como el xenón) para generar empuje, que se utilizan en satélites y exploración del espacio profundo.

Los filamentos de tungsteno en la propulsión espacial incluyen:

Corriente de emisión: 1-10 mA, admite una ionización eficiente.

Temperatura de trabajo: 2500-2700 °C, se requiere una larga vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-8}$  Pa, capaz de soportar el vacío espacial.

Resistencia a la radiación: Resistente a los rayos cósmicos y al viento solar.

El filamento debe proporcionar un flujo constante de electrones. Por ejemplo, en un propulsor iónico, el filamento genera 5 mA de electrones, ionizando el gas xenón para producir 0,1 N de empuje, y tiene una vida útil de varios años. Los filamentos dopados con renio soportan las vibraciones (10-100 Hz) al aumentar la ductilidad, y los recubrimientos de óxido de itrio prolongan la vida útil en un 50%.

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

Los desafíos técnicos incluyen:

Vida ultralarga: Las misiones espaciales requieren una vida útil de >10.000 horas.

Adaptabilidad al entorno: Necesidad de soportar -100 a 100 °C y radiación.

Bajo consumo de energía: Los propulsores requieren una baja potencia calorífica (<100 W).

Las estrategias de optimización incluyen el uso de filamentos asistidos por emisiones de campo para reducir la temperatura de funcionamiento en 100 °C y recubrimientos resistentes a la radiación, como el óxido de circonio, para mejorar la confiabilidad en un 30%.

### 5.4.3 Nanotecnología y micro-nanoprocetamiento

Los filamentos de tungsteno generan haces de electrones en deposición inducida por haz de electrones (EBID) y nanolitografía para fabricar estructuras a nanoescala para aplicaciones en sensores, dispositivos cuánticos y MEMS con una resolución de 1-5 nm.

El filamento de tungsteno en el procesamiento micro-nano incluye:

Corriente de emisión: 0,1-1 nA, se requiere una estabilidad ultra alta (fluctuación <0,05%).

Brillo:  $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·SR, admite el enfoque a nanoescala.

Temperatura de trabajo: 2500-2700 °C, se requiere una larga vida útil.

Grado de vacío:  $10^{-8}$  Pa, para evitar la dispersión del haz.

El filamento debe proporcionar un haz de electrones con un ancho de haz extremadamente estrecho. Por ejemplo, en EBID, el filamento genera una corriente de electrones de 0,5 nA y deposita nanohilos de carbono (diámetro <5 nm) con una precisión de ±0,5 nm. Dopar el filamento con un recubrimiento de aluminio y óxido de torio aumenta el brillo en un 30% y la vida útil en 500 horas.

Los desafíos técnicos incluyen:

Resolución ultra alta: se requiere un ancho de haz de <1 nm y es necesario optimizar la geometría del filamento.

Estabilidad: Las fluctuaciones de corriente (>0,05%) conducen a defectos estructurales.

Miniaturización: Los equipos de nanofabricación requieren filamentos pequeños (diámetro < 0,05 mm).

La estrategia de optimización incluye el uso de filamentos de tungsteno nanoestructurados para aumentar la eficiencia de las emisiones en un 20%, y un sistema de calibración del haz (precisión  $\pm 0,01$  nA) para garantizar la precisión del procesamiento.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

## Capítulo 6: Desafíos técnicos y desarrollo futuro del filamento de haz de electrones

El filamento de tungsteno por haz de electrones desempeña un papel clave en la obtención de imágenes de alta precisión, el procesamiento y la investigación científica. Sin embargo, con el aumento de la demanda de aplicaciones, los filamentos de tungsteno se enfrentan a retos técnicos en términos de vida útil, eficiencia, miniaturización y adaptabilidad al entorno. Al mismo tiempo, los nuevos materiales, las tecnologías inteligentes y la fabricación ecológica ofrecen nuevas oportunidades para el desarrollo de filamentos de tungsteno. Este capítulo analiza en detalle los desafíos técnicos actuales, los nuevos materiales y tecnologías, la fabricación inteligente y ecológica, así como las futuras tendencias de desarrollo, y analiza el potencial de los filamentos de tungsteno en los cañones de electrones de alto rendimiento y los campos emergentes.

### 6.1 Desafíos técnicos actuales del filamento de tungsteno por haz de electrones

El filamento de tungsteno en el cañón de electrones afecta directamente la resolución, la estabilidad y el costo operativo del dispositivo. En esta sección se analizan los principales desafíos técnicos en términos de vida útil del filamento, eficiencia de emisiones y miniaturización y requisitos de alta precisión.

#### 6.1.1 Prolongación de la vida útil del filamento

Los filamentos de tungsteno (500-2000 horas) son un factor clave que limita la eficiencia y el costo

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

de la operación del cañón de electrones, especialmente en aplicaciones de alto brillo (como la microscopía electrónica de transmisión, TEM), donde los filamentos deben funcionar durante largos períodos de tiempo a 2600-2800 °C, lo que provoca evaporación y degradación mecánica. Estos son los principales desafíos:

Evaporación a alta temperatura: A 2700 °C, la tasa de evaporación del tungsteno es de aproximadamente 0,01-0,05 mg/cm<sup>2</sup>·h, lo que resulta en un adelgazamiento del diámetro del filamento (0,1-0,5 μm/h), un aumento de la resistencia y una disminución del 30% en la eficiencia de emisión. Por ejemplo, en SEM, cuando el diámetro del filamento se reduce de 0,2 mm a 0,15 mm, la densidad de corriente de emisión disminuye en un 20% y la calidad de la imagen disminuye significativamente.

Fatiga térmica: Los ciclos de calor y frío del cañón de electrones (20-2700 °C, velocidad de calentamiento 100 °C / s) inducen estrés térmico y se forman fácilmente microgrietas en los límites de grano. Las pruebas muestran que después de 1.000 ciclos, la tasa de agrietamiento de los filamentos de tungsteno puro alcanza el 5%, mientras que la de los filamentos dopados con potasio se reduce al 1%, pero aún no es suficiente para cumplir con los requisitos de vida útil ultralarga (>5.000 horas).

Degradación de la superficie: bajo un vacío de 10<sup>-5</sup> Pa, el oxígeno residual hace que la oxidación de la superficie forme trióxido de tungsteno, lo que reduce la función de trabajo en 0.1-0.2 eV y la eficiencia de emisión en un 15%. La acumulación de óxido también puede causar una descarga de arco y dañar el cañón de electrones.

Coste y mantenimiento: La sustitución frecuente de filamentos aumenta el tiempo de inactividad de los equipos y los costes de mantenimiento. Por ejemplo, el reemplazo del filamento TEM tarda de 4 a 8 horas e implica el mantenimiento del sistema de vacío, con un costo único de hasta miles de dólares.

Las estrategias de respuesta incluyen el uso de recubrimientos resistentes a altas temperaturas (como óxido de circonio, espesor de 0,5-1 micra) para reducir la tasa de evaporación en un 50%, dopaje con renio (0,1-1 % en peso) para mejorar la ductilidad y reducir las grietas en un 30%, y optimizar el sistema de vacío (10<sup>-8</sup> Pa) para minimizar la oxidación. El objetivo es alargar la vida útil del filamento a 5000 horas y reducir la frecuencia de mantenimiento en un 50%.

### 6.1.2 Mejora de la eficiencia de la transmisión

La eficiencia de emisión determina el brillo y la calidad del haz de electrones, lo que afecta directamente la resolución y la precisión del procesamiento del cañón de electrones. La función de trabajo del filamento de tungsteno puro (4,5 eV) es relativamente alta, lo que limita la densidad de corriente de emisión (1-5 A/cm<sup>2</sup>). Los principales retos son los siguientes:

Alta función de trabajo: a 2600 °C, la densidad de corriente de emisión de los filamentos de

tungsteno es de solo  $3-5 \text{ A/cm}^2$ , lo que es difícil de cumplir con los requisitos de TEM (requiere  $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{sr}$ ) o litografía por haz de electrones (EBL, requiere una corriente estable de  $10 \text{ nA}$ ). El dopaje con aluminio ( $0,005-0,02 \%$  en peso) puede reducir la función de trabajo a  $4,3 \text{ eV}$  y aumentar la eficiencia de emisión en un  $15\%$ , pero aún no es suficiente para competir con los cátodos de emisión de campo (función de trabajo  $<3 \text{ eV}$ ).

Uniformidad de las emisiones: Los defectos superficiales (como arañazos, óxidos,  $R_a > 0,05 \text{ micras}$ ) provocan campos eléctricos locales desiguales y desviaciones de la densidad de corriente de hasta el  $5\%$ , lo que afecta a la calidad de las imágenes SEM o a la precisión del patrón EBL. El pulido electroquímico puede reducir la rugosidad de la superficie a  $0,02 \text{ micras}$ , pero el costo es alto y el proceso es complicado.

Estabilidad de la corriente: Las fluctuaciones de la temperatura del filamento ( $>5 \text{ }^\circ\text{C}$ ) o la fluctuación de corriente ( $>1\%$ ) provocan desviaciones de la corriente del haz y reducen la resolución. Por ejemplo, en EBL, las fluctuaciones de corriente del  $0,1\%$  conducen a desviaciones del patrón  $>1 \text{ nm}$ , lo que requiere fuentes de alimentación de ultraprecisión (precisión  $\pm 0,01 \text{ nA}$ ).

Requisitos de alta temperatura: Mejorar la eficiencia de las emisiones requiere una temperatura de funcionamiento más alta ( $>2800 \text{ }^\circ\text{C}$ ), pero acelera la evaporación y acorta la vida útil en un  $50\%$ . Por ejemplo, cuando la temperatura aumenta de  $2600 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $2800 \text{ }^\circ\text{C}$ , la densidad de corriente de emisión aumenta 2 veces, pero la tasa de evaporación aumenta 4 veces.

Las estrategias incluyen el desarrollo de recubrimientos de baja función de trabajo (como óxido de torio, función de trabajo  $4.1 \text{ eV}$ ) para mejorar la eficiencia de emisiones en un  $30\%$ , optimizar la estructura del grano (tamaño  $2-4 \text{ micras}$ ) para mejorar la uniformidad de las emisiones en un  $20\%$  e integrar el sistema de retroalimentación del haz (tiempo de respuesta  $<1 \text{ ms}$ ) para garantizar la estabilidad de la corriente. El objetivo es aumentar la densidad de corriente de emisión a  $10 \text{ A/cm}^2$  y el brillo a  $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{Sr}$ .

### 6.1.3 Requisitos de miniaturización y alta precisión

Con el auge de los dispositivos portátiles (como el SEM de mano) y la nanofabricación (como el EBID), los filamentos deben miniaturizarse (diámetro  $< 0,1 \text{ mm}$ ) y cumplir con los requisitos de alta precisión. Los principales retos son los siguientes:

Fabricación por miniaturización: El diámetro del filamento se reduce de  $0,2 \text{ mm}$  a  $0,05 \text{ mm}$ , lo que requiere procesos de estirado y bobinado de ultra precisión (tolerancia  $\pm 1 \text{ micra}$ ). El control del grano de filamentos diminutos es más difícil, y los tamaños de grano  $>5 \text{ micras}$  son propensos a la fractura frágil, con una tasa de fractura del  $10\%$ . El dopaje de potasio puede optimizar el grano ( $2-3 \text{ micras}$ ), pero el costo aumenta en un  $20\%$ .

Haz de alta precisión: La nanofabricación requiere un ancho de haz de  $<1 \text{ nm}$ , y el filamento debe proporcionar  $10^8 \text{ A/cm}^2 \cdot \text{brillo SR}$  y  $0,05\%$  de estabilidad de corriente. El área de emisión del microfilamento es pequeña y la desviación de la densidad de corriente puede alcanzar fácilmente el

5%, por lo que es necesario optimizar la geometría (como el filamento cónico) y la distribución del campo eléctrico.

Gestión térmica: El área de disipación de calor del microfilamento es pequeña, el riesgo de sobrecalentamiento local aumenta en un 50% y el gradiente de temperatura puede alcanzar los 100 °C / mm, lo que resulta en deriva térmica y desviación del haz. Por ejemplo, en EBID, una fluctuación de temperatura de 5 °C provoca una desviación del haz de 0,5 nm, lo que reduce la precisión del procesamiento.

Estabilidad mecánica: Los microfilamentos son propensos al desplazamiento (>1 micra) en un entorno de vibración (10-100 Hz), lo que afecta al enfoque del haz. Los dispositivos portátiles y de aviación requieren una precisión de fijación del filamento de  $\pm 0,5$  micras, lo que requiere una nueva estructura de soporte.

Las estrategias incluyen la mejora de la precisión de la fabricación mediante el uso de un proceso de trefilado a nanoescala (tolerancia  $\pm 0,5$  micras), el desarrollo de recubrimientos de alta conductividad térmica (como el carburo de tungsteno) para mejorar la gestión térmica y reducir el gradiente de temperatura en un 30%, y la integración de microelectrodos (paso <0,1 mm) para optimizar la uniformidad del campo eléctrico. El objetivo es reducir el diámetro del filamento a 0,05 mm y controlar el ancho del haz dentro de 0,5 nm.

## 6.2 Nuevos materiales y tecnologías para filamentos de tungsteno por haz de electrones

Para abordar los desafíos anteriores, los nuevos materiales y tecnologías (como los compuestos a base de tungsteno, los filamentos de tungsteno nanoestructurados y los materiales catódicos alternativos) proporcionan nuevos caminos para mejorar el rendimiento del filamento.

### 6.2.1 Materiales compuestos a base de tungsteno

Los materiales compuestos a base de tungsteno mejoran la estabilidad térmica, la eficiencia de emisión y las propiedades mecánicas de los filamentos mediante la adición de fases de refuerzo o recubrimientos funcionales. Las siguientes son las principales direcciones de desarrollo:

Aleación de tungsteno-renio: La adición de 0,1-5 % en peso de renio aumenta la ductilidad en un 10%, reduce la tasa de fluencia a alta temperatura en un 30% y prolonga la vida útil en un 40%. Los átomos de renio optimizan la plasticidad de la red y reducen las grietas por fatiga térmica. Por ejemplo, los filamentos de tungsteno-renio ( [www.tungsten-rhenium.com](http://www.tungsten-rhenium.com) ) tienen una vida útil de 3000 horas a 2800 °C y una reducción del 20% en la tasa de evaporación.

Compuesto de óxido de tungsteno: el dopaje con óxido de itrio ( $Y_2O_3$ , 0,5-2 % en peso) u óxido de circonio ( $ZrO_2$ , 0,1-1 % en peso) forma una fase dispersa a nanoescala, inhibe el crecimiento del grano, mantiene el tamaño del grano en 2-3 micras y aumenta la resistencia a la tracción en un 15%. El óxido también reduce la función de trabajo a 4,2 eV y aumenta la densidad de corriente de emisión en un 25%, lo que lo hace adecuado para TEM de alto brillo.

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

Compuesto de carburo de tungsteno: La adición de carburo de tungsteno (WC, 0,1-0,5 % en peso) aumenta la dureza de la superficie (HV 2000), mejora la resistencia al desgaste en un 50% y es adecuada para la soldadura por haz de electrones de alta potencia. La capa de carburo de tungsteno (espesor de 0,1 micras) también mejora la resistencia a la oxidación y reduce la tasa de oxidación en un 60%.

Tecnología de fabricación: La pulvimetalurgia y la pulverización por plasma se utilizan para preparar filamentos compuestos que garanticen una distribución uniforme de los elementos dopantes (desviación <1%). La sinterización por láser puede formar fases de refuerzo a nanoescala y aumentar la resistencia del límite de grano en un 20%.

Los desafíos incluyen el alto costo de los materiales compuestos (30-50% más alto que el tungsteno puro) y el procesamiento complejo (sinterización a alta temperatura, >2000 °C). En el futuro, las tecnologías de preparación de bajo costo, como la deposición química de vapor (CVD), deben optimizarse para reducir los costos en un 20%.

### 6.2.2 Filamento de tungsteno nanoestructurado

Los filamentos de tungsteno nanoestructurados mejoran el rendimiento al controlar el tamaño de grano (<100 nm) y la morfología de la superficie, lo que los hace especialmente adecuados para aplicaciones de miniaturización y alta precisión. Las siguientes son las tecnologías clave:

Tungsteno nanocristalino: el tamaño del grano se reduce a 50-100 nm, la densidad límite del grano aumenta en un 50%, la resistencia a la tracción aumenta en un 20% (a 1200 MPa) y la ductilidad se incrementa en un 10%. La estructura nanocristalina dispersa el estrés térmico a través del deslizamiento del límite de grano y las grietas por fatiga térmica se reducen en un 40%. Por ejemplo, la vida útil de los filamentos nanocristalinos a 2700 °C es de 2500 horas.

Ingeniería de superficies a nanoescala: el grabado por plasma y la deposición de capas atómicas (ALD) se utilizan para formar texturas a nanoescala ( $R_a < 0,01$  micrómetros), lo que aumenta la proporción de planos de cristal {100} expuestos en un 30%, reduce la función de trabajo a 4,3 eV y aumenta la densidad de corriente de emisión en un 25%. Los nano-recubrimientos (como el óxido de torio, con un espesor de 10-50 nm) reducen aún más la función de trabajo a 4.1 eV, y el brillo alcanza  $10^8$  A / cm<sup>2</sup> · Sr.

Microfabricación: Deposición electroquímica y micromecanizado láser para producir filamentos de 0,05 mm de diámetro con una tolerancia de ±0,5 micras. El proceso de trefilado a nanoescala controla la orientación del grano (<110> representa el 80%) y mejora la uniformidad de las emisiones en un 15%.

Gestión térmica : La nanoestructura aumenta el área superficial específica, mejora la conductividad térmica en un 10% (a 190 W/m·K) y reduce el gradiente de temperatura en un 30%, lo que la hace adecuada para microfilamentos.

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

Los desafíos incluyen el alto costo de la preparación de la nanoestructura (50% más alto que los filamentos tradicionales) y problemas de estabilidad (los granos pueden crecer a altas temperaturas). En el futuro, es necesario desarrollar tecnología de sinterización a baja temperatura (<1500 °C) y recubrimientos autorreparables para mantener estable la nanoestructura.

### 6.2.3 Materiales catódicos alternativos (por ejemplo, nanotubos de carbono, cátodos de emisión de campo)

Con el fin de superar el cuello de botella de rendimiento de los filamentos de tungsteno, los materiales alternativos de los cátodos (como los nanotubos de carbono y los cátodos de emisión de campo) se han convertido en un punto caliente de investigación. Las siguientes son las direcciones principales:

Nanotubos de carbono (CNT): Los CNT tienen una función de trabajo baja (2,5-3 eV) y una alta densidad de corriente (>10<sup>9</sup> A/cm<sup>2</sup>), no requieren funcionamiento a alta temperatura (<500 °C) y tienen una vida útil de hasta 10.000 horas. Los cátodos CNT proporcionan un ancho de haz de <1 nm en EBL, que es adecuado para el nanoprocesamiento. Sin embargo, los CNT tienen poca estabilidad mecánica y son propensos a romperse en un entorno de vibración (10-100 Hz), lo que requiere el apoyo de un sustrato compuesto (como el silicio).

Cátodo de emisión de campo (FEC): Basado en el principio de descarga de la punta, FEC (como aguja de tungsteno u óxido de tungsteno de circonio) proporciona 10<sup>9</sup> A/cm<sup>2</sup>·brillo sr a temperatura ambiente, función de trabajo 2.9 eV y estabilidad de corriente 0.01%. FEC alcanza una resolución de 0,1 nm en TEM de alta resolución, pero requiere un vacío extremadamente alto (10<sup>-10</sup> Pa) y cuesta 10 veces más que los filamentos de tungsteno.

Los materiales bidimensionales como el grafeno y el MoS<sub>2</sub> tienen una baja función de trabajo (3-3,5 eV) y una alta estabilidad química, que son adecuados para microcátodos. Los cátodos de grafeno proporcionan una corriente estable de 0,1 mA en la fuente de iones y tienen una vida útil de 5000 horas, pero el proceso de preparación es complejo y el rendimiento es del <50%.

Desafíos e integración: Los materiales alternativos deben superar los costos de fabricación, la adaptabilidad ambiental y la compatibilidad con los cañones de electrones existentes. Los filamentos de tungsteno se pueden combinar con CNT o FEC para formar cátodos híbridos, combinando la estabilidad a alta temperatura y las ventajas de la función de trabajo baja.

En el futuro, es necesario desarrollar una tecnología de crecimiento CNT de bajo costo (reduciendo el costo al doble que el del filamento de tungsteno) y un diseño de cátodo modular para acortar el ciclo de aplicación de materiales alternativos.

## 6.3 Fabricación inteligente y ecológica de filamento de tungsteno por haz de electrones

La fabricación inteligente y ecológica son las direcciones clave para modernizar la industria de filamentos de tungsteno, mejorar la eficiencia de la producción, reducir el consumo de energía y

lograr el desarrollo sostenible.

### 6.3.1 Monitoreo inteligente y control adaptativo

La monitorización inteligente y el control adaptativo optimizan el rendimiento del filamento, prolongan la vida útil y mejoran la estabilidad del cañón de electrones mediante el análisis de datos en tiempo real. Las principales tecnologías son las siguientes:

Sistema de monitoreo en tiempo real: Un termómetro infrarrojo integrado (precisión  $\pm 2$  °C), picoamperímetro (precisión  $\pm 0,1$   $\mu$ A) y vacuómetro ( $10^{-9}$  Pa) monitorean la temperatura, la corriente y el vacío del filamento. Los algoritmos de IA analizan los datos para predecir la vida útil (error  $< 5\%$ ) y el riesgo de fallo. Por ejemplo, cuando el sistema de monitoreo detecta una fluctuación de temperatura de  $> 5$  °C, ajusta automáticamente la potencia de calentamiento para prolongar la vida útil en un 20%.

Control adaptativo: El sistema de control basado en aprendizaje automático ajusta dinámicamente la corriente (precisión  $\pm 0,01$  mA) y el voltaje ( $\pm 0,1$  V), lo que garantiza una estabilidad de emisiones del 0,05%. En EBL, el control adaptativo reduce la desviación del patrón a 0,5 nm y mejora la precisión del procesamiento en un 15%.

Diagnóstico de fallos: El modelo de aprendizaje profundo analiza la morfología de la superficie del filamento (a través de imágenes SEM) y la forma de onda actual para identificar modos de fallo como la evaporación, las grietas y la oxidación con una tasa de precisión del  $> 95\%$ . El sistema puede proporcionar una alerta temprana ( $> 100$  horas), lo que reduce el tiempo de inactividad no planificado en un 50%.

Ejemplos de aplicación: El sistema de monitorización inteligente calibra el haz en tiempo real en SEM, reduciendo la fluctuación de corriente al 0,1% y mejorando la calidad de la imagen en un 10%. El control adaptativo optimiza la potencia de salida en la soldadura por haz de electrones, mejorando la consistencia de la soldadura en un 20%.

Los desafíos incluyen sensores de alto costo (que representan el 10% del costo del dispositivo) y el rendimiento en tiempo real de algoritmos complejos (requiere una respuesta de  $< 1$  ms). En el futuro, es necesario desarrollar sensores de bajo costo (coste reducido al 50% del nivel actual) y módulos de edge computing para mejorar la integración del sistema.

### 6.3.2 Tecnología de producción que ahorra energía y es respetuosa con el medio ambiente

La producción de filamentos de tungsteno implica una fundición de alto consumo de energía ( $> 2000$  °C) y un procesamiento químico, que requiere tecnologías que ahorren energía y sean respetuosas con el medio ambiente para reducir la huella de carbono. Las siguientes son las direcciones principales:

Metalurgia con ahorro de energía: La fusión por arco de plasma se utiliza para reemplazar los hornos de arco tradicionales, reduciendo el consumo de energía en un 30% (a 5 kWh/kg). La sinterización

a baja temperatura (1500 °C) reduce el consumo de energía en un 20% al agregar fundente (como silicio, 0,1 % en peso), manteniendo un tamaño de grano de 2-3 micras.

Tratamiento químico verde: El decapado tradicional (ácido fluorhídrico + ácido nítrico) produce líquidos residuales tóxicos, y el nuevo pulido electroquímico (el electrolito es una solución salina neutra) reduce la descarga de líquidos residuales en un 80% y la rugosidad de la superficie alcanza las 0,02 micras. La limpieza con plasma sustituye a la limpieza química y las emisiones de gases residuales se reducen en un 90%.

Estirado eficiente: La máquina de trefilado servocontrolada (precisión  $\pm 0,5$  micras) optimiza la fuerza de tracción, reduce la rotura del alambre en un 50% y reduce el consumo de energía en un 15%. El trefilado asistido por láser aumenta la velocidad de procesamiento en un 20%, adecuado para microfilamentos (diámetro 0,05 mm).

Impacto ambiental: La tecnología de ahorro de energía reduce las emisiones de carbono de la producción de filamentos de tungsteno de 10 kg de CO<sub>2</sub>/kg a 6 kg de CO<sub>2</sub>/kg, de acuerdo con la norma ISO 14001. Los procesos ecológicos aumentan el rendimiento del producto en un 10% y reducen el desperdicio en un 20%.

Los desafíos incluyen una alta inversión inicial en tecnología verde (un 30% más que los equipos tradicionales) y la estabilidad del proceso. En el futuro, es necesario promover los equipos de producción modulares para acortar el período de recuperación de la inversión a 2 años.

### 6.3.3 Reciclaje y tratamiento de residuos

El reciclaje y el tratamiento de residuos de filamentos de tungsteno pueden reducir el desperdicio de recursos y la contaminación ambiental. Las siguientes son las tecnologías clave:

Recuperación de tungsteno: El método de reducción química recupera el tungsteno de los filamentos de desecho con una pureza del 99,9% y una tasa de recuperación del >95%. El proceso incluye disolución ácida (ácido sulfúrico + ácido clorhídrico), precipitación (ácido tungstático) y reducción de hidrógeno (1000°C), con un consumo de energía de 2 kWh/kg. El tungsteno recuperado se puede utilizar directamente en la producción de nuevos filamentos, reduciendo los costes en un 40%.

Separación del recubrimiento: El recubrimiento de óxido de itria o circonio del filamento de desecho se elimina mediante extracción por plasma, con una tasa de recuperación del 90%, para evitar que el recubrimiento contamine el sustrato de tungsteno. El proceso de decapado no tiene líquidos de desecho químicos y cumple con los estándares de protección ambiental.

Tratamiento de residuos: El polvo de tungsteno (tamaño de partícula <10 micras) en la producción se recoge mediante la eliminación electrostática del polvo, con una tasa de recuperación del 98%, evitando el daño pulmonar (límite de exposición 5 mg/m<sup>3</sup>). El líquido residual se trata mediante neutralización y filtración, con una tasa de cumplimiento de emisiones del 100%.

Economía circular: Los filamentos de tungsteno reciclados representan el 20% de la demanda total y se espera que alcancen el 40% en 2030. El reciclaje reduce la minería de tungsteno en un 30% y reduce el daño ecológico.

Los desafíos incluyen el alto consumo de energía en el proceso de reciclaje y el costo de manejar recubrimientos de bajo valor. En el futuro, es necesario desarrollar tecnología de reciclaje a baja temperatura (consumo de energía reducido a 1 kWh/kg) y equipos de clasificación automatizados para aumentar la eficiencia del reciclaje en un 20%.

#### 6.4 Tendencias futuras de desarrollo de los filamentos de tungsteno por haz de electrones

Los filamentos de tungsteno girarán en torno al diseño de cañones de electrones de alto rendimiento, la integración interdisciplinaria y las aplicaciones en entornos extremos, promoviendo la innovación tecnológica y la mejora industrial.

##### 6.4.1 Diseño de cañón de electrones de alto rendimiento

Los cañones de electrones de alto rendimiento requieren un mayor brillo, una vida útil más larga y un menor consumo de energía para impulsar la obtención de imágenes y el procesamiento a nanoescala. Las siguientes son las tendencias de desarrollo:

Filamentos de brillo ultra alto: Desarrolle filamentos compuestos con función de trabajo  $<4$  eV (como el óxido de tungsteno-torio), con un brillo de hasta  $10^9$  A/cm<sup>2</sup>·sr, cumpliendo con los requisitos de TEM de próxima generación (resolución  $<0,05$  nm) y EBL (ancho de haz  $<0,5$  nm). La ingeniería de superficies a nanoescala (textura  $<10$  nm) mejora la uniformidad de las emisiones en un 20%.

Diseño de larga duración: vida útil  $> 10,000$  horas, el material compuesto de carburo de tungsteno-tungsteno y el recubrimiento autorreparable (zirconia + grafeno) reducen la tasa de evaporación en un 60%. El diseño modular del filamento (tiempo de sustitución  $< 1$  hora) reduce los costes de mantenimiento en un 50%.

Cañón de electrones de baja energía: La geometría optimizada del filamento (como la espiral multisección) reduce la potencia calorífica en un 30% (hasta  $<50$  W), y los microelectrodos integrados (paso de 0,05 mm) aumentan la eficiencia de enfoque del haz en un 20%. La fuente de alimentación de alta eficiencia (eficiencia  $> 95\%$ ) reduce aún más el consumo de energía.

Impulsor de la aplicación: Los cañones de electrones de alto rendimiento admitirán la fabricación de chips de nodo de 6 nm, bioimágenes subnanométricas e impresión 3D de ultra alta precisión (espesor de capa  $< 0,01$  mm).

Los desafíos incluyen el alto costo y la compleja integración de filamentos de alto rendimiento. En el futuro, es necesario desarrollar módulos de cañón de electrones estandarizados para reducir los

costos de producción en un 30%.

#### 6.4.2 Integración interdisciplinaria (como la integración con inteligencia artificial)

La integración interdisciplinaria combina filamentos de tungsteno con inteligencia artificial (IA), big data e Internet de las cosas (IoT) para mejorar el rendimiento y la eficiencia de las aplicaciones. Las siguientes son las tendencias de desarrollo:

Diseño optimizado para IA: La simulación de materiales impulsada por IA (como la teoría del funcional de la densidad, DFT) predice el rendimiento de los materiales compuestos a base de tungsteno, acortando el ciclo de investigación y desarrollo en un 50%. Las redes generativas adversarias (GAN) optimizan la geometría del filamento y aumentan la eficiencia de las emisiones en un 15%.

Funcionamiento inteligente: El sistema de control de IA analiza el estado del filamento (temperatura, corriente, vacío) en tiempo real, ajusta los parámetros de forma adaptativa y prolonga la vida útil en un 30%. En SEM, la IA optimiza la trayectoria del haz y mejora la resolución en un 10%.

Análisis de big data: La plataforma IoT recopila datos globales de funcionamiento de cañones de electrones, analiza los modos de fallo de los filamentos y mejora el diseño. Por ejemplo, el análisis de datos encontró que el 80% de las fallas de los filamentos son causadas por la oxidación de la superficie, lo que impulsó el desarrollo de un nuevo recubrimiento (óxido de torio + grafeno) que aumenta la vida útil en un 40%.

Aplicaciones multidominio: la IA combinada con filamentos de tungsteno permite la fabricación automatizada (como EBM, precisión  $\pm 0,05$  mm) y el diagnóstico inteligente (como TC, resolución  $< 0,1$  mm).

Los desafíos incluyen el alto costo de desarrollo de los algoritmos de IA y los problemas de privacidad de los datos. En el futuro, es necesario establecer una plataforma de datos abiertos para reducir el costo del entrenamiento de algoritmos en un 50%.

#### 6.4.3 Aplicaciones en el espacio y en entornos extremos

Los filamentos de tungsteno tienen un gran potencial de aplicación en entornos extremos como la propulsión espacial, la exploración planetaria y la fusión nuclear. Las siguientes son las tendencias de desarrollo:

Propulsión espacial: Los filamentos de tungsteno se utilizan como fuentes de electrones para los propulsores iónicos, proporcionando una corriente estable de 5-10 mA, un empuje de 0,1 N y una vida útil de  $> 20.000$  horas. Los filamentos dopados con renio son resistentes a la radiación cósmica ( $> 10^6$  rad), y los recubrimientos de óxido de circonio aumentan la resistencia a la oxidación en un 50%. En el futuro, apoyarán la exploración del espacio profundo (como las misiones a Júpiter).

Exploración planetaria: Los filamentos microscópicos de tungsteno (0,05 mm de diámetro) se utilizan en espectrómetros de masas portátiles para analizar el suelo marciano con una resolución de  $10^{-6}$  Da. Los filamentos nanoestructurados soportan cambios de temperatura de -100 a 100°C y tienen una vida útil de 5000 horas.

Fusión nuclear: Los filamentos de tungsteno generan una corriente de electrones de 50-100 mA en tokamaks, impulsan plasma (1 keV) y soportan 3000 °C y radiación de neutrones. Los compuestos de carburo de tungsteno-tungsteno aumentan la resistencia a la radiación en un 30% para respaldar los experimentos de ITER.

Adaptación a ambientes extremos: Desarrollo de filamentos autorreparables (embebidos en nanocápsulas, liberando óxidos para reparar grietas), aumento de la vida útil en un 50%. La tecnología de sellado al vacío ( $10^{-10}$  Pa) garantiza la estabilidad del rendimiento.

Los desafíos incluyen los costos de las pruebas en entornos extremos (>1 millón de dólares por prueba) y la estabilidad del material. En el futuro, es necesario desarrollar una plataforma de prueba de simulación (costo reducido a \$ 100,000) y filamentos compuestos multifuncionales para satisfacer diversas necesidades.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

CTIA GROUP LTD

Electron Beam Tungsten Filaments Introduction

1. Overview of Electron Beam Tungsten Filaments

The electronic beam tungsten filament is a high-performance thermionic cathode component specifically designed for electron beam (EB) equipment. Made from high-purity tungsten material, it features an ultra-high melting point, excellent thermionic emission capability, and long service life, allowing stable operation in high-vacuum environments. It is widely used in fields such as electron beam welding, electron beam evaporation coating, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray tubes.

2. Features of Electron Beam Tungsten Filaments

**Ultra-High Heat Resistance:** Stable operation under high-temperature and high-vacuum conditions for extended periods.

**Excellent Thermionic Emission Performance:** Provides efficient electron emission under low power consumption

**High-Purity Material:**  $W \geq 99.95\%$  reduces contamination during electron emission and ensuring stable device operation.

**Long Service Life:** Resistant to creep, evaporation, and high-temperature oxidation.

**Precision Manufacturing:** Strict dimensional accuracy control ensures a stable electron beam.

**Multiple Structure Options:** Tailored to different electronic gun equipment requirements.

3. Some Types of Electron Beam Tungsten Filaments

Mosquito Coil	Pull-type	U-shaped
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>
U-shaped with Folding Tails	Half Moon	Hook type
 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>	 <p>Filament diameter: 0.55/0.65/ 0.80mm</p>

4. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten.com.cn

Declaración de Derechos de Autor y Responsabilidad Legal

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

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

## Capítulo 7: Normas y especificaciones para filamentos de tungsteno por haz de electrones

Los filamentos de tungsteno por haz de electrones afectan directamente su aplicación en equipos de alta precisión, como microscopios electrónicos de barrido (SEM), tubos de rayos X y equipos de soldadura por haz de electrones. La formulación e implementación de estándares garantizan la consistencia y la alta calidad de los filamentos de tungsteno en términos de propiedades del material, procesos de fabricación, métodos de prueba y protección del medio ambiente. Este capítulo analiza en detalle las normas nacionales (GB), las normas internacionales (ISO), las normas americanas (ANSI), otras normas internacionales e industriales, así como la implementación y certificación de normas, analiza sus aplicaciones específicas en la producción, prueba e internacionalización de filamentos de tungsteno, y proporciona una guía estandarizada para la industria.

### 7.1 Normas nacionales (GB)

Los estándares nacionales de China (GB / T) proporcionan especificaciones detalladas para los materiales, las pruebas y la fabricación de filamentos de tungsteno para garantizar su rendimiento y confiabilidad en pistolas de electrones y dispositivos de electrones de vacío. En esta sección se analizan los requisitos específicos y las aplicaciones de las normas nacionales pertinentes.

#### 7.1.1 Normas relacionadas con GB/T (como las normas de materiales de tungsteno y aleaciones de tungsteno)

La norma nacional para materiales de tungsteno y aleaciones de tungsteno proporciona orientación básica para las materias primas y la preparación de filamentos de tungsteno, que incluye principalmente las siguientes normas:

GB/T 4181-2017 Varillas de tungsteno y aleación de tungsteno: Esta norma especifica la composición química, las propiedades mecánicas, las tolerancias dimensionales y la calidad de la superficie de las varillas de tungsteno y aleación de tungsteno ([www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)). Se requiere que la pureza del tungsteno sea  $\geq 99.95\%$ , el contenido de elementos de impurezas (como hierro y níquel) es  $< 0.01\%$  en peso y los elementos dopantes (como potasio, aluminio, renio) deben estar claramente marcados ( $0.005-5\%$  en peso). La resistencia a la tracción de la varilla es de  $\geq 800$  MPa, el alargamiento a la rotura es del  $\geq 2\%$  y la rugosidad de la superficie Ra es de  $\leq 0,8$  micras. Los filamentos de tungsteno para cañones de electrones generalmente se extraen de varillas que cumplen con este estándar para garantizar una estructura de grano uniforme (tamaño de 2-5 micras) y estabilidad a alta temperatura (punto de fusión  $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

GB/T 4192-2017 Alambre de tungsteno: Especialmente para la fabricación y el rendimiento del alambre de tungsteno, el rango de diámetro es de 0,01-2 mm, la tolerancia es de  $\pm 1$  micra y la superficie está libre de grietas, óxidos o manchas de aceite. Se requiere que el alambre de tungsteno tenga una resistividad estable ( $50-60\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ ) a  $2500\text{ }^{\circ}\text{C}$  y una densidad de corriente de emisión de electrones térmicos  $\geq 1\text{ A/cm}^2$ . La norma también requiere recocido con hidrógeno ( $1200-1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) después del estirado para eliminar la tensión interna y una tasa de rotura del  $< 0,1\%$ . Esta norma es aplicable a los filamentos de tungsteno para tubos SEM y de rayos X para garantizar la uniformidad de la emisión (desviación de corriente  $< 1\%$ ).

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

GB/T 3459-2017 Métodos de análisis químico para tungsteno y aleaciones de tungsteno: especifica los métodos de detección de elementos de impurezas en tungsteno, como la espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES, precisión  $\pm 0,001$  % en peso) y la espectroscopia de absorción atómica (AAS). La norma exige la detección de elementos dopantes como el potasio (0,01-0,05 % en peso) y el aluminio (0,005-0,02 % en peso) para garantizar la consistencia de la composición química y cumplir con los requisitos de rendimiento del cátodo del cañón de electrones.

Estos estándares garantizan la estabilidad de los filamentos de tungsteno a altas temperaturas (2500-2800 °C) y alto vacío ( $10^{-7}$  Pa) mediante la regulación de las materias primas y los procesos de preparación. Por ejemplo, en la producción de TEM, los filamentos de tungsteno que cumplen con GB/T 4192 proporcionan  $10^7$  A/cm<sup>2</sup>·brillo SR, una vida útil de 1000 horas y consistencia de lote >99%.

### 7.1.2 Normas de ensayo y evaluación para materiales de cátodos de cañones de electrones

Los estándares de prueba para materiales de cátodos de cañón de electrones garantizan que el rendimiento eléctrico, térmico y de emisiones de los filamentos de tungsteno cumpla con los requisitos de la aplicación, que incluyen principalmente:

GB/T 15065-2016 Métodos de prueba para materiales catódicos para dispositivos electrónicos: Esta norma especifica los métodos de prueba para la eficiencia, resistividad y vida útil de la emisión térmica de electrones. La prueba de eficiencia de emisión se lleva a cabo en una cámara de vacío de  $10^{-7}$  Pa, y la densidad de corriente se mide utilizando un picoamperímetro (precisión  $\pm 0,1$   $\mu$ A), que debe ser de  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup> a 2600 °C. La resistividad se mide mediante un método de cuatro sondas con una precisión de  $\pm 0,1$   $\mu\Omega\cdot$ cm, y debe ser de 50-60  $\mu\Omega\cdot$ cm a 2500°C. La prueba de vida útil utiliza un envejecimiento acelerado (2700 °C, 1000 horas), lo que requiere una atenuación de emisiones <5%. La norma también requiere la detección de la morfología de la superficie (SEM, Ra<0,05 micras) y la estructura del grano (EBSD, tamaño 2-4 micras).

GB/T 27947-2011 Evaluación del rendimiento del cátodo de los dispositivos electrónicos de vacío: Para la estabilidad térmica, la resistencia a la oxidación y las propiedades mecánicas de los filamentos de tungsteno, se especifica la prueba de ciclo a alta temperatura (20-2600 °C, 1000 veces, tasa de grietas <1%) y la prueba de resistencia a la oxidación ( $10^{-5}$  Pa, 1000 horas, espesor de la capa de óxido <0,1 micras). Las pruebas de rendimiento mecánico incluyen resistencia a la tracción ( $\geq 400$  MPa, 2500 °C) y elongación a la rotura ( $\geq 5\%$ ). La norma se aplica a los cátodos para tubos SEM, TEM y de rayos X.

Estos estándares garantizan el rendimiento del filamento a través de métodos de prueba cuantitativos. Por ejemplo, en EBL, los filamentos que cumplen con GB/T 15065 proporcionan una corriente estable de 10 nA y un ancho de haz de <5 nm, cumpliendo con los requisitos de la fabricación de chips de nodo de 7 nm. Los datos de prueba deben registrarse en el informe de calidad para su revisión por parte de los clientes y los reguladores.

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

### 7.1.3 Especificaciones de fabricación y aceptación de dispositivos electrónicos de vacío

Las normas de fabricación y aceptación de dispositivos electrónicos de vacío regulan la integración y verificación del rendimiento de los filamentos de tungsteno en los cañones de electrones, incluyendo principalmente:

GB/T 9383-2008 Especificación general para dispositivos electrónicos de vacío: especifica el proceso de fabricación, la precisión del ensamblaje y la prueba de rendimiento de los cañones de electrones. Requiere que la precisión de fijación del filamento sea de  $\pm 1$  micra, que la tolerancia de espaciado de los electrodos sea de  $\pm 0,01$  mm y que se garantice la uniformidad del campo eléctrico (desviación  $< 1\%$ ). Las pruebas de rendimiento incluyen la estabilidad de la corriente de emisión (fluctuación  $< 1\%$ ), la tasa de ocurrencia de arco ( $< 0.01\%$ ) y el grado de vacío ( $10^{-7}$  Pa). El estándar también requiere horneado a alta temperatura ( $400^\circ\text{C}$ , 24 horas) para eliminar el gas residual y prolongar la vida útil del filamento en un 20%.

GB/T 11109-2010 Especificación de aceptación del cañón de electrones: especifica el proceso de prueba de aceptación, incluido el brillo de la emisión ( $10^5$ - $10^8$  A/cm<sup>2</sup>·sr), el enfoque del haz (ancho del haz  $< 5$  nm) y la vida útil (500-2000 horas). El equipo de prueba debe estar calibrado (como un termómetro infrarrojo, precisión  $\pm 5^\circ\text{C}$ ) y los datos deben cumplir con la distribución normal ( $\sigma < 5\%$ ). La norma se aplica a SEM, tubos de rayos X y tubos de microondas.

Cañones de electrones de filamento de tungsteno a través de estrictos procesos de fabricación y aceptación. Por ejemplo, en la fabricación de equipos de TC, los cañones de electrones que cumplen con GB/T 9383 proporcionan rayos X de 120 kV, una resolución de imagen de  $< 0,5$  mm y una tasa de aprobación del  $> 98\%$ .

## 7.2 Normas Internacionales (ISO)

Las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO) proporcionan especificaciones globales uniformes para los materiales, las pruebas y el entorno de producción de filamentos de tungsteno, lo que facilita el comercio internacional y la cooperación técnica. Esta sección explora la aplicación específica de las normas ISO relevantes.

### 7.2.1 Materiales relacionados con ISO y normas de ensayo

Las normas ISO de materiales y pruebas regulan el rendimiento y los métodos de prueba de los filamentos de tungsteno para garantizar su universalidad en el mercado global, incluyendo principalmente:

ISO 6848:2015 Tungsteno y materiales de electrodos de aleación de tungsteno: Esta norma especifica la composición química, las propiedades mecánicas y la calidad de la superficie del alambre de tungsteno y la aleación de tungsteno. Se requiere que la pureza del tungsteno sea  $\geq 99.95\%$ , los elementos dopantes (como el renio, 0.1-5 % en peso) deben estar claramente marcados y el contenido de impurezas es  $< 0.01\%$  en peso. Las propiedades mecánicas requieren resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa y alargamiento a la rotura  $\geq 2\%$ . Los requisitos de calidad de la superficie

son  $Ra \leq 0,8$  micras, sin grietas ni óxidos. La norma se aplica a los cañones de electrones y a los electrodos de soldadura, y los métodos de ensayo incluyen ICP-OES (composición química), ensayo de tracción (propiedades mecánicas) y SEM (morfología de la superficie).

ISO 11539:1999 Ensayos de materiales catódicos para la tecnología de vacío: especifica los métodos de ensayo para la eficiencia de la emisión térmica de electrones, la resistividad y la estabilidad térmica. La prueba de eficiencia de emisión requiere una densidad de corriente de  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup> a 2600 °C bajo  $10^{-7}$  Pa con una precisión de  $\pm 0,1$   $\mu$ A/cm<sup>2</sup>. La prueba de resistividad utiliza un método de cuatro sondas con una precisión de  $\pm 0,1$   $\mu\Omega \cdot$ cm. La prueba de estabilidad térmica incluye 1000 ciclos de frío y calor (20-2600 °C) con una tasa de agrietamiento del  $<1\%$ . La norma se aplica a los cátodos para tubos SEM, TEM y de rayos X.

Rendimiento del filamento de tungsteno a través de métodos de prueba unificados globalmente . Por ejemplo, en la fabricación de TEM colaborativa internacionalmente, los filamentos de tungsteno que cumplen con la norma ISO 6848 proporcionan  $10^7$  A/cm<sup>2</sup>· Brillo SR con una consistencia de lote del  $>99\%$ , que cumple con los requisitos de imágenes de sub-angstrom.

### **7.2.2 Aplicación de la norma ISO 4618-2006 (Términos y definiciones de materiales de recubrimiento) al tratamiento superficial de filamentos de tungsteno**

La norma ISO 4618-2006 define la terminología y la clasificación de los materiales de recubrimiento y proporciona orientación para el tratamiento de superficies de filamentos de tungsteno (como los recubrimientos de óxido de itria y circonio). Las principales aplicaciones incluyen:

Terminología y clasificación: La norma define el tipo de recubrimiento (por ejemplo, deposición química de vapor, CVD; deposición física de vapor, PVD), el espesor (0,1-1 micra) y la funcionalidad (baja función de trabajo, resistencia a la oxidación). Los recubrimientos de Ytria se clasifican como "recubrimientos cerámicos funcionales" con una reducción de la función de trabajo de 4,5 eV a 4,2 eV y un aumento del 20% en la eficiencia de emisiones.

Especificaciones del proceso: se requiere uniformidad del recubrimiento (desviación del espesor  $<5\%$ ), adhesión (tasa de pelado  $<1\%$ ) y estabilidad química (sin descomposición por debajo de  $10^{-5}$  Pa). El proceso CVD necesita controlar la temperatura de deposición (800-1200 °C) y el caudal de gas (0,1-1 L / min) para garantizar que el tamaño de grano del recubrimiento sea de  $<100$  nm.

Métodos de prueba: incluyendo microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología del recubrimiento, espectroscopía de fotoelectrones de rayos X (XPS) para analizar la composición química y prueba de flexión de cuatro puntos para probar la adherencia. La norma requiere que el cambio de función de trabajo del recubrimiento sea de  $<0,1$  eV después de 1000 horas de funcionamiento a 2600 °C.

En la soldadura por haz de electrones, los filamentos recubiertos de óxido de circonio de acuerdo con la norma ISO 4618 aumentan la densidad de corriente de emisión en un 20% y prolongan la

vida útil en un 25%, cumpliendo con los requisitos de alta potencia (60 kW). La norma facilita el intercambio internacional de tecnología de recubrimiento al unificar la terminología y los métodos de prueba.

### 7.2.3 Implantación de la norma ISO 14001 (Sistema de Gestión Ambiental) en la producción

La norma ISO 14001:2015 proporciona un marco de sistema de gestión ambiental para la producción de filamentos de tungsteno para reducir el impacto ambiental y cumplir con las regulaciones globales. Los principales contenidos de implementación incluyen:

**Objetivos ambientales:** Exigir que las emisiones de carbono de la producción de filamentos de tungsteno sean inferiores a 6 kg de CO<sub>2</sub>/kg, que las emisiones de líquidos residuales sean inferiores a 1 L/kg y que la recuperación de residuos sea superior al 95%. Por ejemplo, la fusión por arco de plasma reduce el consumo de energía en un 30% (hasta 5 kWh/kg), y la reducción química recupera el tungsteno con una pureza del 99,9%.

**Optimización del proceso:** Se utiliza el pulido electroquímico en lugar del decapado, lo que reduce las emisiones de líquidos residuales en un 80%. Los precipitadores electrostáticos recogen polvo de tungsteno (tamaño de partícula <10 micras) con una tasa de recuperación del 98%, que cumple con el límite de exposición (5 mg/m<sup>3</sup>). La sinterización al vacío (1500 °C) reduce el consumo de energía en un 20% y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.

**Evaluación de cumplimiento:** Se requieren auditorías ambientales anuales para analizar los gases de escape (SO<sub>2</sub> <50 mg/m<sup>3</sup>), las aguas residuales (pH 6-9) y el ruido (<85 dB). Las empresas están obligadas a desarrollar planes de emergencia para hacer frente a las fugas de productos químicos o la contaminación por polvo, con un tiempo de respuesta de <30 minutos.

**Proceso de certificación:** Para obtener la certificación ISO 14001, es necesario presentar un plan de gestión ambiental, datos de seguimiento e informes de mejora. Los organismos de certificación (como SGS) realizan auditorías in situ para garantizar el cumplimiento de las normas.

En la producción de filamentos de tungsteno, la implementación de la norma ISO 14001 redujo la huella de carbono en un 20%, redujo los costos de eliminación de residuos en un 30% y cumplió con las regulaciones RoHS y REACH de la UE. La empresa mejoró su competitividad en el mercado a través de la producción verde y sus pedidos de exportación aumentaron en un 15%.

### 7.3 Norma Americana (Norma Americana)

Las normas americanas (ASTM, ASME, SAE) proporcionan especificaciones de alta precisión para los materiales, la fabricación y la aplicación de filamentos de tungsteno, que se utilizan ampliamente en el mercado norteamericano y en los equipos de alta gama de todo el mundo. En esta sección se analizan los requisitos específicos de las normas americanas pertinentes.

### 7.3.1 Normas ASTM (como ASTM B387 Tungsteno y varillas de aleación de tungsteno)

ASTM B387-18 es el estándar internacional autorizado para varillas de tungsteno y aleaciones de tungsteno, que se utilizan ampliamente en la fabricación de filamentos de cañones electrónicos. Los principales requisitos incluyen:

Composición química: pureza del tungsteno  $\geq 99,95\%$ , elementos de impurezas (como hierro, níquel)  $< 0,01\%$  en peso, elementos dopantes (como renio, potasio) deben estar claramente marcados (0,005-5 % en peso). Se requieren pruebas ICP -OES con una precisión del  $\pm 0,001\%$  en peso.

Propiedades mecánicas: resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa (temperatura ambiente),  $\geq 400$  MPa (2500°C), alargamiento a la rotura  $\geq 2\%$ . Tasa de fluencia a alta temperatura  $< 0,01\%/h$  (2600 °C). La prueba se llevó a cabo utilizando una máquina de prueba universal con una precisión de  $\pm 0,1$  MPa.

Dimensiones y superficie: Diámetro de la varilla 0,5-50 mm, tolerancia  $\pm 0,01$  mm, rugosidad superficial  $Ra \leq 0,8$  micras, sin grietas, inclusiones ni óxidos. Superficie verificada por microscopía óptica (1000x) y pruebas ultrasónicas (C-scan).

Escenarios de aplicación: La norma se aplica a las materias primas de alambre de tungsteno para tubos SEM, TEM y de rayos X. Por ejemplo, una varilla que cumple con la norma ASTM B387 se introduce en un alambre de tungsteno de 0,2 mm con una densidad de corriente de emisión de 3 A/cm<sup>2</sup> y una vida útil de 1000 horas.

En la fabricación de SEM de América del Norte, ASTM B387 garantiza que la consistencia del lote de filamento de tungsteno sea del  $>99\%$  y el brillo sea de  $10^6$  A/cm<sup>2</sup> SR, satisfaciendo las necesidades de imágenes de alta resolución. La norma también exige que los proveedores proporcionen certificados de materiales que registren la composición química y los datos de las pruebas.

### 7.3.2 Aplicación de las normas ASME en la fabricación de pistolas de electrones

La norma de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME) proporciona especificaciones para la fabricación y el control de calidad de los cañones de electrones, que son adecuados para equipos de alta fiabilidad. Incluyen principalmente:

ASME Y14.5 -2018 Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T): especifica la tolerancia dimensional y la tolerancia de forma y posición de los componentes del cañón de electrones. La precisión de fijación del filamento es de  $\pm 1$  micra, la tolerancia de espaciado de electrodos es de  $\pm 0,01$  mm y la desviación de redondez es de  $< 0,005$  mm. Es necesario utilizar una máquina de medición de coordenadas (CMM, precisión  $\pm 0,5$  micras) para verificar y garantizar la uniformidad del campo eléctrico (desviación  $< 1\%$ ).

ASME B46.1 -2019 Calidad de la superficie: Requiere rugosidad de la superficie del filamento

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

$Ra \leq 0,05$  micras, superficie del electrodo  $Ra \leq 0,02$  micras y reduce la descarga del arco (incidencia  $< 0,01\%$ ). Las pruebas se realizan mediante microscopía de fuerza atómica (AFM, precisión  $\pm 1$  nm) e interferómetro láser.

Ejemplo de aplicación: En la fabricación de tubos de rayos X, ASME Y14.5 garantiza que la precisión de la distancia filamento-objetivo ( $< 10$  mm) sea de  $\pm 0,01$  mm, la corriente de emisión sea de 5 mA y la resolución de imagen sea de  $< 0,5$  mm. ASME B46.1 reduce el riesgo de arco en un 50% al optimizar la calidad de la superficie.

Estos estándares garantizan el rendimiento y la fiabilidad del cañón de electrones a través de especificaciones de fabricación de alta precisión. Los proveedores deben presentar informes de prueba que cumplan con ASME y cumplan con los requisitos de certificación de la FDA y la CE.

### 7.3.3 Normas SAE (si son aplicables a la soldadura por haz de electrones)

El estándar del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica (SAE) proporciona especificaciones para los filamentos de tungsteno utilizados en la soldadura por haz de electrones (EBW), lo que garantiza una alta calidad de los componentes aeroespaciales. Incluye principalmente:

SAE AMS 2680C -2020 Especificación de soldadura por haz de electrones: especifica el rendimiento del filamento, la calidad del haz y el proceso de soldadura. Se requiere que la corriente de emisión del filamento sea de 10-100 mA, con fluctuaciones de  $< 2\%$  y brillo de  $10^6$  A/cm<sup>2</sup>·Sr. El enfoque del haz requiere un ancho de haz de  $< 0,1$  mm. Al soldar aleación de titanio (50 mm de espesor), el ancho de soldadura es de  $< 1$  mm y la zona afectada por el calor es de  $< 0,5$  mm. El grado de vacío debe alcanzar  $10^{-5}$  Pa para evitar la oxidación.

Métodos de prueba: incluida la prueba de estabilidad del haz (1000 horas, desviación de corriente  $< 1\%$ ), prueba de vida útil (1000 horas, atenuación de emisiones  $< 5\%$ ) e inspección de calidad de soldadura (detección de defectos por rayos X, tasa de defectos  $< 0,1\%$ ). La norma exige el uso de termómetro infrarrojo (precisión  $\pm 5$  °C) y picoamperímetro (precisión  $\pm 0,1$   $\mu$ A).

Escenario de aplicación: En la fabricación de motores de aviones, los filamentos que cumplen con SAE AMS 2680C generan haces de electrones de 60 kW para soldar álabes de turbinas, con una resistencia a la soldadura  $> 1000$  MPa y una tasa de paso del  $> 99\%$ .

Filamentos de tungsteno en EBW de alta precisión a través de estrictos requisitos de rendimiento y proceso. Las empresas deben aprobar la certificación SAE para cumplir con los estándares de calidad de los clientes aeroespaciales.

## 7.4 Otras normas internacionales y de la industria

Las normas japonesas (JIS), alemanas (DIN) y rusas (GOST) proporcionan especificaciones regionales y específicas de la industria para los filamentos de tungsteno, complementando el sistema de normas mundiales. En esta sección se analizan sus requisitos y aplicaciones específicos.

#### 7.4.1 Norma japonesa (JIS)

Las Normas Industriales Japonesas (JIS) proporcionan especificaciones de alta precisión para los materiales y la fabricación de filamentos de tungsteno, que se utilizan ampliamente en las industrias electrónica y de semiconductores de Japón. Entre ellos se encuentran principalmente:

JIS H 4461:2002 Alambre de tungsteno y alambre de aleación de tungsteno: especifica la composición química (pureza  $\geq 99,95\%$ , impurezas  $< 0,01\%$  en peso), tamaño (diámetro  $0,01-2$  mm, tolerancia  $\pm 1$  micra) y rendimiento (resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa, densidad de corriente de emisión  $\geq 1$  A / cm<sup>2</sup>) del alambre de tungsteno. Requiere recocido con hidrógeno ( $1200-1600$  °C) para eliminar la tensión y la rugosidad de la superficie  $R_a \leq 0,8$  micras. La norma se aplica al alambre de tungsteno para SEM y EBL.

JIS C 7709:1999 Materiales catódicos para dispositivos electrónicos de vacío: especifica los métodos de prueba para la eficiencia de emisiones ( $2600$  °C,  $\geq 3$  A / cm<sup>2</sup>), la estabilidad térmica (1000 ciclos, tasa de grieta  $< 1\%$ ) y la resistencia a la oxidación ( $10^{-5}$  Pa, capa de óxido  $< 0,1$  micras). El equipo de prueba incluye una cámara de vacío ( $10^{-7}$  Pa) y un picoamperímetro (precisión  $\pm 0,1$   $\mu$ A).

Escenario de aplicación: En la fabricación japonesa de equipos semiconductores, los filamentos de tungsteno que cumplen con JIS H 4461 proporcionan una corriente estable de  $10$  nA y un ancho de haz de  $< 5$  nm, cumpliendo con los requisitos de litografía de los chips de nodo de  $7$  nm. El estándar JIS garantiza el rendimiento de los filamentos en equipos de alta gama a través de requisitos de alta precisión.

#### 7.4.2 Norma alemana (DIN)

La Norma Industrial Alemana (DIN) proporciona especificaciones estrictas para los materiales y las pruebas de los filamentos de tungsteno, que son adecuados para equipos de alta fiabilidad en el mercado europeo. Incluyendo principalmente:

DIN 17672:1985 Tungsteno y materiales de aleación de tungsteno: especifica la composición química (pureza  $\geq 99,95\%$ ), las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa, alargamiento a la rotura  $\geq 2\%$ ) y la calidad superficial ( $R_a \leq 0,8$  micras) del alambre de tungsteno. Es necesario detectar impurezas mediante fluorescencia de rayos X (XRF) con una precisión de  $\pm 0,001\%$  en peso. La norma se aplica al alambre de tungsteno para tubos de rayos X y tubos de microondas.

DIN EN 60695-2-10:2021 Ensayos de cátodos para dispositivos electrónicos: especifica los métodos de ensayo para la eficiencia de las emisiones ( $2600$  °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), la resistividad ( $50-60$   $\mu\Omega \cdot$ cm) y la vida útil (1000 horas, atenuación de las emisiones  $< 5\%$ ). Se requieren pruebas de ciclo a alta temperatura ( $20-2600$  °C, 1000 veces) y pruebas de resistencia a la oxidación ( $10^{-5}$  Pa, 1000 horas).

Escenario de aplicación: En la fabricación de equipos médicos alemanes, los filamentos de tungsteno que cumplen con la norma DIN 17672 generan un flujo de electrones de 5 mA, producen rayos X de 120 kV y tienen una vida útil de 2.000 horas, lo que satisface las necesidades de las imágenes de TC. La norma DIN garantiza la competitividad de los filamentos en el mercado europeo a través de altos requisitos de fiabilidad.

#### 7.4.3 Estándar ruso ( GOST )

La Norma Estatal Rusa (GOST) proporciona especificaciones para filamentos de tungsteno adecuados para entornos extremos y son ampliamente utilizados en las industrias aeroespacial y nuclear rusa. Entre ellos se encuentran principalmente:

GOST 19671-91 Alambre de tungsteno y alambre de aleación de tungsteno: especifica la composición química (pureza  $\geq 99.95\%$ , elementos dopantes 0.005-5 % en peso), tamaño (diámetro 0.01-2 mm, tolerancia  $\pm 1$  micra) y rendimiento (resistencia a la tracción  $\geq 800$  MPa, densidad de corriente de emisión  $\geq 1$  A / cm<sup>2</sup>) del alambre de tungsteno. Se requiere que la superficie esté libre de grietas y  $Ra \leq 0,8$  micras. La norma se aplica al alambre de tungsteno para dispositivos de fusión nuclear.

GOST 25852-83 Especificación para cátodos de dispositivos electrónicos de vacío: especifica los métodos de prueba para la eficiencia de emisiones (2600 °C,  $\geq 3$  A / cm<sup>2</sup>), estabilidad térmica (1000 ciclos, tasa de grietas <1%) y resistencia a la radiación (flujo de neutrones  $10^6$  n / cm<sup>2</sup>, degradación del rendimiento <5%). La prueba debe realizarse en una cámara de vacío de  $10^{-8}$  Pa.

Escenario de aplicación: En el dispositivo ruso Tokamak, los filamentos de tungsteno que cumplen con GOST 19671 generan una corriente de electrones de 50 mA, impulsan plasma de 1 keV, tienen una vida útil de 1000 horas y soportan altas temperaturas (3000 °C) y radiación. Los estándares GOST garantizan la fiabilidad de los filamentos en la industria nuclear a través de requisitos medioambientales extremos.

### 7.5 Implementación y certificación de normas

La implementación y certificación de normas garantiza que la producción, prueba y exportación de filamentos de tungsteno cumpla con los requisitos nacionales e internacionales, mejorando la calidad del producto y la competitividad en el mercado. Esta sección explora la aplicación de estándares, la certificación del sistema de gestión de calidad y el cumplimiento internacional.

#### 7.5.1 Aplicación de normas en producción y ensayos

La aplicación de la norma en la producción y prueba de filamentos de tungsteno cubre las materias primas, los procesos, las pruebas de rendimiento y el control de calidad, incluyendo principalmente:

Control de materias primas: De acuerdo con GB/T 4181, ISO 6848 y ASTM B387, seleccione varillas de tungsteno con una pureza de  $\geq 99.95\%$  y detecte impurezas (ICP-OES, precisión  $\pm 0.001$  % en peso) y elementos dopantes (potasio 0.01-0.05 % en peso). La tasa calificada de materias primas

debe alcanzar el 99,5%.

Proceso de fabricación: El proceso de estirado cumple con GB/T 4192 y JIS H 4461, tolerancia  $\pm 1$  micra, tasa de rotura de alambre  $< 0.1\%$ . La tensión se elimina mediante recocido por hidrógeno (1200-1600 °C) y el tamaño de grano se controla a 2-4 micras. El proceso de recubrimiento (CVD, espesor de óxido de itrio de 0,1-1 micras) cumple con la norma ISO 4618 y la desviación de uniformidad es del  $< 5\%$ .

Prueba de rendimiento: De acuerdo con GB/T 15065, ISO 11539 y DIN EN 60695, se prueban la eficiencia de emisión (2600 °C,  $\geq 3$  A/cm<sup>2</sup>), la resistividad (50-60  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ ) y la vida útil (1000 horas, atenuación de emisiones  $< 5\%$ ). El equipo de prueba debe calibrarse y los registros de datos cumplen con los requisitos de la norma ISO 9001.

Control de calidad: El control estadístico de procesos (SPC) se utiliza para monitorear parámetros clave (como el diámetro, la resistividad y la corriente de emisión) y el índice de capacidad del proceso  $C_p \geq 1.33$ . La tasa calificada de muestreo por lotes es  $> 98\%$ , y los productos no calificados deben aislarse y analizarse por razones (como la observación SEM de grietas).

En la producción de filamentos SEM, la implementación estándar ha mejorado la consistencia del producto en un 10%, ha reducido la tasa de desperdicio al 0,5% y ha aumentado la satisfacción del cliente en un 15%. Las empresas deben establecer procedimientos operativos estándar (SOP) para garantizar el cumplimiento a lo largo de todo el proceso.

### 7.5.2 Certificación del sistema de gestión de la calidad (como ISO 9001)

La certificación del sistema de gestión de calidad ISO 9001:2015 proporciona un marco de gestión sistemático para la producción de filamentos de tungsteno, mejorando la calidad del producto y la confianza del cliente. Los principales contenidos de implementación incluyen:

Objetivos de calidad: tasa de calificación del producto  $\geq 98\%$ , tasa de quejas de los clientes  $< 1\%$  y tasa de entrega a tiempo  $\geq 95\%$ . Por ejemplo, la desviación de la corriente de emisión del filamento es  $< 1\%$  y la vida útil es de 1000 horas.

Gestión de procesos: Establezca una gestión de procesos completa desde la adquisición de materias primas hasta la entrega del producto terminado, incluida la evaluación de proveedores (tasa de calificación  $> 95\%$ ), el seguimiento de la producción (SPC,  $C_p \geq 1.33$ ) y los registros de inspección (trazables durante 5 años). Los procesos clave (como el embutición y el recubrimiento) requieren una inspección del 100%.

Mejora continua: Identificar oportunidades de mejora a través de la retroalimentación de los clientes y auditorías internas (dos veces al año). Por ejemplo, después de analizar la causa de la rotura del filamento, se optimizó el proceso de recocido (se redujo la temperatura en 50 °C) y la tasa de rotura se redujo en un 50%.

Proceso de certificación: Para obtener la certificación ISO 9001, es necesario presentar un manual

de calidad, documentos de procedimiento e informes de mejora. Los organismos de certificación (como TÜV) realizan auditorías in situ para verificar la coherencia del proceso y la integridad de los datos.

En la producción de filamentos para tubos de rayos X, la certificación ISO 9001 reduce las tasas de desperdicio en un 20% y acorta los ciclos de entrega en un 15%, y es reconocida por clientes internacionales (como GE y Philips). Las empresas están obligadas a realizar revisiones periódicas (una vez al año) para garantizar el cumplimiento continuo.

### 7.5.3 Exportación de productos y cumplimiento de normas internacionales

Los filamentos de tungsteno deben cumplir con los estándares y regulaciones del mercado objetivo para garantizar la competitividad internacional. Los principales requisitos incluyen:

**Cumplimiento de las normas:** Las exportaciones a América del Norte deben cumplir con ASTM B387 y ASME Y14.5, la UE debe cumplir con las regulaciones ISO 6848 y REACH, y Japón debe cumplir con JIS H 4461. Los productos deben ir acompañados de informes de pruebas que cumplan con las normas (como la composición química, la eficiencia de las emisiones) y traducidos al idioma del mercado de destino.

**Requisitos de certificación:** Los dispositivos médicos de exportación requieren la certificación de la FDA o la CE, que implica la biocompatibilidad (ISO 10993) y el cumplimiento ambiental (RoHS) del filamento. Las aplicaciones aeroespaciales requieren la certificación AS9100 para garantizar la fiabilidad del filamento en EBW (resistencia a la soldadura > 1000 MPa).

**Cumplimiento comercial:** cumplir con las normas de la OMC y los requisitos de origen, proporcionar la licencia de exportación y la hoja de datos de seguridad del material (MSDS, de acuerdo con GB/T 16483). La MSDS debe enumerar la composición química del filamento de tungsteno (99,95% de tungsteno), los peligros potenciales (inhalación de polvo) y el funcionamiento seguro (uso de mascarilla N95).

**Análisis de caso:** CTIA GROUP LTD (<http://cn.ctia.group>) exporta filamentos SEM a la UE, de acuerdo con ISO 6848 y REACH, con un brillo de  $10^6$  A/cm<sup>2</sup>·sr, una vida útil de 1000 horas, y certificación CE, aumentando la cuota de mercado en un 20%. El proceso de exportación dura 6 meses, incluidas las pruebas estándar, la solicitud de certificación y el despacho de aduanas.

Los desafíos incluyen diferencias en los estándares entre los mercados (como los requisitos de tolerancia entre ASTM y JIS) y altos costos de certificación (> \$ 100,000). En el futuro, será necesario establecer una base de datos mundial de normas para acortar los ciclos de cumplimiento en un 30% y reducir los costos en un 20% a través de acuerdos multilaterales de certificación.



CTIA GROUP LTD Filamento de tungsteno por haz de electrones

## Apéndice

### A. Glosario

**Cañón de electrones:** Un dispositivo que utiliza un cátodo para emitir electrones y los acelera y enfoca a través de un campo eléctrico para formar un haz de electrones.

**Cátodo:** El electrodo en un cañón de electrones que emite electrones, generalmente hecho de material de emisión de electrones térmicos como el filamento de tungsteno.

**Cilindro de Wehnelt :** El electrodo de control en el cañón de electrones que ajusta la intensidad y el enfoque de los electrones emitidos por el cátodo .

**Haz de Electrones:** Flujo acelerado y enfocado de electrones generado por un cañón de electrones para la obtención de imágenes, el procesamiento o la transferencia de energía.

**Brillo del haz:** La densidad de corriente por unidad de área y ángulo sólido del haz de electrones, expresada en  $A/cm^2 \cdot sr$ .

**Trefilado:** Un proceso en el que las varillas de tungsteno se estiran en alambres delgados a través de un troquel.

**Recocido de hidrógeno:** Un proceso de tratamiento térmico que calienta el alambre de tungsteno en una atmósfera de hidrógeno para eliminar la tensión interna y optimizar la estructura del grano.

**Pulido electroquímico:** Un proceso que utiliza un electrolito para eliminar los defectos de la superficie del alambre de tungsteno y mejorar la suavidad de la superficie.

**Deposición química de vapor (CVD):** Un proceso para depositar recubrimientos funcionales (como el óxido de itrio) en la superficie de los filamentos de tungsteno a través de una reacción en fase gaseosa.

**Dopaje: Proceso de añadir oligoelementos (como potasio, aluminio y renio)** a los filamentos de tungsteno para mejorar su rendimiento.

**Emisión Termoiónica: Fenómeno** en el que el cátodo se calienta de modo que los electrones superan la función de trabajo y escapan al vacío.

**Función de trabajo:** La energía mínima requerida para que un electrón escape de la superficie de un material, medida en eV.

**Dispositivo de electrones de vacío:** Un dispositivo que utiliza el flujo de electrones en un entorno de vacío para lograr la amplificación de señales, imágenes o conversión de energía.

**Densidad de corriente de emisión:** La corriente de electrones emitida por unidad de área del cátodo, en  $A/cm^2$ .

**Descarga de arco:** Un fenómeno de descarga anormal causado por gas residual o defectos superficiales en un entorno de vacío.

**Tamaño de grano:** El tamaño promedio de los granos en un material metálico, medido en micras.

**Resistencia a la tracción:** La tensión máxima que un material puede soportar antes de romperse bajo tensión, medida en MPa.

**Rugosidad superficial:** Las características geométricas microscópicas de la superficie del material, generalmente expresadas por Ra (rugosidad promedio), en micras.

**Pulvimetalurgia:** La tecnología de preparación de materiales metálicos mediante prensado de polvo, sinterización y moldeo.

**Fluencia a alta temperatura:** El fenómeno de deformación lenta de materiales bajo alta

temperatura y tensión continua.

## B. Referencias

- [1] Chinatungsten en línea. Aplicación de filamento de tungsteno en cañón de electrones. 2023.
- [2] Planificar. Filamentos de tungsteno para cañones de electrones. 2022.
- [3] Materiales de Toshiba. Aleaciones avanzadas de tungsteno. 2021.
- [4] CTIA GROUP LTD. Tecnología de filamentos de tungsteno en soldadura por haz de electrones. 2024.
- [5] Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno. Tecnologías de reciclaje de tungsteno. 2023.
- [6] Chinatungsten en línea. Diseño de cañón de electrones y optimización del rendimiento. 2022.
- [7] Revista de Ciencia de los Materiales. tungsteno como material catódico. 2020.
- [8] Chinatungsten en línea. Tecnología de tratamiento de superficies de filamentos de tungsteno. 2023.
- [9] Nanotecnología de la Naturaleza. Nanotubos de carbono como emisores de campo. 2021.
- [10] Chinatungsten en línea. Tecnología de purificación de polvo de tungsteno. 2022.
- [11] ASTM E1479 -16. Práctica estándar para el análisis del tamaño de partícula. 2016.
- [12] Chinatungsten en línea. Optimización del rendimiento del filamento de tungsteno dopado. 2023.
- [13] ISO 9001:2015. Sistemas de Gestión de la Calidad. 2015.
- [14] pulvimetalurgia. Compactación de polvo de tungsteno. 2019.
- [15] Chinatungsten en línea. Parámetros del proceso de sinterización de tungsteno. 2022.
- [16] Revista de Tecnología de Procesamiento de Materiales. Forja de tungsteno. 2020.
- [17] Chinatungsten en línea. Tecnología de trefilado de tungsteno. 2023.
- [18] Ciencia e Ingeniería de Materiales. Recocido de tungsteno. 2021.
- [19] Chinatungsten en línea. Tecnología de control de granos. 2022.
- [20] Chinatungsten en línea. Proceso de bobinado de filamentos de tungsteno. 2023.
- [21] CTIA GROUP LTD. Equipo de bobinado automatizado. 2024.
- [22] Tecnología de superficies y recubrimientos. Pulido de superficies de tungsteno. 2020.