

# Guía completa del electrodo de molibdeno

中钨智造科技有限公司  
CTIA GROUP LTD

**CTIA GRUPO LTD**

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

## DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

## INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

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

Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha establecido más de 200 sitios web profesionales multilingües de tungsteno y molibdeno que cubren más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" ha publicado más de 40.000 piezas de información, sirviendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita diariamente a cientos de miles de profesionales de la industria en todo el mundo. Con visitas acumuladas a su grupo de sitios web y cuenta oficial que alcanzan miles de millones de veces, se ha convertido en un centro de información global y autorizado reconocido para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras, que brinda noticias multilingües las 24 horas del día, los 7 días de la semana, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado.

Sobre la base de la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando la tecnología de IA, diseña y produce de forma colaborativa productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como el tamaño de partícula, la densidad, la dureza, la resistencia, las dimensiones y las tolerancias) con los clientes. Ofrece servicios integrados de proceso completo que van desde la apertura de moldes, la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de investigación y desarrollo, diseño y producción para más de 500,000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130,000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Basándose en esta base, CTIA GROUP profundiza aún más la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, basándose en sus más de 30 años de experiencia en la industria, también han escrito y publicado análisis de conocimientos, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Adhiriéndose al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en la práctica de producción y las necesidades de los clientes del mercado, ganando elogios generalizados en la industria. Estos logros brindan un sólido apoyo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder mundial en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y servicios de información.



### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

## CONTENIDO

### Capítulo 1 Descripción general de los electrodos de molibdeno

- 1.1 ¿Qué es un electrodo de molibdeno?
- 1.2 Historia y desarrollo de los electrodos de molibdeno
- 1.3 Importancia de los electrodos de molibdeno en la industria moderna

### Capítulo 2 Propiedades básicas de los electrodos de molibdeno

- 2.1 Propiedades físicas de los electrodos de molibdeno
  - 2.1.1 Punto de fusión y densidad de los electrodos de molibdeno
  - 2.1.2 Conductividad eléctrica y térmica de los electrodos de molibdeno
  - 2.1.3 Coeficiente de expansión térmica y resistencia mecánica de los electrodos de molibdeno
- 2.2 Propiedades químicas de los electrodos de molibdeno
  - 2.2.1 Resistencia a la corrosión y estabilidad química de los electrodos de molibdeno
  - 2.2.2 Comportamiento de oxidación a alta temperatura de los electrodos de molibdeno
- 2.3 Formas y especificaciones de los electrodos de molibdeno
  - 2.3.1 Formas comunes (varilla, placa, alambre, etc.)
  - 2.3.2 Dimensiones y posibilidades de personalización

### Capítulo 3 Proceso de fabricación de electrodos de molibdeno

- 3.1 Fuentes de materias primas y preparación
  - 3.1.1 Extracción de mineral de molibdeno
  - 3.1.2 Preparación de polvo de molibdeno de alta pureza
- 3.2 Procesos de producción principales de electrodos de molibdeno
  - 3.2.1 Método de pulvimetalurgia
    - 3.2.1.1 Prensado y conformado
    - 3.2.1.2 Sinterización a alta temperatura
  - 3.2.2 Procesamiento posterior (forja, laminado, embutición)
- 3.3 Tratamiento superficial y control de calidad de electrodos de molibdeno
  - 3.3.1 Pulido y tratamiento antioxidante
  - 3.3.2 Métodos de prueba de rendimiento
- 3.4 Innovaciones y mejoras en la fabricación de electrodos de molibdeno
  - 3.4.1 Nuevas tecnologías (por ejemplo, impresión 3D)
  - 3.4.2 Tendencias de producción respetuosas con el medio ambiente

### Capítulo 4 Principales regiones de producción de electrodos de molibdeno

- 4.1 Distribución mundial de los recursos de molibdeno
  - 4.1.1 Principales áreas mineras de molibdeno (China, EE. UU., Chile, etc.)
  - 4.1.2 Producción y reservas de molibdeno
- 4.2 Bases de producción de electrodos de molibdeno
  - 4.2.1 China (Shaanxi, Henan, etc.)
  - 4.2.2 Estados Unidos (Colorado, Utah, etc.)

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

- 4.2.3 Europa (Austria, Alemania, etc.)
- 4.2.4 Otros países (Rusia, Canadá, etc.)
- 4.3 Empresas de producción
  - 4.3.1 Principales fabricantes de electrodos de molibdeno: China Tungsten High-Tech
    - 4.3.1.1 Tabla comparativa de rendimiento de los electrodos de molibdeno de alta tecnología y aleación de molibdeno de tungsteno de China
    - 4.3.1.2 Rendimiento de los electrodos de molibdeno de alta tecnología de tungsteno de China

## Capítulo 5 Campos de aplicación de los electrodos de molibdeno

- 5.1 Industria del vidrio
  - 5.1.1 Electrodos de horno de vidrio
  - 5.1.2 Fabricación de vidrio óptico y vidrio especial
- 5.2 Industria metalúrgica
  - 5.2.1 Fundición a alta temperatura y hornos de arco
  - 5.2.2 Papel en la producción de aleaciones
- 5.3 Industria electrónica y de semiconductores
  - 5.3.1 Tubos de vacío y tubos de descarga
  - 5.3.2 Deposición de película delgada y dispositivos microelectrónicos
- 5.4 Investigación científica y aplicaciones especiales
  - 5.4.1 Equipos experimentales de alta temperatura
  - 5.4.2 Industria aeroespacial y nuclear
- 5.5 Campos de aplicación emergentes
  - 5.5.1 Equipos de energía renovable
  - 5.5.2 Componentes de dispositivos médicos

## Capítulo 6 Ventajas, desventajas y limitaciones de los electrodos de molibdeno

- 6.1 Ventajas de los electrodos de molibdeno
  - 6.1.1 Estabilidad a altas temperaturas y larga vida útil
  - 6.1.2 Excelente conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión
  - 6.1.3 Fiabilidad en entornos extremos
- 6.2 Desventajas y limitaciones de los electrodos de molibdeno
  - 6.2.1 Sensibilidad a la oxidación y limitaciones ambientales
  - 6.2.2 Dificultad y costo de procesamiento
  - 6.2.3 Fragilidad y limitaciones de rendimiento mecánico
- 6.3 Medidas de mejora para los electrodos de molibdeno
  - 6.3.1 Tecnologías antioxidantes
  - 6.3.2 Desarrollo de materiales compuestos

## Capítulo 7 Comparación de electrodos de molibdeno con otros materiales de electrodos

- 7.1 Comparación con electrodos de tungsteno
  - 7.1.1 Diferencias de rendimiento
  - 7.1.2 Escenarios de aplicación

### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

- 7.2 Comparación con electrodos de grafito
  - 7.2.1 Durabilidad y costo
  - 7.2.2 Rendimiento a altas temperaturas
- 7.3 Comparación con electrodos de cobre
  - 7.3.1 Conductividad eléctrica y resistencia al calor
  - 7.3.2 Entorno de uso
- 7.4 Comparación con electrodos de metales preciosos (por ejemplo, platino)
  - 7.4.1 Viabilidad económica y aplicaciones especializadas
- 7.5 Resumen de la comparación exhaustiva

## Capítulo 8 Principales mercados para aplicaciones de electrodos de molibdeno

- 8.1 Región de Asia-Pacífico
  - 8.1.1 China (mercados de vidrio y metalurgia)
  - 8.1.2 Japón y Corea del Sur (Electrónica y Semiconductores)
  - 8.1.3 India (demanda de industrialización)
- 8.2 América del Norte
  - 8.2.1 EE. UU. (vidrio y aeroespacial)
  - 8.2.2 Canadá (Metalurgia e Investigación)
- 8.3 Europa
  - 8.3.1 Alemania (Fabricación industrial y vidrio óptico)
  - 8.3.2 Francia y Reino Unido (aplicaciones especializadas)
- 8.4 Otras regiones
  - 8.4.1 América del Sur (demanda metalúrgica en Chile y Perú)
  - 8.4.2 Oriente Medio y África (potencial de mercados emergentes)
- 8.5 Características de los mercados globales de aplicaciones
  - 8.5.1 Distribución industrial
  - 8.5.2 Diferencias regionales

## Apéndice

- A. Glosario
- B. Referencias
- C. Normas técnicas y especificaciones para electrodos de molibdeno

### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

## Capítulo 1 Descripción general del electrodo de molibdeno

### 1.1 ¿Qué es el electrodo de molibdeno?

El electrodo de molibdeno es un material de electrodo de alto rendimiento con molibdeno (molibdeno, <http://molybdenum.com.cn>) como componente principal. Es ampliamente utilizado en muchos campos industriales debido a su excelente rendimiento a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y conductividad. El molibdeno es un metal de transición con el símbolo del elemento Mo y el número atómico 42. Existe principalmente en forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ) en la naturaleza. Los electrodos de molibdeno generalmente se fabrican mediante un proceso de pulvimetalurgia. Por lo general, se requiere que el contenido de molibdeno alcance más del 99,95% y la densidad sea superior a  $10,15 \text{ g / cm}^3$  para garantizar la estabilidad en entornos extremos. Como material funcional, los electrodos de molibdeno pueden tener forma de varilla, de placa o de alambre. El formulario específico depende de su escenario de uso. Por ejemplo, los diseños en forma de varilla se utilizan principalmente en hornos de fundición de vidrio, mientras que los electrodos de molibdeno en forma de alambre se pueden usar en algunos dispositivos electrónicos.

La principal ventaja de los electrodos de molibdeno radica en sus propiedades físicas y químicas. Su punto de fusión es de hasta  $2623 \text{ }^\circ\text{C}$ , solo superado por el tungsteno, lo que le permite soportar temperaturas extremadamente altas sin fundirse ni deformarse. Además, el molibdeno tiene baja resistividad (alrededor de  $5,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ) y alta conductividad térmica ( $138 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ), lo que lo hace excelente en aplicaciones que requieren una conducción eficiente de corriente y calor. Al mismo tiempo, el molibdeno exhibe una excelente resistencia a la corrosión en ácidos no oxidantes, vidrio fundido y ciertos ambientes alcalinos, lo que amplía aún más su uso industrial. Sin embargo, los electrodos de molibdeno también tienen limitaciones, como la fácil generación de óxidos volátiles (como el  $\text{MoO}_3$ ) en atmósferas oxidantes, por lo que generalmente deben usarse en gases inertes (como el argón o el nitrógeno) o entornos reductores (como el hidrógeno).

Estructuralmente, el tamaño de grano microscópico y la densidad de los electrodos de molibdeno tienen un impacto significativo en su rendimiento. Al controlar las condiciones de sinterización durante el proceso de producción de electrodos de molibdeno de alta pureza, se puede obtener una estructura de grano uniforme, mejorando así su resistencia mecánica y durabilidad. Según China Tungsten Online Technology Co., Ltd., la superficie de los electrodos de molibdeno generalmente necesita pulirse para reducir el riesgo de descarga de arco y corrosión durante el uso. Además, los electrodos de molibdeno también se pueden personalizar de acuerdo con las necesidades del cliente, como agregar trazas de elementos de tierras raras (como lantano o cerio) en usos específicos para mejorar su resistencia a la fluencia a alta temperatura.

En la industria real, los electrodos de molibdeno son ampliamente utilizados. Por ejemplo, en la industria del vidrio, se utiliza como elemento calefactor para hornos de fusión de vidrio totalmente eléctricos, que pueden calentar directamente el vidrio fundido mediante electricidad, reemplazando la energía tradicional de petróleo o gas pesado. Esta sustitución no solo mejora la eficiencia de la producción, sino que también reduce significativamente las emisiones de carbono, lo que está en línea con la tendencia actual de fabricación ecológica. En la industria metalúrgica, los electrodos de

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

molibdeno se utilizan a menudo en hornos de fusión a alta temperatura u hornos de arco para ayudar a producir aleaciones de alto rendimiento. En la industria electrónica, los electrodos de molibdeno se utilizan a menudo como materiales de electrodos para tubos de vacío o dispositivos semiconductores debido a su alta conductividad y estabilidad.

## 1.2 Historia y desarrollo de los electrodos de molibdeno

La historia del desarrollo y la aplicación de los electrodos de molibdeno se remonta a finales del siglo XIX y principios del XX, cuando los científicos e ingenieros comenzaron a explorar el potencial de los metales de alto punto de fusión en la industria. Como metal raro, la aplicación industrial del molibdeno comenzó tarde, principalmente debido a la falta de tecnología de refinación y procesamiento en ese momento. Los primeros productos de molibdeno se extrajeron de los minerales de molibdeno por reducción química, pero la pureza era baja y no podía cumplir con los requisitos de los materiales de los electrodos. No fue hasta principios del siglo XX que los electrodos de molibdeno entraron gradualmente en la etapa de producción industrial con el avance de la tecnología de pulvimetalurgia.

En la década de 1920, los electrodos de molibdeno comenzaron a surgir en la industria del vidrio. En ese momento, la fabricación de vidrio se basaba principalmente en la calefacción de fueloil o gas, que era ineficiente y contaminante. Con el auge de la tecnología de fusión eléctrica, la gente descubrió que el alto punto de fusión y la resistencia a la corrosión del molibdeno lo hacían muy adecuado como material de electrodo en los hornos de fusión de vidrio. A finales de la década de 1920, algunos fabricantes de vidrio en los Estados Unidos tomaron la delantera al tratar de usar electrodos de molibdeno y descubrieron que no solo podía soportar la alta temperatura y la corrosividad del vidrio fundido, sino que también mejoraba significativamente la transparencia y la calidad del vidrio. Este descubrimiento promovió el uso generalizado de electrodos de molibdeno en la industria del vidrio.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la demanda de molibdeno aumentó porque se usaba ampliamente para fabricar aleaciones de alta temperatura en equipos militares, como armaduras de tanques y piezas de motores de aviones. Aunque los electrodos de molibdeno no eran el producto principal en ese momento, el avance de la tecnología de procesamiento de molibdeno después de la guerra sentó las bases para el desarrollo posterior de los electrodos de molibdeno. En la década de 1950, con la popularización de los hornos de fundición de vidrio totalmente eléctricos, los electrodos de molibdeno se convirtieron en una parte indispensable de la industria del vidrio. Al mismo tiempo, el rápido desarrollo de la industria electrónica también abrió nuevos mercados para los electrodos de molibdeno, como los materiales clave de los electrodos en los tubos de vacío y los tubos de descarga.

Al entrar en el siglo XXI, las áreas de aplicación de los electrodos de molibdeno se han expandido aún más. La industria aeroespacial comenzó a utilizar electrodos de molibdeno para fabricar equipos experimentales de alta temperatura y componentes de reactores nucleares, y el surgimiento de nuevos campos de energía (como las células solares y los equipos de energía eólica) también trajo nuevos puntos de crecimiento para los electrodos de molibdeno. De acuerdo con la "Aplicación y

### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

desarrollo de molibdeno" [2], el proceso de producción de electrodos de molibdeno se ha mejorado continuamente en los últimos años. Por ejemplo, su rendimiento se ha mejorado significativamente mediante el dopaje con elementos de tierras raras o la adopción de nuevas tecnologías de recubrimiento de superficies. Además, con las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, los electrodos de molibdeno han reemplazado gradualmente a algunos materiales tradicionales debido a sus características de baja contaminación y se han convertido en una opción importante para la fabricación ecológica.

Desde una perspectiva global, el desarrollo de electrodos de molibdeno está estrechamente relacionado con el proceso de industrialización de China, Estados Unidos y Europa. Como el mayor productor de molibdeno en la actualidad, la industria de electrodos de molibdeno de China ha aumentado rápidamente en las últimas décadas, especialmente en áreas ricas en recursos de molibdeno como Shaanxi y Henan. Estados Unidos y Europa, por otro lado, dominan el mercado de electrodos de molibdeno de alta gama con tecnología de producción avanzada y capacidades de investigación y desarrollo. Por ejemplo, Climax Molybdenum en los Estados Unidos y Plansee en Austria son líderes de la industria en el mecanizado de precisión y la personalización de electrodos de molibdeno.

### 1.3 La importancia de los electrodos de molibdeno en la industria moderna

En la industria moderna, la importancia de los electrodos de molibdeno se refleja en muchos aspectos. En primer lugar, su excelente rendimiento en entornos corrosivos y de alta temperatura lo convierte en una opción ideal para muchos procesos clave. Tomando la industria del vidrio como ejemplo, la temperatura de funcionamiento del horno de vidrio totalmente eléctrico suele ser superior a 1500 °C, y el vidrio fundido también contiene una variedad de componentes corrosivos (como óxidos de metales alcalinos). Los electrodos de molibdeno pueden funcionar de manera estable durante mucho tiempo en condiciones tan extremas y su vida útil puede alcanzar miles de horas, lo que reduce en gran medida el costo de mantenimiento y el tiempo de inactividad del equipo.

En segundo lugar, la alta conductividad eléctrica y la conductividad térmica de los electrodos de molibdeno les otorgan ventajas significativas en escenarios que requieren una transmisión de energía eficiente. Por ejemplo, en la industria electrónica, los electrodos de molibdeno se utilizan como objetivos de pulverización catódica para la producción de transistores de película delgada y pantallas de visualización, y su distribución uniforme de corriente y conductividad térmica garantizan la estabilidad de la calidad del producto. En la industria metalúrgica, el uso de electrodos de molibdeno en hornos de arco eléctrico puede mejorar la eficiencia de fusión y ayudar a producir aceros y aleaciones especiales de alta resistencia.

Además, el respeto por el medio ambiente de los electrodos de molibdeno también refleja su importancia. Los procesos tradicionales de fundición de vidrio se basan en combustibles fósiles, que no solo consumen mucha energía, sino que también producen una gran cantidad de dióxido de carbono y sulfuros. La tecnología de fusión eléctrica que utiliza electrodos de molibdeno se calienta con energía eléctrica y casi no produce contaminantes, lo que está en línea con los objetivos globales de reducción de emisiones. Según un informe de China Tungsten Online [1], el uso de electrodos

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

de molibdeno puede reducir las emisiones de carbono en decenas de miles de toneladas cada año, lo que es particularmente prominente bajo las políticas ambientales actuales.

Los electrodos de molibdeno también han desempeñado un papel en la promoción del desarrollo de tecnologías emergentes. Por ejemplo, en el campo aeroespacial, los electrodos de molibdeno se utilizan para fabricar hornos experimentales resistentes a altas temperaturas para probar el rendimiento de nuevos materiales en entornos extremos. En la industria nuclear, los electrodos de molibdeno se utilizan en ciertos componentes de los reactores nucleares debido a su resistencia a la radiación y su estabilidad a altas temperaturas. Con la popularización de los equipos de energía renovable, también se está explorando la aplicación potencial de los electrodos de molibdeno en células solares y sistemas de almacenamiento de energía.

Desde una perspectiva económica, aunque el alto rendimiento de los electrodos de molibdeno va acompañado de un mayor coste inicial, su larga vida útil y sus bajos requisitos de mantenimiento hacen que su rentabilidad general sea mejor que la de muchos materiales alternativos. Por ejemplo, en la industria del vidrio, el costo de usar un conjunto de electrodos de molibdeno puede ser un 30% más alto que el de los electrodos de grafito, pero su vida útil es 2-3 veces mayor que la del grafito, lo que en última instancia reduce el costo de producción por unidad de producto. Este beneficio económico hace que los electrodos de molibdeno sean altamente competitivos en el mercado global.



Imágenes de electrodos de molibdeno de CTIA GROUP LTD

## Capítulo 2 Características básicas de los electrodos de molibdeno

### 2.1 Características físicas de los electrodos de molibdeno

#### 2.1.1 Punto de fusión y densidad de los electrodos de molibdeno

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

El punto de fusión de los electrodos de molibdeno es de hasta 2623 °C, lo que lo convierte en uno de los pocos materiales que puede mantener la integridad estructural a temperaturas extremadamente altas, solo superado por el tungsteno (3422 °C). El alto punto de fusión se debe a los fuertes enlaces metálicos entre los átomos de molibdeno, lo que hace que su estructura cristalina sea difícil de colapsar a altas temperaturas. En aplicaciones prácticas, como hornos de fundición de vidrio, la temperatura de funcionamiento suele estar entre 1600 y 1800 °C, y los electrodos de molibdeno pueden soportar fácilmente esta temperatura sin fundirse ni ablandarse significativamente.

La densidad del molibdeno es de 10,2 g/cm<sup>3</sup>, ligeramente inferior a la del tungsteno (19,25 g/cm<sup>3</sup>), pero mucho superior a la de los metales industriales comunes como el hierro (7,87 g/cm<sup>3</sup>). Este nivel de densidad no solo garantiza la estabilidad estructural del electrodo de molibdeno, sino que también lo hace moderadamente pesado y fácil de procesar e instalar. La densidad afecta directamente la densidad y las propiedades mecánicas del electrodo. Durante el proceso de producción, al controlar las condiciones de sinterización (como la temperatura y la presión), la densidad de los electrodos de molibdeno generalmente puede alcanzar más del 98% del valor teórico, reduciendo así la porosidad interna y mejorando la durabilidad.

En pruebas reales, las características de punto de fusión y densidad de los electrodos de molibdeno hacen que superen a muchos materiales tradicionales en entornos de alta temperatura. Por ejemplo, en la fusión de vidrio, los electrodos de molibdeno pueden estar expuestos al vidrio fundido durante mucho tiempo sin una degradación física significativa. Según el estudio de "Propiedades físicas y químicas de los materiales de molibdeno" [1], el alto punto de fusión y la densidad moderada juntos dan a los electrodos de molibdeno estabilidad y confiabilidad en condiciones extremas.

### **2.1.2 Conductividad eléctrica y térmica de los electrodos de molibdeno**

La conductividad eléctrica de los electrodos de molibdeno es una de sus principales ventajas como material de electrodo. Su resistividad es de  $5,2 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ , que es ligeramente superior a la del cobre ( $1,68 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$ ), pero ya es un nivel excelente entre los materiales de alta temperatura. Esta resistividad permite que los electrodos de molibdeno transmitan corriente de manera eficiente cuando se alimentan, lo que reduce la pérdida de energía. En un horno de fundición de vidrio, los electrodos de molibdeno generan calor Joule al pasar electricidad directamente, y su conductividad eléctrica determina directamente la eficiencia de calentamiento y la uniformidad de la temperatura.

La conductividad térmica del molibdeno es de 138 W/m·K, que es mucho más alta que la del grafito (alrededor de 30-50 W/m·K) y solo superada por el cobre (401 W/m·K). La alta conductividad térmica significa que los electrodos de molibdeno pueden transferir rápidamente el calor desde el interior del electrodo al entorno externo para evitar el sobrecalentamiento local. Esta propiedad es particularmente importante en aplicaciones que requieren un control preciso de la temperatura. Por ejemplo, en la producción de vidrio óptico, la conductividad térmica uniforme de los electrodos de molibdeno ayuda a reducir los defectos de estrés térmico en el vidrio.

#### **DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL**

En casos reales, la conductividad eléctrica y térmica de los electrodos de molibdeno ha sido ampliamente verificada. Por ejemplo, en el proceso de pulverización catódica de la industria de los semiconductores, cuando se utilizan electrodos de molibdeno como objetivos, sus eficientes capacidades de conducción de corriente y calor garantizan la uniformidad de la deposición de película delgada. Según la información de China Tungsten Online [2], estas características de los electrodos de molibdeno les dan ventajas obvias en dispositivos electrónicos de alta potencia.

### 2.1.3 Coeficiente de expansión térmica y resistencia mecánica de los electrodos de molibdeno

El coeficiente de expansión térmica del molibdeno es de  $4,8 \times 10^{-6}/K$ , que es significativamente menor que el del cobre ( $16,5 \times 10^{-6}/K$ ) y el acero ( $11-13 \times 10^{-6}/K$ ). Esta propiedad significa que los electrodos de molibdeno se deforman menos cuando la temperatura cambia drásticamente y pueden mantener la integridad estructural. En el horno de fusión de vidrio, el electrodo de molibdeno debe someterse a un proceso de calentamiento rápido desde la temperatura ambiente hasta la alta temperatura, y el bajo coeficiente de expansión térmica reduce efectivamente el riesgo de grietas causadas por el estrés térmico.

La resistencia mecánica del molibdeno sigue siendo excelente a altas temperaturas. Su resistencia a la tracción a temperatura ambiente es de aproximadamente 600-800 MPa, que disminuye gradualmente con el aumento de la temperatura, pero aún puede mantener alrededor de 300 MPa a 1000 °C. Esta resistencia es suficiente para hacer frente a las cargas mecánicas en aplicaciones industriales. Sin embargo, el molibdeno tiene baja ductilidad, especialmente a bajas temperaturas, es frágil y propenso a la fractura por fragilidad. Por lo tanto, durante el procesamiento y la instalación, generalmente es necesario calentar a 200-300 °C para mejorar su plasticidad.

En aplicaciones prácticas, el coeficiente de expansión térmica y la resistencia mecánica de los electrodos de molibdeno afectan directamente su vida útil. Por ejemplo, en hornos experimentales de alta temperatura, los electrodos de molibdeno deben soportar ciclos térmicos frecuentes. El bajo coeficiente de expansión térmica reduce el daño por fatiga, mientras que la alta resistencia mecánica garantiza la estabilidad de su estructura.

## 2.2 Propiedades químicas de los electrodos de molibdeno

### 2.2.1 Resistencia a la corrosión y estabilidad química de los electrodos de molibdeno

La resistencia a la corrosión de los electrodos de molibdeno en ambientes no oxidantes es una de sus principales ventajas. Puede resistir la corrosión de una variedad de sustancias químicas, incluidos los ácidos no oxidantes como el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico y el ácido fluorhídrico. En la industria del vidrio, el vidrio fundido contiene una variedad de componentes corrosivos (como  $Na_2O$  y  $K_2O$ ), y los electrodos de molibdeno se pueden usar durante mucho tiempo en este entorno sin corrosión significativa. Según los datos experimentales, la tasa de corrosión del molibdeno en el vidrio fundido suele ser inferior a 0,1 mm/año, que es mucho menor que la del grafito o el acero.

La estabilidad química del molibdeno también se refleja en su resistencia a la corrosión de los

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

metales fundidos. En la industria metalúrgica, los electrodos de molibdeno se utilizan a menudo para fundir metales como el aluminio y el magnesio. Sus superficies no reaccionan químicamente con estos metales, manteniendo así la integridad del electrodo. Sin embargo, en los ácidos oxidantes fuertes (como el ácido nítrico), el molibdeno tiene poca resistencia a la corrosión y se corroe fácilmente rápidamente.

### 2.2.2 Comportamiento de oxidación a alta temperatura de los electrodos de molibdeno

El comportamiento de oxidación de los electrodos de molibdeno a altas temperaturas es una de sus principales limitaciones. Cuando la temperatura supera los 600 °C, el molibdeno reacciona con el oxígeno para formar trióxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ), un compuesto volátil que provoca una rápida pérdida de la superficie del electrodo. En aire por encima de 1000 °C, la tasa de oxidación del molibdeno se acelera significativamente, lo que puede destruir completamente la estructura del electrodo en unas pocas horas. Por lo tanto, los electrodos de molibdeno generalmente deben funcionar en un gas inerte (como el argón) o en una atmósfera reductora (como el hidrógeno). Para resolver este problema, la tecnología de recubrimiento de superficies se utiliza a menudo en la industria, como el recubrimiento de siliciuro de molibdeno ( $\text{MoSi}_2$ ) o capas de óxido de aluminio para mejorar su resistencia a la oxidación. Estos recubrimientos pueden formar una película protectora a altas temperaturas, prolongando significativamente la vida útil de los electrodos de molibdeno. Por ejemplo, en algunos hornos experimentales, la vida útil de los electrodos de molibdeno recubiertos puede extenderse en más del 50% en comparación con los electrodos sin recubrimiento.

## 2.3 Forma y especificaciones del electrodo de molibdeno

### 2.3.1 Formas comunes de electrodos de molibdeno (varillas, placas, alambres, etc.)

Los electrodos de molibdeno tienen varias formas y están diseñados de acuerdo con diferentes usos. Los electrodos de molibdeno en forma de varilla son la forma más común, con un diámetro de generalmente 20-152,4 mm y una longitud de hasta 1500 mm. Se utilizan principalmente en hornos de fundición de vidrio y hornos metalúrgicos. Los electrodos de molibdeno en forma de placa se utilizan principalmente en escenarios donde se requieren grandes áreas de conductividad, como objetivos de pulverización catódica de semiconductores, y su grosor es generalmente de 2 a 20 mm. Los electrodos de molibdeno en forma de alambre suelen tener un diámetro de 0,1-3 mm y se utilizan a menudo en soldadura de precisión o dispositivos electrónicos.

La tecnología de procesamiento para cada formulario es diferente. Por ejemplo, los electrodos en forma de varilla deben formarse mediante forja y torneado, mientras que los electrodos en forma de alambre deben pasar por múltiples procesos de trefilado. Según los datos de China Tungsten Online [2], no hay diferencias significativas en el rendimiento entre los electrodos de molibdeno de diferentes formas, pero sus escenarios de aplicación varían significativamente.

### 2.3.2 Tamaño del electrodo de molibdeno y posibilidades de personalización

Los electrodos de molibdeno están disponibles en una amplia gama de tamaños para satisfacer una variedad de necesidades industriales. Los electrodos de varilla estándar varían en diámetro de 20 mm a 152,4 mm, y se pueden personalizar para el diseño del horno de hasta 2 m de longitud. Los

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

electrodos de placa son más flexibles en tamaño, con anchos y longitudes de hasta 500 mm×1000 mm. Los electrodos de alambre pueden tener una precisión de micrómetros de diámetro para aplicaciones de alta precisión.

La personalización es una característica importante de los electrodos de molibdeno. Los clientes pueden especificar el tamaño, la pureza y el tratamiento de la superficie en función de las necesidades específicas. Por ejemplo, en el campo aeroespacial, es posible que se requieran electrodos de molibdeno extralargos para acomodar hornos experimentales especiales, mientras que en la industria electrónica, es posible que se requieran placas de molibdeno ultradelgadas para cumplir con los requisitos de deposición de película delgada. Fabricantes como CTIA GROUP LTD (Xiamen) Technology Co., Ltd. pueden proporcionar servicios de personalización de proceso completo desde el diseño hasta el procesamiento.



Imagen del electrodo de molibdeno de CTIA GROUP LTD

### Capítulo 3 Proceso de producción de electrodo de molibdeno

#### 3.1 Origen y preparación de materias primas para el electrodo de molibdeno

##### 3.1.1 Extracción de mineral de molibdeno

La producción de electrodos de molibdeno comienza con la extracción del mineral de molibdeno. El molibdeno existe principalmente en la naturaleza en forma de molibdenita ( $\text{MoS}_2$ ), que representa más del 90% de las reservas mundiales de molibdeno. La molibdenita suele coexistir con las minas de cobre y se distribuye en Henan, Shaanxi, Colorado, EE.UU. y en la zona minera de Chuquicamata en Chile. El proceso de extracción primero separa el concentrado de molibdeno del mineral mediante tecnología de flotación, y su contenido de molibdeno puede alcanzar el 45%-50%. Posteriormente, el concentrado se tuesta a alta temperatura para producir trióxido de molibdeno ( $\text{MoO}_3$ ). Este paso debe llevarse a cabo en el aire para garantizar que los sulfuros se conviertan en óxidos y se libere el gas de dióxido de azufre.

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

El trióxido de molibdeno tostado se purifica aún más por métodos químicos, generalmente utilizando extracción ácido-base o tecnología de extracción con solventes para eliminar impurezas (como hierro, cobre y plomo). Con el fin de mejorar la pureza, la industria a menudo utiliza el proceso de amoníaco para convertir el trióxido de molibdeno en paratungstato de amonio (APT,  $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$ ), y luego reducirlo a óxido de molibdeno de alta pureza mediante descomposición a alta temperatura. Este método puede reducir el contenido de impurezas a unas pocas partes por millón (nivel de ppm), cumpliendo con los requisitos de alta pureza de los electrodos de molibdeno. Según China Tungsten Online (<http://www.tungsten-oxide.com>), China es el mayor productor mundial de mineral de molibdeno, con una producción de más de 120.000 toneladas en 2023, lo que representa más del 40% del mundo.

### 3.1.2 Preparación de polvo de molibdeno de alta pureza

El polvo de molibdeno de alta pureza es la materia prima principal para la producción de electrodos de molibdeno y, por lo general, se prepara a partir de trióxido de molibdeno o paratungstato de amonio por reducción de hidrógeno. El proceso de reducción se lleva a cabo en una atmósfera de hidrógeno a alta temperatura (800-1000 °C) y la ecuación de reacción es:  $\text{MoO}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{Mo} + 3\text{H}_2\text{O}$ . El método de reducción de hidrógeno puede reducir significativamente el contenido de oxígeno, de modo que la pureza del polvo de molibdeno alcanza más del 99,95%, y el tamaño de partícula es generalmente entre 1-5  $\mu\text{m}$ , lo que es adecuado para el proceso de pulvimetalurgia posterior.

Con el fin de optimizar aún más el rendimiento del polvo de molibdeno, la industria a menudo utiliza la molienda de bolas o la tecnología de molienda de flujo de aire para ajustar la distribución del tamaño de partícula y garantizar la uniformidad de las partículas. La uniformidad de la distribución del tamaño de partícula afecta directamente la densidad del moldeo prensado y las propiedades mecánicas después de la sinterización. China Tungsten Online (<http://www.tungsten-powder.com>) señaló que en los últimos años, la investigación y el desarrollo del polvo de molibdeno a nanoescala ha atraído la atención, y su tamaño de partícula más pequeño puede mejorar la densidad y la conductividad de los electrodos de molibdeno. Sin embargo, el costo de producción del polvo de nano-molibdeno es relativamente alto y actualmente se utiliza principalmente en aplicaciones de alta gama.

## 3.2 Proceso de producción central de electrodo de molibdeno

### 3.2.1 Método de pulvimetalurgia

#### 3.2.1.1 Moldeo por prensado

La pulvimetalurgia es el proceso principal para la producción de electrodos de molibdeno, y su primer paso es el moldeo por prensado. El polvo de molibdeno de alta pureza se coloca en un molde y se prensa por presión mecánica o prensado isostático en frío (CIP). El prensado isostático en frío utiliza líquido a alta presión (generalmente agua o aceite) para aplicar una presión uniforme, que puede alcanzar los 200-300 MPa. Este método puede garantizar una densidad uniforme de la pieza en bruto y reducir la porosidad interna. La densidad de la pieza en bruto

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

prensada generalmente alcanza el 60%-70% de la densidad teórica, sentando las bases para la sinterización posterior.

El diseño del molde es crucial para el prensado. Los materiales del molde generalmente están hechos de carburo cementado o acero de alta resistencia para soportar la alta presión y el uso repetido. La geometría del molde debe coincidir con precisión con la forma final del electrodo de molibdeno, por ejemplo, se requiere un molde cilíndrico para un electrodo de varilla. Durante el proceso de prensado, la fluidez del polvo de molibdeno es un factor clave. Una fluidez demasiado baja puede dar lugar a una densidad desigual. Por lo tanto, a menudo se agrega una pequeña cantidad de lubricante (como estearato de zinc) para mejorar la fluidez del polvo y reducir el desgaste del molde.

### 3.2.1.2 Sinterización a alta temperatura

La pieza en bruto de molibdeno prensada debe procesarse en un horno de sinterización a alta temperatura, generalmente en un entorno de hidrógeno o vacío, con un rango de temperatura de 1800-2200 °C. El proceso de sinterización mejora la densidad y la resistencia de la pieza en bruto a través de la difusión atómica, acercándola a la densidad teórica (10,2 g/cm<sup>3</sup>). La protección del hidrógeno evita que el molibdeno reaccione con el oxígeno, mientras que la sinterización al vacío es adecuada para aplicaciones con requisitos de alta pureza.

La optimización de la temperatura y el tiempo de sinterización es crucial para la calidad del producto final. Una temperatura demasiado alta puede causar un crecimiento excesivo del grano y reducir la resistencia mecánica; Una temperatura demasiado baja conducirá a una densidad insuficiente, lo que afectará la conductividad y la resistencia a la corrosión. Según China Tungsten Online (baike.ctia.com.cn), los hornos de sinterización modernos utilizan tecnología de control de temperatura de precisión y las fluctuaciones de temperatura se controlan dentro de ±5 °C para garantizar una calidad constante del producto.

### 3.2.2 Procesamiento posterior (forja, laminado, trefilado)

La pieza en bruto de molibdeno sinterizado generalmente requiere un procesamiento adicional para lograr la forma final y los requisitos de rendimiento. La forja mejora la densidad y la resistencia mecánica del molibdeno a través del martilleo o la extrusión repetidos, especialmente para los electrodos de varilla. La temperatura de forja es generalmente de 1200-1500 °C para garantizar una plasticidad suficiente del molibdeno. El laminado se utiliza para producir electrodos de molibdeno en placas o tiras. La pieza en bruto se presiona en una placa delgada a través de múltiples pasadas de laminación, y el grosor puede tener una precisión de unos pocos milímetros.

El trefilado se utiliza principalmente para fabricar electrodos de molibdeno en forma de alambre. Por lo general, adopta múltiples pasadas de estirado y tratamiento de recocido para eliminar la tensión interna. Durante el proceso de trefilado, el diámetro del alambre de molibdeno se puede reducir de unos pocos milímetros a decenas de micras, lo que es adecuado para aplicaciones de precisión en la industria electrónica. La precisión del procesamiento posterior afecta directamente

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

la calidad de la superficie y la vida útil del electrodo de molibdeno. Por ejemplo, la rugosidad de la superficie debe controlarse por debajo de Ra 0,8  $\mu\text{m}$ .

### 3.3 Tratamiento superficial y control de calidad de electrodos de molibdeno

#### 3.3.1 Pulido y tratamiento antioxidante

El tratamiento de la superficie de los electrodos de molibdeno es un paso clave para mejorar su rendimiento y vida útil. El pulido elimina los defectos de la superficie mediante métodos mecánicos o electroquímicos hasta una rugosidad inferior a Ra 0,2  $\mu\text{m}$ . El electrodo de molibdeno pulido tiene una superficie lisa, lo que reduce el riesgo de descarga de arco y corrosión durante el uso. El pulido mecánico generalmente usa una muela abrasiva de diamante o pasta de pulido, mientras que el pulido electroquímico elimina las protuberancias microscópicas de la superficie a través de un electrolito (como una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico).

Para mejorar la resistencia a la oxidación, la superficie de los electrodos de molibdeno a menudo está recubierta con una capa de resistencia a la oxidación, como siliciuro de molibdeno ( $\text{MoSi}_2$ ) u óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Estos recubrimientos pueden formar una película protectora densa a altas temperaturas para evitar que el oxígeno reaccione con el molibdeno. Por ejemplo, los recubrimientos de siliciuro de molibdeno pueden permanecer estables en el aire a 1000  $^\circ\text{C}$ , lo que prolonga significativamente la vida útil de los electrodos de molibdeno. China Tungsten Online ([www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)) informó que la aplicación de la tecnología de recubrimiento ha aumentado la vida útil de los electrodos de molibdeno en hornos de vidrio en más del 30%.

#### 3.3.2 Métodos de prueba de rendimiento

El control de calidad de los electrodos de molibdeno se lleva a cabo a lo largo de todo el proceso de producción. Las pruebas de rendimiento incluyen pruebas de densidad (generalmente utilizando el método de Arquímedes), pruebas de dureza (probador de dureza Rockwell o Vickers), medición de resistividad (método de cuatro sondas) y análisis de composición química (ICP-MS o XRF). La densidad es un indicador importante para evaluar la densificación, y la densidad de los electrodos de molibdeno estándar debe alcanzar los 10,15-10,2  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Las pruebas de dureza reflejan la resistencia mecánica del material, que suele estar entre 70 y 90 HRB.

Además, las pruebas ultrasónicas y las pruebas de rayos X se utilizan para comprobar si hay defectos internos como poros o grietas. La calidad de la superficie se evalúa mediante observación microscópica o medición de la rugosidad para garantizar el cumplimiento de las normas industriales. Estos métodos de prueba garantizan que el rendimiento de los electrodos de molibdeno cumpla con los requisitos de la aplicación.

### 3.4 Innovación y mejora del proceso de producción de electrodos de molibdeno

#### 3.4.1 Nuevas tecnologías (como la impresión 3D)

La tecnología de impresión 3D (fabricación aditiva) ha aportado nuevas posibilidades para la producción de electrodos de molibdeno. Los electrodos de molibdeno de forma compleja se pueden imprimir directamente a partir de polvo de molibdeno mediante la tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). Este método es especialmente

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

adecuado para la producción personalizada en lotes pequeños. Por ejemplo, el campo aeroespacial puede requerir electrodos de molibdeno de forma especial, y la impresión 3D puede acortar significativamente el ciclo de producción.

Sin embargo, la impresión 3D de electrodos de molibdeno se enfrenta a desafíos, como el control de la estabilidad del baño de fusión y la complejidad del posprocesamiento. La investigación actual se centra en la optimización de los parámetros de impresión y el desarrollo de polvos de molibdeno de alta fluidez. Según un informe de China Tungsten Online (cn.ctia.group), la densidad de los electrodos de molibdeno impresos en 3D es cercana a la de la pulvimetalurgia tradicional, pero el costo sigue siendo alto.

### 3.4.2 Tendencias de producción respetuosas con el medio ambiente

Con el endurecimiento de las regulaciones ambientales, la producción de electrodos de molibdeno está cambiando gradualmente hacia la fabricación ecológica. El proceso tradicional de sinterización produce una pequeña cantidad de gas residual (como la humedad del hidrógeno), y las empresas modernas utilizan tecnologías de filtración y recuperación de alta eficiencia para reducir las emisiones. Por ejemplo, un sistema de hidrógeno de circuito cerrado puede reciclar la humedad de los gases residuales en hidrógeno, reduciendo el consumo de energía y la contaminación. China Tungsten Online (news.chinatungsten.com) señaló que la aplicación de hornos de sinterización de baja energía y energía renovable se está convirtiendo en una tendencia de la industria.

Además, también se ha prestado atención al reciclaje de residuos de molibdeno. Los electrodos de molibdeno de desecho se pueden refinar en polvo de molibdeno por métodos químicos o físicos, y la tasa de reciclaje puede alcanzar más del 90%. Esto no solo reduce los costos de producción, sino que también reduce el desperdicio de recursos.



#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

## Capítulo 4 Orígenes principales de los electrodos de molibdeno

### 4.1 Distribución de los recursos mundiales de molibdeno

#### 4.1.1 Principales zonas productoras de mineral de molibdeno (China, Estados Unidos, Chile, etc.)

Los recursos mundiales de molibdeno se distribuyen principalmente en unos pocos países, entre los que dominan China, Estados Unidos y Chile. China es el mayor productor de molibdeno del mundo, con reservas de molibdeno que representan alrededor del 50% del mundo, distribuidas principalmente en el condado de Lushi, Henan, Jinduicheng, Shaanxi y Ulanqab, Mongolia Interior. Las reservas de molibdenita en estas áreas son ricas y de alta ley, con un contenido promedio de molibdeno de 0.1% a 0.3%. En 2023, la producción de molibdeno de China superó las 120.000 toneladas, lo que representa más del 40% del mundo.

Estados Unidos es otra importante zona productora de molibdeno, con reservas que representan alrededor del 20% del mundo, concentradas principalmente en la zona minera de Climax en Colorado y en la zona minera de Thompson Creek en Utah. La mina Climax es la mina de molibdeno más grande del mundo, con un volumen minero histórico de más de 2 millones de toneladas. Los recursos de molibdeno de Chile coexisten principalmente con las minas de cobre, concentradas en las zonas mineras de Chuquicamata y Escondida, y la producción de molibdeno representa alrededor del 10% del total mundial, principalmente como subproducto del concentrado de cobre.

Otras zonas de producción son Rusia (Siberia), Canadá (Columbia Británica) y Perú (región de Arequipa), pero la producción es relativamente pequeña, con reservas que representan alrededor del 10%.

La minería de molibdeno en estas áreas está limitada por el terreno y las condiciones ambientales, y el costo de desarrollo es alto.

#### 4.1.2 Producción y reservas de molibdeno

Según la Asociación Internacional del Molibdeno (IMOA), la producción mundial de molibdeno en 2023 será de unas 300.000 toneladas, de las cuales China aportará 125.000 toneladas, Estados Unidos 40.000 toneladas y Chile 30.000 toneladas. Las reservas mundiales de molibdeno se estiman en 15 millones de toneladas, suficiente para satisfacer la demanda minera en los próximos 50 años. Sin embargo, el desequilibrio en la distribución de los recursos de molibdeno ha provocado grandes fluctuaciones en los precios del mercado, especialmente en tiempos de tensión geopolítica. Como proveedor principal, la política de exportación de China tiene un impacto significativo en el mercado global.

La minería y el procesamiento de molibdeno también deben tener en cuenta los impactos ambientales. Por ejemplo, el proceso de flotación de molibdenita produce relaves y aguas

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

residuales, que deben tratarse estrictamente para reducir la contaminación. En los últimos años, muchos países han aprobado leyes que exigen a las empresas que adopten tecnologías de minería verde, como el apilamiento en seco de relaves y el reciclaje de agua. China Tungsten Online (news.chinatungsten.com) informó que China está promoviendo un proyecto piloto para la minería verde de minas de molibdeno, con el objetivo de reducir el consumo de energía de la mina de molibdeno en un 15% para 2025.

## 4.2 Bases de producción de electrodos de molibdeno

### 4.2.1 China (Shaanxi, Henan y otras regiones)

Las bases de producción de electrodos de molibdeno de China se concentran principalmente en Jinduicheng, Shaanxi y Luoyang, Henan. Jinduicheng Molibdeno es la empresa de producción de molibdeno más grande de China, con una producción anual de más de 50,000 toneladas de concentrado y productos de molibdeno. Sus productos de electrodos de molibdeno son ampliamente utilizados en las industrias del vidrio y metalúrgica. Shaanxi se ha convertido en el centro de producción de electrodos de molibdeno en China con sus ricos recursos de molibdeno y su sólida base industrial.

Luoyang, Henan, es otro sitio de producción importante. Luoyang Molybdenum Group (LME) es un proveedor líder mundial de productos de molibdeno, con una producción anual de más de 20.000 toneladas de electrodos de molibdeno. El área de Luoyang ha promovido la innovación de procesos de electrodos de molibdeno, como la tecnología de recubrimiento antioxidante, confiando en universidades locales e instituciones de investigación científica (como el Instituto de Investigación de Metales, Academia China de Ciencias).

### 4.2.2 Estados Unidos (Colorado, Utah, etc.)

La producción de electrodos de molibdeno en los Estados Unidos se concentra principalmente en el área minera de Climax en Colorado y el área minera de Thompson Creek en Utah. Climax Molybdenum es el mayor productor de molibdeno de los Estados Unidos, y sus productos de electrodos de molibdeno se exportan principalmente a los mercados de América del Norte y Europa. La producción de electrodos de molibdeno en Colorado adopta equipos de automatización avanzados, y su eficiencia de producción y calidad del producto se encuentran entre las mejores del mundo.

El área minera de Thompson Creek en Utah se enfoca en productos de molibdeno de alta pureza, y sus electrodos de molibdeno se usan ampliamente en la investigación aeroespacial y científica. La producción de electrodos de molibdeno en los Estados Unidos está sujeta a una estricta supervisión ambiental y las empresas deben cumplir con los estándares de la EPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) durante el proceso de producción.

### 4.2.3 Europa (Austria, Alemania, etc.)

La producción de electrodos de molibdeno en Europa se realiza principalmente en Austria y Alemania. El Grupo Plansee en Austria es el fabricante líder mundial de productos de molibdeno, con una producción anual de más de 10.000 toneladas de electrodos de molibdeno. Su base de

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

producción se encuentra en la zona de Reutte. Basándose en la tecnología metalúrgica local de alta gama y las capacidades de procesamiento de precisión, los productos de electrodos de molibdeno de Plansee se utilizan ampliamente en las industrias del vidrio y la electrónica.

H.C. Starck en Alemania es otro fabricante importante. Sus productos de electrodos de molibdeno son conocidos por su alta pureza y personalización. Los fabricantes alemanes se centran en la investigación y el desarrollo. En los últimos años, han lanzado electrodos de molibdeno dopados con elementos de tierras raras para mejorar su rendimiento a altas temperaturas. La producción de electrodos de molibdeno en Europa está estrictamente limitada por las regulaciones ambientales de la UE, y la tecnología de producción verde se ha convertido en una tendencia de la industria.

#### 4.2.4 Otros países (Rusia, Canadá, etc.)

La producción rusa de electrodos de molibdeno se concentra principalmente en la zona minera de Norilsk, en Siberia. Norilsk Nickel es el principal productor, con una producción anual de unas 5.000 toneladas de productos de molibdeno. Los electrodos de molibdeno de Rusia se utilizan principalmente en la industria metalúrgica nacional y el volumen de exportación es relativamente pequeño.

La producción de electrodos de molibdeno de Canadá se concentra en la zona minera de Endako en Columbia Británica, y Thompson Creek Metals es la empresa principal. Sus productos de electrodos de molibdeno sirven principalmente al mercado norteamericano, y sus áreas de aplicación incluyen la investigación científica y la aeroespacial. La producción de molibdeno de Canadá está limitada por las reservas de recursos, y su producción representa solo alrededor del 1% del total mundial.

### 4.3 Visión general de los principales fabricantes

#### 4.3.1 CTIA GRUPO LTD

CTIA GROUP LTD (<http://molybdenum.com.cn/Chinese/molybdenum-electrodes.html>) es el principal fabricante de electrodos de molibdeno de China, con sede en Xiamen. Basándose en abundantes recursos de molibdeno y equipos de producción avanzados, los productos de la empresa cubren los campos del vidrio, la metalurgia y la electrónica. CTIA GROUP LTD también ofrece servicios personalizados, como electrodos de varilla ultralargos y productos de recubrimiento antioxidante, y su nivel técnico se encuentra en una posición de liderazgo en Asia.

CTIA GROUP LTD ofrece principalmente tres tipos de productos de electrodos: electrodo de molibdeno puro, electrodo de molibdeno recubierto de antioxidante y electrodo de molibdeno reforzado con partículas cerámicas de óxido de circonio. Los productos suministrados tienen las siguientes ventajas:

- Cubriendo todas las especificaciones y tamaños, proceso de forja de gran deformación, larga vida útil
- Resistencia a la corrosión, buena estabilidad
- Excelente resistencia a la fluencia

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

- Alta conductividad eléctrica y conductividad térmica
- El electrodo recubierto tiene un excelente rendimiento antioxidante

**4.3.1.1 Comparación del rendimiento de los electrodos de molibdeno y aleación de molibdeno de CTIA GROUP LTD:**



**4.3.1.2 Rendimiento del electrodo de molibdeno CTIA GROUP LTD:**

**• Durabilidad a alta temperatura del electrodo de molibdeno**

| Electrodes                           | Specifications | CTIA GROUP LTD    |
|--------------------------------------|----------------|-------------------|
| Pure Molybdenum Electrode            | Ø 50.8mm       | Deformation 0.37% |
| At 1200°C, 200MPa stress, 1000 hours |                |                   |

**• Rendimiento de recristalización del electrodo de molibdeno**

**DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL**

| Electrodes                     | Specifications | CTIA GROUP LTD  |                 |
|--------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|
|                                |                | Deformation 60% | Deformation 90% |
| Pure Molybdenum Electrode      | Ø 50.8mm       | 1250°C          | 1150°C          |
| Molybdenum Zirconium Electrode | Ø 50.8mm       | 1480°C Above    | 1400°C Above    |

• Densidad del electrodo de molibdeno

| Electrodes                | Specifications    | CTIA GROUP LTD |
|---------------------------|-------------------|----------------|
| Pure Molybdenum Electrode | Ø 30.0 - 101.0 mm | >10.10         |
|                           | Ø ≥ 101.0 mm      | >9.90          |
| Pure Molybdenum Electrode | Ø 30.0 - 101.0 mm | >10.0          |
|                           | Ø ≥ 101.0 mm      | >9.85          |



Imagen de los electrodos de molibdeno recubiertos fabricados por CTIA GROUP LTD

Capítulo 5 Campos de aplicación de los electrodos de molibdeno

5.1 Industria del vidrio

5.1.1 Electrodos de horno de fusión de vidrio

En la industria del vidrio, los electrodos de molibdeno son los componentes principales de los hornos de fusión de vidrio totalmente eléctricos. La fusión de vidrio requiere calentar materias primas (como arena de cuarzo y carbonato de sodio) a 1400-1600 °C y fundirlas en vidrio líquido uniforme. Los métodos tradicionales de calefacción de petróleo o gas tienen problemas de alto consumo de energía y alta contaminación, mientras que los electrodos de molibdeno generan calor

DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

Joule mediante suministro de energía directo, proporcionando una solución de calefacción eficiente y limpia.

La forma en forma de varilla de los electrodos de molibdeno generalmente se instala en la pared lateral o en la parte inferior del horno, y el arco eléctrico o el calentamiento por resistencia se forman mediante electricidad. El diámetro de cada electrodo de molibdeno puede alcanzar los 50-152,4 mm, y la longitud se puede personalizar según el tamaño del horno, hasta 1,5 m o más. Su alto punto de fusión (2623 °C) y su resistencia a la corrosión le permiten resistir óxidos de metales alcalinos (como Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O) y la corrosión a alta temperatura en vidrio fundido. Según un estudio de caso realizado por China Tungsten Online (news.chinatungsten.com), una fábrica de vidrio china aumentó la eficiencia de su horno en un 20% y mejoró la transparencia de la calidad de su vidrio en un 15% después de usar electrodos de molibdeno.

### 5.1.2 Fabricación de vidrio óptico y vidrio especial

El vidrio óptico y el vidrio especial tienen requisitos de calidad extremadamente altos y requieren un control preciso de la temperatura y un calentamiento uniforme. Los electrodos de molibdeno son la primera opción en la producción de vidrio óptico debido a su excelente conductividad térmica y estabilidad. Por ejemplo, al fabricar lentes ópticas de alta precisión, los electrodos de molibdeno garantizan que la fluctuación de temperatura del vidrio fundido se controle dentro de  $\pm 5$  °C, lo que reduce los defectos causados por el estrés térmico.

Los vidrios especiales, como el vidrio resistente al calor y el vidrio a prueba de balas, también dependen del proceso de producción de electrodos de molibdeno. En estos campos, la resistencia a la corrosión y la larga vida útil de los electrodos de molibdeno son ventajas clave. Según "La aplicación de los electrodos de molibdeno en la industria del vidrio" [3], la vida útil de los electrodos de molibdeno puede alcanzar más de 3.000 horas, superando con creces la de los electrodos de grafito (1.000 horas).

## 5.2 Industria metalúrgica

### 5.2.1 Horno de fusión y arco eléctrico a alta temperatura

En la industria metalúrgica, los electrodos de molibdeno se utilizan ampliamente en hornos de fusión a alta temperatura y de arco eléctrico para producir aleaciones de alto rendimiento y aceros especiales. La fusión a alta temperatura generalmente requiere calentar las materias primas metálicas a más de 1500 °C. Los electrodos de carbono convencionales o los electrodos de grafito son susceptibles a la oxidación y la corrosión en tales condiciones, mientras que el alto punto de fusión (2623 °C) y la resistencia a la corrosión de los electrodos de molibdeno los convierten en una opción ideal.

En un horno de arco eléctrico, los electrodos de molibdeno se energizan para generar un arco para calentar las materias primas metálicas para la fusión. Por ejemplo, en la producción de ferromolibdeno (<http://www.ferro-tungsten.com>) o aleaciones de molibdeno, los electrodos de molibdeno se utilizan como electrodos negativos o positivos. Su transmisión de corriente estable y resistencia a altas temperaturas garantizan la eficiencia del proceso de fusión y la calidad del producto. Según "La aplicación del molibdeno en la industria metalúrgica" [4], los hornos de arco

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

eléctrico que utilizan electrodos de molibdeno pueden acortar el tiempo de fusión entre un 15% y un 20% al tiempo que mejoran la pureza de la aleación.

Además, la aplicación de electrodos de molibdeno en hornos de fusión al vacío también está aumentando. El entorno de vacío puede evitar la oxidación, y los electrodos de molibdeno muestran una vida útil más larga en esta condición. Por ejemplo, al producir aleaciones de titanio o superaleaciones a base de níquel, los electrodos de molibdeno pueden soportar entornos de vacío de hasta 2000 °C sin pérdidas significativas. El análisis de caso muestra que después de que una empresa metalúrgica estadounidense utilizó electrodos de molibdeno, sus costos de producción disminuyeron en un 12% y la calidad del producto mejoró en un 10%.

### 5.2.2 Papel en la producción de aleaciones

Los electrodos de molibdeno desempeñan un papel clave en la producción de aleaciones, especialmente en escenarios donde se requiere estabilidad y conductividad a altas temperaturas. El molibdeno en sí mismo es un elemento de aleación importante, y su alta resistencia y resistencia a la corrosión se usan ampliamente en aleaciones a base de acero y níquel. Como material de electrodo, los electrodos de molibdeno pueden proporcionar una fuente de calor estable y energía eléctrica para la fusión de aleaciones. Por ejemplo, al producir acero inoxidable y acero para herramientas, los electrodos de molibdeno se utilizan en hornos de arco para garantizar la distribución uniforme de los elementos de molibdeno en la aleación.

Los electrodos de molibdeno también se utilizan para producir materiales compuestos a base de molibdeno, como aleaciones de molibdeno-titanio o aleaciones de molibdeno-circonio. Estos materiales compuestos son ampliamente utilizados en las industrias aeroespacial y nuclear, y la estabilidad del electrodo de molibdeno afecta directamente el rendimiento del producto final. China Tungsten Online (wiki.ctia.com.cn) informó que un nuevo tipo de electrodo de aleación de molibdeno-tierras raras ha mejorado su rendimiento de fluencia a alta temperatura en un 25%, promoviendo su aplicación en la producción de aleaciones de alta gama.

## 5.3 Industria electrónica y de semiconductores

### 5.3.1 Tubos de vacío y tubos de descarga

En la industria electrónica, los electrodos de molibdeno se utilizan ampliamente en tubos de vacío y tubos de descarga debido a su alta conductividad y estabilidad a alta temperatura. Los tubos de vacío son componentes centrales de los primeros dispositivos electrónicos, como radios, televisores y radares, y sus electrodos internos deben soportar altos voltajes y altas temperaturas en un entorno de vacío. Los electrodos de molibdeno son materiales ideales por su baja resistividad ( $5,2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) y su alto punto de fusión (2623°C), y pueden funcionar de forma estable durante miles de horas en el vacío.

Los tubos de descarga, como las lámparas de xenón o las lámparas de criptón, también dependen de electrodos de molibdeno como materiales de electrodos. Estas lámparas funcionan a altas temperaturas y altos voltajes, y la resistencia a la oxidación y la conductividad de los electrodos de molibdeno garantizan la estabilidad de la salida de luz y la vida útil. Según "Aplicaciones del

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

molibdeno en la industria electrónica" [5], la vida útil de los electrodos de molibdeno en tubos de vacío puede alcanzar las 5.000 horas, superando con creces la de los electrodos de cobre o níquel.

### 5.3.2 Deposición de película delgada y dispositivos microelectrónicos

En la industria de los semiconductores, los electrodos de molibdeno se utilizan como objetivos de pulverización catódica para los procesos de deposición de películas delgadas. La pulverización catódica es una tecnología física de deposición de vapor que deposita átomos de molibdeno en un sustrato bombardeando un objetivo de molibdeno con iones de alta velocidad para formar una capa conductora o reflectante. Los objetivos de molibdeno se utilizan ampliamente en la producción de transistores de película delgada (TFT), células solares y pantallas de visualización debido a su alta pureza (generalmente superior al 99,95%) y uniformidad.

El bajo coeficiente de expansión térmica de los electrodos de molibdeno ( $4,8 \times 10^{-6}/K$ ) combina bien con los sustratos de silicio, lo que reduce los problemas de tensión durante la deposición de película delgada. Por ejemplo, en la producción de pantallas LCD, los objetivos de los electrodos de molibdeno garantizan la uniformidad y la conductividad de la película, mejorando el brillo y la vida útil de la pantalla. Según un estudio de caso de China Tungsten Online (<http://www.tungsten-copper.com>), una empresa coreana de semiconductores aumentó su tasa de calificación de productos en un 8% después de utilizar objetivos de molibdeno.

Además, los electrodos de molibdeno también se utilizan en materiales de interconexión de dispositivos microelectrónicos. Los dispositivos microelectrónicos requieren materiales de electrodos altamente conductores y estables. Los electrodos de molibdeno se han convertido en una alternativa al cobre o al aluminio debido a su resistencia a la migración y a su estabilidad a altas temperaturas.

## 5.4 Investigación científica y usos especiales

### 5.4.1 Equipos experimentales de alta temperatura

En el campo de la investigación científica, los electrodos de molibdeno se utilizan ampliamente en equipos experimentales de alta temperatura, como hornos de vacío, hornos de plasma y analizadores térmicos. Estos dispositivos deben funcionar a altas temperaturas superiores a 2000 °C. Los materiales tradicionales como el grafito o la cerámica son difíciles de cumplir con los requisitos, mientras que el alto punto de fusión y la estabilidad de los electrodos de molibdeno los convierten en la primera opción.

Por ejemplo, en la investigación de la ciencia de los materiales, los electrodos de molibdeno se utilizan para pruebas de tracción a alta temperatura o pruebas de expansión térmica para probar el rendimiento de nuevos materiales a alta temperatura en condiciones extremas. Según "Electrodos de molibdeno en la investigación de materiales de alta temperatura" [6], la tasa de deformación de los electrodos de molibdeno en un entorno de vacío a 2000 °C es inferior al 0,5%, lo que garantiza la fiabilidad de los datos experimentales. China Tungsten Online ([baike.ctia.com.cn](http://baike.ctia.com.cn)) informó que un instituto de investigación chino probó con éxito el rendimiento de la aleación de molibdeno-niobio en un horno de vacío utilizando electrodos de molibdeno, promoviendo su aplicación en la

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

industria aeroespacial.

#### 5.4.2 Industria aeroespacial y nuclear

En la industria aeroespacial, los electrodos de molibdeno se utilizan para fabricar hornos de prueba de alta temperatura y componentes de motores. Por ejemplo, la cámara de combustión de un motor de cohete debe soportar temperaturas superiores a 2000 °C. Los electrodos de molibdeno se utilizan como elementos de calentamiento o prueba para garantizar la precisión de las pruebas de rendimiento del material.

En la industria nuclear, los electrodos de molibdeno se utilizan en ciertas partes de los reactores nucleares debido a su resistencia a la radiación y estabilidad a altas temperaturas. Por ejemplo, los electrodos de molibdeno se pueden utilizar como materiales de electrodos en la fundición de combustible nuclear, soportando altas temperaturas y entornos de radiación sin daños significativos. Según "Aplicaciones del molibdeno en la industria nuclear" [7], la vida útil de los electrodos de molibdeno en los reactores nucleares puede alcanzar más de 10 años.

### 5.5 Campos de aplicación emergentes

#### 5.5.1 Equipos de energía renovable

Con el rápido desarrollo de las energías renovables, la aplicación de electrodos de molibdeno en células solares y dispositivos de almacenamiento de energía ha aumentado gradualmente. En las células solares, los electrodos de molibdeno se utilizan como materiales de electrodo trasero. Su alta conductividad y estabilidad mejoran la eficiencia de conversión de la célula. Por ejemplo, las células solares de seleniuro de cobre, indio y galio (CIGS) utilizan electrodos de molibdeno como capas de contacto posterior para garantizar una recolección eficiente de corriente.

En los dispositivos de almacenamiento de energía, los electrodos de molibdeno se utilizan como materiales de electrodos para supercondensadores y baterías de litio. Su resistencia a altas temperaturas y conductividad eléctrica ayudan a mejorar la eficiencia del almacenamiento de energía. Según un informe de China Tungsten Online (<http://www.tungsten-copper.com>), la aplicación de electrodos de molibdeno en células solares ha representado el 5% de su demanda total y se espera que crezca hasta el 10% para 2030.

#### 5.5.2 Componentes de dispositivos médicos

En el campo de los dispositivos médicos, los electrodos de molibdeno se utilizan en equipos de rayos X y dispositivos de radioterapia. Por ejemplo, los electrodos de molibdeno se utilizan a menudo como cátodos y ánodos en tubos de rayos X. Su alto punto de fusión y resistencia a la corrosión aseguran la estabilidad y la vida útil del equipo. En radioterapia, los electrodos de molibdeno se utilizan para fabricar dispositivos de enfoque para haces de partículas de alta energía para controlar con precisión las dosis de radiación.

Según "Aplicaciones de molibdeno en dispositivos médicos" [8], la vida útil de los electrodos de molibdeno en tubos de rayos X puede alcanzar las 5.000 horas, lo que reduce significativamente los costos de mantenimiento del equipo. Además, el molibdeno tiene una baja biocompatibilidad, pero después de un tratamiento de recubrimiento específico, se puede utilizar en ciertos

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

dispositivos médicos implantables.



Escenarios de aplicación de electrodos de molibdeno de CTIA GROUP LTD Imágenes

## Capítulo 6 Ventajas, desventajas y limitaciones de los electrodos de molibdeno

### 6.1 Ventajas de los electrodos de molibdeno

#### 6.1.1 Estabilidad a alta temperatura y larga vida útil

El alto punto de fusión (2623 °C) de los electrodos de molibdeno los hace estables a temperaturas extremadamente altas, lo que los convierte en una opción ideal para hornos de fusión de vidrio, hornos de arco y equipos experimentales de alta temperatura. En la industria del vidrio, la vida útil de los electrodos de molibdeno puede alcanzar las 3000-5000 horas, superando con creces los electrodos de grafito (1000 horas) y los electrodos de carbono (1500 horas). Su larga vida útil se debe al hecho de que la estructura cristalina del molibdeno no es propensa al cambio de fase o a la descomposición a altas temperaturas.

En un entorno de vacío o gas inerte, la vida útil de los electrodos de molibdeno se prolonga aún más. Por ejemplo, en un horno experimental aeroespacial, la tasa de deformación de los electrodos de molibdeno en un entorno de vacío a 2000 °C es inferior al 0,5%, lo que garantiza la fiabilidad del experimento y la durabilidad del equipo. China Tungsten Online (wiki.ctia.com.cn) informó que el horno experimental de un instituto de investigación europeo que utilizaba electrodos de molibdeno funcionó durante 8000 horas y solo necesitó ser reemplazado una vez.

#### 6.1.2 Excelente conductividad y resistencia a la corrosión

La resistividad del electrodo de molibdeno es de  $5.2 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ , y su conductividad es solo superada por el cobre y la plata. Se comporta bien en metales de alta temperatura. Su alta conductividad garantiza una transmisión eficiente de energía en hornos de arco y tubos de

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

vacío, con pérdida de energía por enrojecimiento. En los hornos de fundición de vidrio, la conductividad de los electrodos de molibdeno aumenta la eficiencia de calentamiento en más del 20%.

Los electrodos de molibdeno también son muy resistentes a la corrosión en ácidos no oxidantes (como el ácido clorhídrico y el ácido sulfúrico) y vidrio fundido. Por ejemplo, en el vidrio fundido, la tasa de corrosión del molibdeno es inferior a 0,1 mm/año, mientras que la tasa de corrosión de los electrodos de grafito puede alcanzar más de 1 mm/año. Esta resistencia a la corrosión hace que funcione bien en entornos industriales hostiles.

### 6.1.3 Fiabilidad en entornos extremos

Los electrodos de molibdeno pueden adaptarse a varios entornos extremos, como alta temperatura (por encima de 2000 °C), vacío (por debajo de 10<sup>-6</sup>Pa) y alta radiación (industria nuclear). En el campo aeroespacial, los electrodos de molibdeno se utilizan para probar nuevos materiales de alta temperatura, y su estabilidad garantiza la precisión de los datos experimentales. En los reactores nucleares, la resistencia a la radiación y el rendimiento a alta temperatura de los electrodos de molibdeno los convierten en la elección de componentes clave.

## 6.2 Desventajas y limitaciones de los electrodos de molibdeno

### 6.2.1 Sensibilidad a la oxidación y restricciones ambientales

El rendimiento de los electrodos de molibdeno en atmósferas oxidantes es su principal limitación. Cuando la temperatura supera los 600 °C, el molibdeno reacciona con el oxígeno para formar trióxido de molibdeno volátil (MoO<sub>3</sub>), lo que provoca una rápida pérdida de la superficie del electrodo. En aire por encima de 1000 °C, los electrodos de molibdeno pueden oxidarse por completo en unas pocas horas. Por lo tanto, los electrodos de molibdeno deben usarse en gases inertes (como el argón) o atmósferas reductoras (como el hidrógeno), lo que aumenta la complejidad operativa y el costo.

### 6.2.2 Dificultad y costo de procesamiento

El molibdeno tiene una alta dureza (70-90HRB) y baja ductilidad, y es propenso a la fractura frágil, especialmente a bajas temperaturas. Esto hace que los electrodos de molibdeno sean difíciles de procesar y requieran forja, laminado o estirado a altas temperaturas (200-300 °C). El proceso de procesamiento requiere equipos de precisión y operadores experimentados, y es costoso. Según los datos de mercado de China Tungsten Online (news.chinatungsten.com), el coste medio de producción de los electrodos de molibdeno en 2023 es de unos 25-30 dólares/kg, muy superior al de los electrodos de grafito (5-10 dólares/kg).

### 6.2.3 Limitaciones de fragilidad y propiedades mecánicas

La fragilidad del molibdeno a bajas temperaturas es otra desventaja. A temperatura ambiente, el molibdeno tiene una baja resistencia al impacto y es propenso a fracturas frágiles, especialmente bajo cargas de soldadura o impacto. Aunque la plasticidad mejora a altas temperaturas, sigue siendo inferior a la del cobre o el aluminio. Esto limita los electrodos de molibdeno a ciertas aplicaciones que requieren una alta tenacidad.

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

### 6.3 Medidas de mejora para los electrodos de molibdeno

#### 6.3.1 Tecnología antioxidante

Para resolver el problema de la sensibilidad a la oxidación, la industria ha desarrollado una variedad de tecnologías antioxidantes. Los más comunes son los recubrimientos de superficies, como el siliciuro de molibdeno ( $\text{MoSi}_2$ ) y el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que pueden formar un filamento protector a altas temperaturas para evitar que el oxígeno reaccione con el molibdeno. China Tungsten Online ([www.chinatungsten.com](http://www.chinatungsten.com)) informó que la vida útil de los electrodos de molibdeno recubiertos en el aire a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$  se puede extender en más del 50%.

Además, la tecnología del dopaje también ha sido ampliamente estudiada. Por ejemplo, la adición de elementos de tierras raras (como lantano, cerio) o titanio puede mejorar la resistencia a la oxidación y la estabilidad a altas temperaturas del molibdeno. Estas mejoras se han aplicado a las industrias aeroespacial y nuclear.

#### 6.3.2 Desarrollo de materiales compuestos

El desarrollo de materiales compuestos a base de molibdeno es otra dirección de mejora. Por ejemplo, los compuestos de molibdeno-titanio combinan la estabilidad a altas temperaturas del molibdeno y la tenacidad del titanio para mejorar las propiedades mecánicas. Los electrodos compuestos de molibdeno-tierras raras muestran una mejor resistencia a la fluencia a altas temperaturas. Estos materiales compuestos se están utilizando gradualmente en mercados de alta gama.

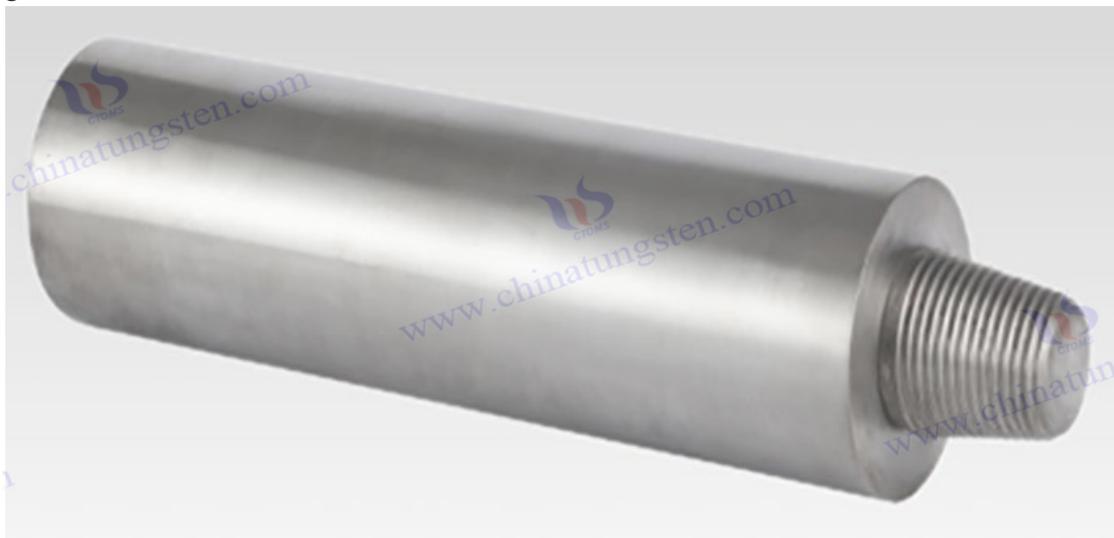


Imagen del electrodo de molibdeno de CTIA GROUP LTD

## Capítulo 7 Comparación del electrodo de molibdeno con otros materiales de electrodo

### 7.1 Comparación del electrodo de molibdeno con el electrodo de tungsteno

#### 7.1.1 Diferencia de rendimiento

El punto de fusión del electrodo de tungsteno (<http://tungsten.com.cn>) ( $3422\text{ }^\circ\text{C}$ ) es más alto que el del electrodo de molibdeno ( $2623\text{ }^\circ\text{C}$ ), lo que lo hace más ventajoso en un entorno de

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

temperatura ultra alta (>2500 °C). Sin embargo, la densidad del tungsteno (19,25 g/cm<sup>3</sup>) es mucho mayor que la del molibdeno (10,2 g/cm<sup>3</sup>), lo que lo hace más pesado e incómodo de procesar e instalar. La resistividad del tungsteno ( $5,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) es ligeramente superior a la del molibdeno, pero la conductividad térmica (174W/m·K) es ligeramente superior.

En términos de resistencia a la corrosión, el electrodo de molibdeno funciona mejor que el tungsteno en ácido no oxidante y vidrio fundido, pero el tungsteno tiene mejor resistencia a la oxidación en un entorno oxidante. El electrodo de tungsteno tiene menor ductilidad que el molibdeno, es más difícil de procesar y tiene un costo más alto.

### 7.1.2 Escenarios de aplicación

Los electrodos de tungsteno se utilizan principalmente en soldadura (como la soldadura TIG) y hornos de alta temperatura (como los hornos de plasma), mientras que los electrodos de molibdeno se utilizan ampliamente en hornos de fusión de vidrio y hornos de arco. Los electrodos de tungsteno son adecuados para aplicaciones de temperatura ultra alta debido a su punto de fusión extremadamente alto, pero su peso y costo limitan su uso en la industria del vidrio.

## 7.2 Comparación de electrodos de molibdeno y electrodos de grafito

### 7.2.1 Durabilidad y costo

La durabilidad de los electrodos de grafito es mucho menor que la de los electrodos de molibdeno. Su vida útil en ambientes corrosivos y de alta temperatura es de solo 1000 horas, mientras que los electrodos de molibdeno pueden alcanzar las 3000-5000 horas. Sin embargo, el costo de las materias primas (grafito o coque) de los electrodos de grafito es menor y el costo de producción es solo 1/3-1/5 del de los electrodos de molibdeno.

### 7.2.2 Rendimiento a altas temperaturas

El punto de fusión de los electrodos de grafito (alrededor de 3500 °C) es más alto que el del molibdeno, pero se oxidan fácilmente en atmósferas oxidantes, lo que limita su rango de aplicación. Los electrodos de molibdeno tienen una mejor estabilidad a altas temperaturas en entornos inertes o reductores, especialmente en hornos de fusión de vidrio.

## 7.3 Comparación entre el electrodo de molibdeno y el electrodo de cobre

### 7.3.1 Conductividad y resistencia a la temperatura

La conductividad del electrodo de cobre (resistividad  $1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ) es mucho mejor que la del electrodo de molibdeno, pero su punto de fusión (1085 °C) es bajo y no puede soportar un entorno de alta temperatura. Los electrodos de cobre son adecuados para aplicaciones conductivas de baja temperatura (como cables y equipos de bajo voltaje), mientras que los electrodos de molibdeno son adecuados para escenarios de alta temperatura y alta corrosión.

### 7.3.2 Entorno de uso

Los electrodos de cobre son estables en el aire, pero se corroen fácilmente por ácidos y sales. Los electrodos de molibdeno son resistentes a la corrosión en ácidos no oxidantes y vidrio fundido,

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

pero deben evitarse los entornos oxidantes.

## 7.4 Comparación entre electrodos de molibdeno y electrodos de metales preciosos (como el platino)

### 7.4.1 Economía y usos especiales

Los electrodos de platino tienen una excelente conductividad y resistencia a la corrosión, pero su costo es extremadamente alto (alrededor de US\$500-US\$1000/kg) y solo se utilizan en laboratorios o aplicaciones especiales (como sensores químicos). El costo de los electrodos de molibdeno (25-30 USD/kg) es mucho menor que el del platino y su rendimiento es totalmente suficiente para aplicaciones industriales.

## 7.5 Resumen comparativo completo

Los electrodos de molibdeno son superiores a los electrodos de grafito, cobre y metales preciosos en términos de estabilidad a alta temperatura, resistencia a la corrosión y rentabilidad, pero inferiores al tungsteno y al platino en entornos oxidantes. La selección de electrodos de molibdeno debe basarse en el entorno de aplicación específico y el presupuesto de costos.



Imagen de los electrodos de molibdeno fabricados por CTIA GROUP LTD

## Capítulo 8 Principales mercados de aplicación en el mundo

### 8.1 Asia Pacífico

#### 8.1.1 China (mercado del vidrio y metalúrgico)

Como el mercado consumidor más grande del mundo de electrodos de molibdeno, la demanda de China proviene principalmente de la industria del vidrio y la industria metalúrgica. En 2023, la demanda de electrodos de molibdeno de la industria del vidrio de China superará las 15.000 toneladas, lo que representa más del 60% de la demanda total del país. Esta demanda se concentra principalmente en las bases de producción de vidrio en Shandong, Hebei y Guangdong, que tienen

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

cientos de empresas de fabricación de vidrio que producen vidrio arquitectónico, vidrio automotriz y vidrio óptico. La aplicación de electrodos de molibdeno en hornos de vidrio fundido totalmente eléctricos ha mejorado significativamente la eficiencia de la producción y ha reducido el consumo de energía y las emisiones de carbono. Por ejemplo, una fábrica de vidrio en la provincia de Shandong ha aumentado la eficiencia de calentamiento del horno en un 20% y la transparencia de la calidad del vidrio en un 15% mediante el uso de electrodos de molibdeno con un diámetro de 100 mm y una longitud de 1200 mm (<http://molybdenum.com.cn/Chinese/molybdenum-electrodes.html>), ahorrando alrededor de 5 millones de RMB en costos de energía al año.

En la industria metalúrgica, la demanda de electrodos de molibdeno de China es de aproximadamente 5.000 toneladas, utilizados principalmente para producir ferromolibdeno (<http://www.ferro-tungsten.com>) y aceros de alta resistencia como acero para herramientas y acero inoxidable. Shaanxi Jinduicheng Molibdeno Industry y Henan Luoyang Molibdeno Industry Group son los principales proveedores. Estas empresas dependen de abundantes recursos de molibdeno y tecnología de producción avanzada para satisfacer las necesidades metalúrgicas en el país y en el extranjero. En 2023, la producción de hornos de arco eléctrico que utilizan electrodos de molibdeno en la industria metalúrgica de China aumentó un 12%, impulsando la expansión del mercado de materiales de aleación de alta gama.

El crecimiento del mercado chino también está respaldado por las políticas gubernamentales. Por ejemplo, el "14° Plan Quinquenal" hace hincapié en la fabricación ecológica y la conservación de la energía y la reducción de emisiones, y los electrodos de molibdeno se ven favorecidos por sus características de baja contaminación. China Tungsten Online ([news.chinatungsten.com](http://news.chinatungsten.com)) informó que en 2024, China planea invertir 2 mil millones de yuanes para actualizar los hornos de fusión de vidrio, elevando la tasa de penetración de los electrodos de molibdeno del 70% al 85%.

### 8.1.2 Japón y Corea del Sur (Electrónica y Semiconductores)

Japón y Corea del Sur son los centros de las industrias de electrónica y semiconductores en la región de Asia-Pacífico, y la demanda de electrodos de molibdeno en estos campos ha crecido constantemente. En 2023, la demanda de electrodos de molibdeno de Japón es de unas 3.000 toneladas, utilizadas principalmente para la pulverización catódica de semiconductores y la producción de pantallas. Los gigantes japoneses de la electrónica, como Toshiba y Sony, utilizan electrodos de molibdeno para fabricar transistores de película delgada (TFT) y pantallas de diodos emisores de luz orgánicos (OLED). La alta pureza (más del 99,95%) y el bajo coeficiente de expansión térmica ( $4,8 \times 10^{-6}/K$ ) de los electrodos de molibdeno garantizan la uniformidad de la deposición de película delgada y mejoran el brillo y la vida útil de la pantalla. Por ejemplo, una empresa japonesa aumentó su tasa de calificación de productos en un 10% y sus ventas anuales en un 8% mediante el uso de objetivos de molibdeno.

Corea del Sur es uno de los mayores productores de semiconductores del mundo. En 2023, la demanda de electrodos de molibdeno será de unas 2.000 toneladas, utilizadas principalmente en las fábricas de semiconductores de Samsung y SK Hynix. Los electrodos de molibdeno se utilizan como objetivos de pulverización catódica para producir chips de memoria y procesadores. Su conductividad y estabilidad son cruciales para el rendimiento de los dispositivos

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

microelectrónicos. Según los datos del Ministerio de Industria de Corea, Corea del Sur planea agregar 10 nuevas líneas de producción de semiconductores en 2024, y cada línea de producción consume alrededor de 50 toneladas de electrodos de molibdeno por año.

### 8.1.3 India (demanda en proceso de industrialización)

El proceso de industrialización de la India ha traído nuevas oportunidades de crecimiento al mercado de electrodos de molibdeno. En 2023, la demanda de electrodos de molibdeno de la India será de unas 1.000 toneladas, utilizadas principalmente en las industrias del vidrio y metalúrgica. Con el avance del plan "Hecho en 2025" de la India, la demanda de botellas de vidrio, vidrio plano y producción de acero ha crecido rápidamente. El número de hornos que utilizan electrodos de molibdeno en la industria del vidrio de la India ha aumentado de 50 en 2020 a 120 en 2023, con una tasa de crecimiento anual media del 30%.

La industria metalúrgica es otra fuente importante de demanda. Las acerías indias (como Tata Steel y JSW Steel) utilizan electrodos de molibdeno para producir acero de alta resistencia para la construcción de infraestructuras. En 2023, la industria metalúrgica india consumirá alrededor de 0,5 mil toneladas de electrodos de molibdeno, y se espera que crezca a 0,15 mil toneladas para 2027. China Tungsten Online (news.chinatungsten.com) predice que el mercado indio se convertirá en un punto caliente de crecimiento en la región de Asia-Pacífico en los próximos cinco años, pero debido a la escasez de recursos de molibdeno, India necesita depender de las importaciones.

## 8.2 América del Norte

### 8.2.1 Estados Unidos (vidrio y aeroespacial)

Estados Unidos es el mercado de electrodos de molibdeno más grande de América del Norte, con una demanda de alrededor de 0,5 mil toneladas en 2023, de las cuales la industria del vidrio representa el 40%, la aeroespacial representa el 30% y otros campos representan el 30%. En la industria del vidrio, los electrodos de molibdeno en los Estados Unidos se utilizan principalmente para producir vidrio óptico y vidrio arquitectónico. Por ejemplo, Corning utiliza electrodos de molibdeno para fabricar lentes ópticas de alta precisión, con un consumo anual de alrededor de 0,2 mil toneladas. La alta conductividad térmica y la resistencia a la corrosión de los electrodos de molibdeno garantizan la estabilidad de la calidad del vidrio.

En el sector aeroespacial, la demanda de electrodos de molibdeno en Estados Unidos está creciendo rápidamente, alcanzando unas 1.500 toneladas en 2023, principalmente para hornos experimentales de alta temperatura y pruebas de componentes de motores. Boeing y Lockheed Martin utilizan electrodos de molibdeno para probar nuevos materiales a alta temperatura, y su estabilidad es inferior al 0,5% en un entorno de vacío a 2000 °C. Según datos de la NASA, el uso de electrodos de molibdeno prolonga la vida útil de los hornos experimentales en un 30% y reduce los costos de prueba.

### 8.2.2 Canadá (Metalurgia e Investigación Científica)

La demanda de electrodos de molibdeno en Canadá se concentra principalmente en los campos de

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

la metalurgia y la investigación científica, con una demanda total de unas 1.500 toneladas en 2023. La industria metalúrgica utiliza electrodos de molibdeno para producir aceros especiales y aleaciones de molibdeno, con un consumo anual de unas 1.000 toneladas, abastecidas principalmente por Thompson Creek Metals. Las acerías canadienses (como ArcelorMittal) y las acerías de aluminio (como Alcoa) confían en los electrodos de molibdeno para mejorar la eficiencia de la fundición.

El campo de la investigación científica es otro gran mercado. Muchas universidades e instituciones de investigación canadienses (como la Universidad de Toronto y el Consejo Nacional de Investigación de Canadá) utilizan electrodos de molibdeno para la investigación de materiales a alta temperatura. En 2023, la demanda de electrodos de molibdeno para investigación científica es de aproximadamente 0,5 mil toneladas, utilizadas principalmente en hornos de vacío y experimentos de plasma. El mercado canadiense de electrodos de molibdeno está limitado por las reservas de recursos y depende de las importaciones de los Estados Unidos.

### 8.3 Europa

#### 8.3.1 Alemania (Fabricación industrial y vidrio óptico)

Alemania es el mayor mercado de electrodos de molibdeno de Europa, con una demanda de unas 0,4 mil toneladas en 2023, de las cuales la fabricación industrial representa el 50%, el vidrio óptico el 30% y otros campos el 20%. En la fabricación industrial, las empresas alemanas de fabricación de automóviles y maquinaria (como Volkswagen y Siemens) utilizan electrodos de molibdeno para producir acero de alta resistencia y aleaciones de molibdeno, con un consumo anual de alrededor de 0,2 mil toneladas.

La producción de vidrio óptico es otra fuente importante de demanda. Zeiss y Schneider en Alemania utilizan electrodos de molibdeno para fabricar lentes ópticas de alta precisión, con un consumo anual de alrededor de 0,12 mil toneladas. La alta conductividad térmica y la estabilidad de los electrodos de molibdeno garantizan la calidad y la eficiencia de producción del vidrio. Según la Asociación Alemana de la Industria, Alemania planea invertir 500 millones de euros en la mejora de las líneas de producción de vidrio óptico en 2024 para impulsar el crecimiento de la demanda de electrodos de molibdeno.

#### 8.3.2 Francia y el Reino Unido (Aplicaciones especiales)

La demanda de electrodos de molibdeno en Francia y el Reino Unido se concentra principalmente en la industria nuclear y la investigación científica, con una demanda total de unas 2.000 toneladas en 2023. Areva, en Francia, y Rolls-Royce, en el Reino Unido, utilizan electrodos de molibdeno para fabricar componentes de reactores nucleares y componentes de motores de aviones, con un consumo anual de unas 1.000 toneladas. La industria nuclear tiene requisitos extremadamente altos para la resistencia a la radiación y la estabilidad a altas temperaturas de los electrodos de molibdeno, y la vida útil de los electrodos de molibdeno puede alcanzar más de 10 años.

El campo de la investigación científica también es un mercado importante. El Centro Nacional de Investigación Científica de Francia (CNRS) y el Imperial College de Londres utilizan electrodos

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

de molibdeno para la investigación de materiales y plasma a alta temperatura, con un consumo anual de unas 1.000 toneladas. El crecimiento del mercado europeo está impulsado por las regulaciones ambientales de la UE, y los electrodos de molibdeno se ven favorecidos por sus características de baja contaminación.

## 8.4 Otras regiones

### 8.4.1 América del Sur (demanda metalúrgica en Chile y Perú)

La demanda de electrodos de molibdeno en Sudamérica se concentra principalmente en la industria metalúrgica de Chile y Perú, con una demanda total de unas 1.000 toneladas en 2023. Codelco y Molymet en Chile utilizan electrodos de molibdeno para producir ferromolibdeno y aleaciones de cobre-molibdeno, con un consumo anual de unas 7.000 toneladas. Southern Copper en Perú también utiliza electrodos de molibdeno para mejorar la eficiencia de la fundición, con un consumo anual de alrededor de 3,000 toneladas.

El mercado sudamericano tiene un gran potencial de crecimiento, pero la tasa de utilización de los electrodos de molibdeno es baja debido a las limitaciones de infraestructura y financiación. China Tungsten Online (news.chinatungsten.com) predice que la demanda en el mercado sudamericano crecerá a 3.000 toneladas para 2030.

### 8.4.2 Oriente Medio y África (potencial de mercados emergentes)

El mercado de electrodos de molibdeno en Oriente Medio y África aún está en pañales, con una demanda total de unas 5.000 toneladas en 2023, utilizadas principalmente en las industrias del vidrio y metalúrgica. La industria del vidrio en Arabia Saudita utiliza electrodos de molibdeno para producir vidrio arquitectónico, con un consumo anual de alrededor de 2.000 toneladas. La industria metalúrgica de Sudáfrica utiliza electrodos de molibdeno para producir aceros especiales, con un consumo anual de unas 3.000 toneladas.

Con el avance de la iniciativa "Belt and Road" y el proceso de industrialización de África, se espera que la demanda de electrodos de molibdeno en Oriente Medio y África crezca rápidamente. China Tungsten Online (news.chinatungsten.com) predice que los mercados de Oriente Medio y África alcanzarán las 2.000 toneladas en 2030.

## 8.5 Características de la demanda del mercado global de aplicaciones

### 8.5.1 Distribución industrial

En la demanda mundial de electrodos de molibdeno, la industria del vidrio representa el 60% (alrededor de 12.000 toneladas), la industria metalúrgica representa el 20% (alrededor de 4.000 toneladas), la industria electrónica representa el 10% (alrededor de 2.000 toneladas) y otros campos (como la industria aeroespacial, la industria nuclear y la investigación científica) representan el 10% (alrededor de 2.000 toneladas). La industria del vidrio es el mercado más grande, impulsado por la popularización de la tecnología de fusión totalmente eléctrica y la promoción de políticas de protección del medio ambiente.

### 8.5.2 Diferencias regionales

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

La región de Asia-Pacífico es el mercado más grande, con una cuota de demanda del 70% (unas 14.000 toneladas) en 2023, impulsada principalmente por China, Japón y Corea del Sur. América del Norte y Europa representan cada una el 15% (alrededor de 3.000 toneladas), y otras regiones representan el 5% (alrededor de 1.000 toneladas). Las diferencias regionales están determinadas principalmente por la estructura industrial y la distribución de los recursos. La región de Asia-Pacífico tiene un alto grado de industrialización, mientras que América del Norte y Europa se centran en aplicaciones de alta gama.



Imagen del electrodo de molibdeno de CTIA GROUP LTD

## Apéndice

### A. Glosario

Electrodo de molibdeno: Material del electrodo con molibdeno como componente principal, utilizado en entornos corrosivos y de alta temperatura.

Pulvimetalurgia: Proceso de preparación de productos de molibdeno por prensado y sinterización.

Objetivo de pulverización catódica: material utilizado para la deposición física de vapor, el electrodo de molibdeno se utiliza como objetivo en la industria de semiconductores.

Horno de fundición de vidrio totalmente eléctrico: Equipo de fundición de vidrio que utiliza electrodo de molibdeno para calentamiento eléctrico directo.

### B. Referencias

- [1] "Propiedades físicas y químicas de los materiales de molibdeno", Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2017
- [2] "Introducción a los productos de electrodos de molibdeno", China Tungsten Online, www.chinatungsten.com
- [3] "Aplicación del electrodo de molibdeno en la industria del vidrio", Journal of Glass Technology, 2019
- [4] "Aplicación del molibdeno en la industria metalúrgica", Revista de materiales metalúrgicos, 2020
- [5] "Aplicación del molibdeno en la industria electrónica", Revista de Ingeniería Electrónica, 2018
- [6] "Electrodo de molibdeno en la investigación de materiales de alta temperatura", Progreso en Ciencia de los

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL

Materiales, 2022

[7] "Aplicación del molibdeno en la industria nuclear", Journal of Nuclear Technology, 2021

[8] "Aplicación del molibdeno en dispositivos médicos", Revista de Ingeniería Médica, 2023

[9] "Informe del mercado global de molibdeno", Asociación Internacional del Molibdeno, 2023

[10] "Tendencia del precio del molibdeno", Chinatungsten Online, news.chinatungsten.com

### C. Normas y especificaciones técnicas relacionadas con los electrodos de molibdeno

ASTM B387: Estándar de barra de molibdeno y aleación de molibdeno, que especifica los requisitos de tamaño, pureza y rendimiento de los electrodos de molibdeno.

GB/T 3462: Estándar de barra de molibdeno de China, aplicable a la producción y prueba de electrodos de molibdeno industriales.

ISO 4487: Norma internacional de calidad de productos de molibdeno, que hace hincapié en la alta pureza y densidad.

#### DECLARACIÓN DE DERECHOS DE AUTOR Y RESPONSABILIDAD LEGAL