

## Qué son las bolas de aleación de tungsteno

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

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

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de 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 centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

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



### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



## Tabla de contenido

### Capítulo 1 Descripción general de las bolas de aleación de tungsteno

- 1.1 Definición de bolas de aleación de tungsteno
- 1.2 Sistema de composición de bolas de aleación de tungsteno
  - 1.2.1 Matriz del núcleo de esferas de aleación de tungsteno: Propiedades y requisitos del tungsteno
  - 1.2.2 Aglutinante de bolas de aleación de tungsteno: Funciones del níquel, el hierro y el cobre
  - 1.2.3 Funciones de los aditivos traza en las bolas de aleación de tungsteno
- 1.3 Parámetros de rendimiento de bolas de aleación de tungsteno con diferentes composiciones
- 1.4 Especificaciones y dimensiones comunes de las bolas de aleación de tungsteno
- 1.5 Aplicaciones básicas de las bolas de aleación de tungsteno
- 1.6 Contexto de desarrollo de las bolas de aleación de tungsteno
  - 1.6.1 Etapa inicial de investigación y desarrollo (mediados del siglo XX - década de 1980)
  - 1.6.2 Etapa de desarrollo de la industrialización (década de 1990 - principios del siglo XXI)
  - 1.6.3 Etapa de actualización de alto rendimiento (Desde el siglo XXI)

### Capítulo 2 Propiedades básicas de las bolas de aleación de tungsteno

- 2.1 Características de densidad de esferas de aleación de tungsteno
  - 2.1.1 Rango del parámetro de densidad de las esferas de aleación de tungsteno
  - 2.1.2 Comparación de la densidad de las bolas de aleación de tungsteno con el plomo, el acero y otros materiales
- 2.2 Características de resistencia de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.3 Características de dureza de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.4 Resistencia al desgaste de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.5 Conductividad térmica de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.6 Conductividad eléctrica de esferas de aleación de tungsteno
- 2.7 Estabilidad térmica de las esferas de aleación de tungsteno
- 2.8 Ventajas y aplicaciones no magnéticas de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.9 Rendimiento de blindaje contra la radiación neutrónica de esferas de aleación de tungsteno
- 2.10 Rendimiento del blindaje contra la radiación gamma de esferas de aleación de tungsteno
- 2.11 Factores que afectan el rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno
  - 2.11.1 Efecto de la proporción de componentes en el rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno
  - 2.11.2 Influencia del proceso de preparación en las propiedades de las bolas de aleación de tungsteno
  - 2.11.3 Influencia del procesamiento posterior en las propiedades de las bolas de aleación de tungsteno
- 2.12 Ficha de datos de seguridad (FDS) de bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

### Capítulo 3 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno

- 3.1 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno según su composición
  - 3.1.1 Esferas de aleación W-Ni-Fe
  - 3.1.2 Esferas de aleación W-Ni-Cu
  - 3.1.3 Esferas de aleación W-Cu
  - 3.1.4 Bolas de aleación W-Ag

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 3.1.5 Bolas de aleación de tungsteno con otras composiciones
- 3.2 Clasificación de bolas de aleación de tungsteno según su precisión
  - 3.2.1 Bolas de aleación de tungsteno de grado de precisión
  - 3.2.2 Bolas de aleación de tungsteno de grado ordinario
- 3.3 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno según su aplicación
  - 3.3.1 Bolas de aleación de tungsteno de grado contrapeso
  - 3.3.2 Esferas de aleación de tungsteno de grado blindaje
  - 3.3.3 Bolas de aleación de tungsteno para rodamientos
  - 3.3.4 Bolas de salud de aleación de tungsteno
  - 3.3.5 Bolas de aleación de tungsteno para colimadores médicos
  - 3.3.6 Bolas de aleación de tungsteno para componentes inerciales aeroespaciales
  - 3.3.7 Bolas de aleación de tungsteno de uso civil (como plomos de pesca)

## **Capítulo 4 Proceso de preparación de bolas de aleación de tungsteno**

- 4.1 Pretratamiento de la materia prima de las bolas de aleación de tungsteno
  - 4.1.1 Purificación del polvo de tungsteno para esferas de aleación de tungsteno
  - 4.1.2 Proporción elemental y mezcla de esferas de aleación de tungsteno
- 4.2 Proceso de formación de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.2.1 Prensado en frío y prensado isostático de esferas de aleación de tungsteno
  - 4.2.2 Comparación de ventajas y desventajas de los procesos de conformado de bolas de aleación de tungsteno
- 4.3 Proceso de sinterización de esferas de aleación de tungsteno
  - 4.3.1 Control de temperatura y tiempo de mantenimiento de las bolas de aleación de tungsteno
  - 4.3.2 Ventajas de la sinterización al vacío de bolas de aleación de tungsteno
- 4.4 Procesamiento posterior de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.4.1 Rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.4.2 Tratamiento anticorrosivo superficial de esferas de aleación de tungsteno
- 4.5 Puntos clave de control de calidad para bolas de aleación de tungsteno
  - 4.5.1 Control de la pureza de la materia prima para bolas de aleación de tungsteno
  - 4.5.2 Control de la uniformidad de la densidad de formación de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.5.3 Ensayo de estabilidad del rendimiento post-sinterización de esferas de aleación de tungsteno
- 4.6 Inspección de calidad de las bolas de aleación de tungsteno
  - 4.6.1 Ensayo de densidad de esferas de aleación de tungsteno
  - 4.6.2 Inspección de la precisión dimensional de las bolas de aleación de tungsteno
  - 4.6.3 Ensayo de resistencia de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.6.4 Ensayo de dureza de bolas de aleación de tungsteno
  - 4.6.5 Pruebas de rendimiento de blindaje de esferas de aleación de tungsteno
- 4.7 Sistema estándar para bolas de aleación de tungsteno
  - 4.7.1 Norma Nacional China (GB/T) para Bolas de Aleación de Tungsteno
  - 4.7.2 Normas industriales internacionales para bolas de aleación de tungsteno
  - 4.7.3 Normas relacionadas con las aleaciones de tungsteno en Europa, América, Japón y Corea del Sur
  - 4.7.4 Normas específicas del sector para bolas de aleación de tungsteno

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

## Capítulo 5 Áreas de aplicación de las bolas de aleación de tungsteno

- 5.1 Aplicación de bolas de aleación de tungsteno en contrapesos generales
  - 5.1.1 Contrapesos de bolas de aleación de tungsteno para maquinaria de ingeniería
  - 5.1.2 Contrapesos de bolas de aleación de tungsteno para equipamiento deportivo
  - 5.1.3 Bolas de aleación de tungsteno de uso civil (plomos de pesca, contrapesos para maquetas)
  - 5.1.4 Bolas de aleación de tungsteno para válvulas de perforación petrolífera y contrapesos de tuberías
- 5.2 Aplicaciones de las bolas de aleación de tungsteno en los campos de la maquinaria industrial y de precisión
  - 5.2.1 Bolas de aleación de tungsteno para componentes mecánicos inerciales de precisión
  - 5.2.2 Bolas de aleación de tungsteno para rodamientos de alta precisión
  - 5.2.3 Bolas resistentes al desgaste para cribas vibratorias y equipos de separación
  - 5.2.4 Granallado de aleación de tungsteno para pulverización y tratamiento superficial
  - 5.2.5 Bolas de aleación de tungsteno para calibración de instrumentos de medición y balanzas
- 5.3 Aplicaciones de las bolas de aleación de tungsteno en campos militares y especiales de alta gama
  - 5.3.1 Bolas de aleación de tungsteno para colimadores en radioterapia médica
  - 5.3.2 Esferas de aleación de tungsteno para blindaje contra la radiación y absorción de neutrones en la industria nuclear
  - 5.3.3 Bolas de aleación de tungsteno para aplicaciones aeroespaciales de navegación inercial y volantes de inercia
  - 5.3.4 Esferas de aleación de tungsteno para penetradores de energía cinética y núcleos de proyectiles de carga hueca
  - 5.3.5 Bolas de aleación de tungsteno para volantes y giroscopios de control de actitud de satélites
- 5.4 Aplicaciones de las bolas de aleación de tungsteno en campos emergentes y de vanguardia
  - 5.4.1 Equilibrado de esferas de aleación de tungsteno para armas láser y sistemas de energía dirigida
  - 5.4.2 Bolas de aleación de tungsteno para equilibrado y contrapeso de vehículos hipersónicos
  - 5.4.3 Bolas de aleación de tungsteno para vehículos de exploración submarina y submarinos
  - 5.4.4 Bolas de aleación de tungsteno para soldadura ultrasónica de pestañas de baterías de nueva energía
  - 5.4.5 Bolas de aleación de tungsteno para osciladores de filtro de estaciones base de comunicación 5G
  - 5.4.6 Bolas de aleación de tungsteno para rotores de relojes de alta gama y mecanismos de cuerda automática

## Capítulo 6. Problemas comunes de calidad y soluciones para bolas de aleación de tungsteno

- 6.1 Causas y métodos de eliminación de grietas superficiales en esferas de aleación de tungsteno
- 6.2 Ajuste y prevención de desviaciones dimensionales fuera de tolerancia de las bolas de aleación de tungsteno
- 6.3 Tratamiento de la inhomogeneidad de la densidad y los problemas de segregación en esferas de aleación de tungsteno
- 6.4 Mejora de los defectos de porosidad y holgura en la superficie de esferas de aleación de tungsteno
- 6.5 Tecnología de corrección de esfericidad y redondez de aleación de tungsteno
- 6.6 Métodos para ajustar la dureza excesivamente baja o alta de las bolas de aleación de tungsteno
- 6.7 Investigación y mejora de defectos de inclusión interna en esferas de aleación de tungsteno

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

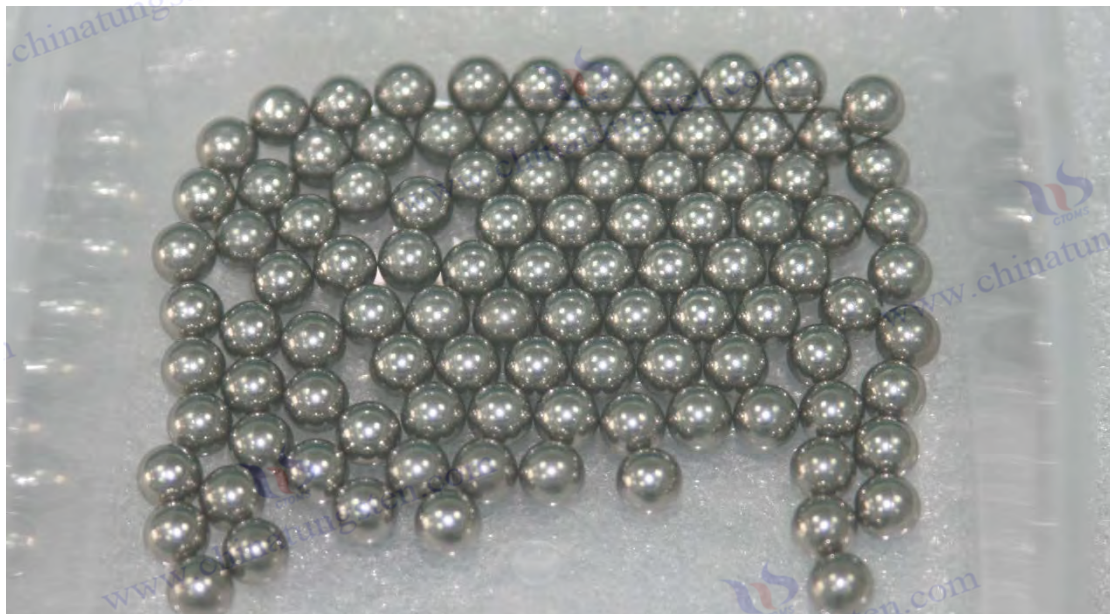
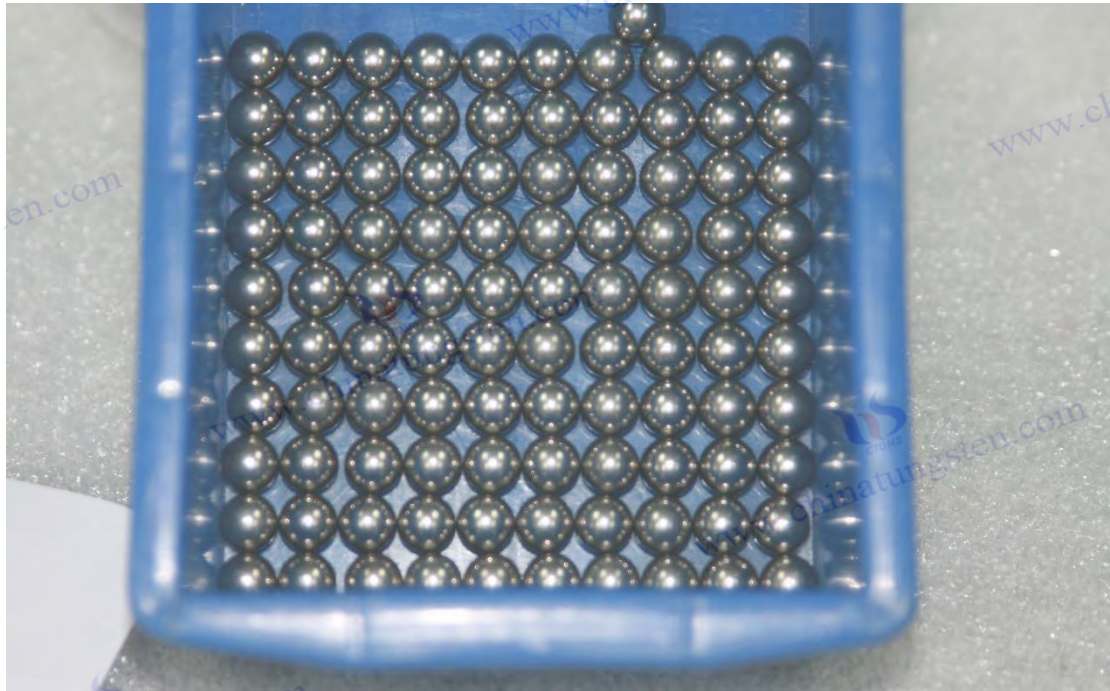


## 6.8 Tratamiento del astillamiento y desprendimiento durante la etapa de rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno

### Apéndice

Terminología de bolas de aleación de tungsteno

Referencias



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Capítulo 1 Descripción general de las bolas de aleación de tungsteno

### 1.1 Definición de bolas de aleación de tungsteno

Las esferas de aleación de tungsteno son componentes funcionales esféricos de alta densidad, fabricados principalmente de tungsteno, combinado con fases aglutinantes como níquel, hierro y cobre mediante pulvimetalurgia. Representan una importante mejora geométrica con respecto a los materiales compuestos típicos de tungsteno de alta densidad. A diferencia de las esferas tradicionales de acero, cerámica o plomo, las esferas de aleación de tungsteno integran la altísima densidad, dureza y resistencia del tungsteno con la notable mejora en tenacidad, maquinabilidad y adaptabilidad ambiental que resulta de la aleación. Esto les confiere una ventaja integral e insustituible en aplicaciones que requieren gran masa, un blindaje robusto o un funcionamiento fiable en condiciones extremas dentro de un volumen reducido.

Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, las esferas de aleación de tungsteno son esencialmente esferas cuasi-isotrópicas formadas por partículas de tungsteno encapsuladas y firmemente unidas por una fase aglutinante continua o semicontinua. Su microestructura presenta una característica bifásica típica de "partículas de tungsteno duras + fase aglutinante resistente". Esta estructura conserva las propiedades fisicoquímicas inherentes del tungsteno como metal refractario, a la vez que supera los defectos críticos del tungsteno puro, como su elevada fragilidad y su casi incapacidad para ser conformado plásticamente, gracias al efecto puente de la fase aglutinante. Esto permite la producción estable de una gama completa de esferas con tamaños que varían desde micrómetros hasta decenas de milímetros y con una precisión que abarca desde niveles ordinarios hasta ultraprecisión en condiciones industriales.

Desde la perspectiva de las aplicaciones de ingeniería, las bolas de aleación de tungsteno han trascendido sus funciones tradicionales como bolas de contrapeso o bolas de rodamiento, convirtiéndose en componentes estructurales y funcionales clave que combinan contrapeso de alta densidad, blindaje contra la radiación, almacenamiento de energía inercial, resistencia al desgaste y a la corrosión, y medición de precisión. Por ello, se consideran un material esencial en la industria aeroespacial moderna, la imagenología en medicina nuclear, las municiones especiales de doble uso, los instrumentos de precisión y los equipos energéticos emergentes, y su importancia sigue en aumento a medida que los equipos evolucionan hacia un menor peso, un rendimiento extremo y una mayor precisión.

### 1.2 Sistema de composición de bolas de aleación de tungsteno

de tungsteno se dividen en tres capas: una matriz central, una fase aglutinante y trazas de aditivos funcionales. Las proporciones y tipos de estos tres componentes determinan directamente la densidad, las propiedades mecánicas, las características magnéticas, la capacidad de apantallamiento y la adaptabilidad ambiental de la esfera final. Una composición bien diseñada permite un control preciso del rendimiento y una óptima adaptación funcional, a la vez que garantiza un alto contenido de tungsteno, lo que posibilita la creación de series de esferas de aleación de tungsteno altamente especializadas para

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diversas aplicaciones.

### 1.2.1 Matriz del núcleo de esferas de aleación de tungsteno: Propiedades y requisitos del tungsteno

El tungsteno, componente principal de las esferas de aleación de tungsteno, suele representar más del 90 % de la masa total. Su función no solo consiste en proporcionar la base para una alta densidad y dureza, sino también en determinar la atenuación de la radiación, la estabilidad a altas temperaturas, la resistencia al desgaste y la estabilidad dimensional a largo plazo a nivel microscópico. El tungsteno posee un número atómico extremadamente alto y una estructura cristalina muy densa, lo que le confiere una gran capacidad natural de absorción y dispersión de rayos gamma, rayos X y neutrones; una ventaja inherente difícil de igualar para cualquier otro metal de uso común.

En cuanto a sus propiedades mecánicas, el tungsteno posee una dureza extremadamente alta y una resistencia a la compresión excepcional, pero presenta una fragilidad significativa a temperatura ambiente y prácticamente carece de capacidad de deformación plástica. Mediante la selección de polvo de tungsteno de alta pureza y la purificación de los límites de grano durante el posterior proceso de sinterización a alta temperatura, las partículas de tungsteno pueden adoptar una morfología poliédrica casi ideal, lográndose así la dispersión de tensiones bajo la encapsulación de la fase aglutinante. De este modo, la fragilidad macroscópica se transforma en un comportamiento cuasi-dúctil microscópicamente controlable. Se exigen requisitos extremadamente altos en cuanto a la pureza, la distribución del tamaño de partícula, la morfología y el contenido de oxígeno de las materias primas de polvo de tungsteno. Las esferas de aleación de tungsteno de grado industrial suelen requerir una pureza del polvo de tungsteno superior al 99,95 % y una distribución del tamaño de partícula concentrada dentro de un rango específico para garantizar una unión suficiente entre las partículas de tungsteno y la ausencia de porosidad significativa tras la sinterización. Un polvo de tungsteno excesivamente grueso provoca una sinterización incompleta, mientras que un polvo excesivamente fino introduce fácilmente un exceso de oxígeno y aumenta la irregularidad de la contracción por sinterización. El control del contenido de oxígeno es especialmente crítico; un contenido de oxígeno excesivamente alto puede formar inclusiones frágiles de óxido de tungsteno, que se convierten en focos de concentración de tensiones e inducen el agrietamiento de las esferas. Además, el tungsteno presenta excelentes capacidades de autolimpieza en atmósferas de hidrógeno a alta temperatura o en entornos de vacío, eliminando eficazmente las impurezas de oxígeno y carbono adsorbidas en su superficie. Este es un requisito fundamental para que las esferas de aleación de tungsteno funcionen en entornos con exigencias de limpieza extremadamente altas (como los colimadores médicos). En resumen, el tungsteno, como matriz central, no solo es el componente principal en términos de cantidad, sino también el factor decisivo en cuanto a calidad; su calidad determina directamente si las esferas de aleación de tungsteno pueden alcanzar el límite superior de su rendimiento teórico.

### 1.2.2 Aglutinante de bolas de aleación de tungsteno: las funciones del níquel, el hierro y el cobre

El aglutinante es el segundo componente más crítico en los sistemas de esferas de aleación de tungsteno, después del propio tungsteno. Su función principal es unir firmemente las partículas de tungsteno de alta

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



fracción volumétrica para formar un todo cohesivo, a la vez que le confiere tenacidad a temperatura ambiente, maquinabilidad y capacidad de sinterización de las que carece por completo el tungsteno puro. El níquel, el hierro y el cobre son los tres aglutinantes más consolidados, cada uno con funciones distintas en cuanto a humectabilidad, propiedades mecánicas, modulación magnética y expansión funcional, dando lugar así a los tres sistemas de esferas de aleación de tungsteno más utilizados.

El níquel, componente principal de todos los aglutinantes, presenta una excelente capacidad de humectación para las partículas de tungsteno. Forma una capa delgada y uniforme sobre la superficie de dichas partículas durante la sinterización en fase líquida, promoviendo eficazmente su reordenamiento y densificación. Asimismo, el níquel posee buena ductilidad y resistencia a la corrosión, lo que reduce significativamente la temperatura de transición dúctil-frágil de la aleación. Esto permite que las esferas de aleación de tungsteno experimenten cierto grado de deformación plástica a temperatura ambiente sin agrietarse catastróficamente. Además, el níquel y el tungsteno rara vez forman compuestos intermetálicos frágiles, lo que garantiza la fiabilidad y la estabilidad a largo plazo de la unión interfacial.

La adición de hierro forma principalmente una solución sólida con el níquel, reforzando aún más la fase aglutinante y permitiendo un control preciso del magnetismo mediante el ajuste de la proporción níquel-hierro. Cuando se requieren propiedades micromagnéticas o magnéticas débiles, un aumento adecuado del contenido de hierro puede satisfacer los requisitos específicos de la navegación inercial o los sensores; mientras que en la mayoría de las aplicaciones de contrapesos de alta densidad, la combinación níquel-hierro logra el equilibrio óptimo entre alta resistencia y alta tenacidad de la manera más económica. El hierro también promueve el proceso de disolución-reprecipitación de las partículas de tungsteno durante la sinterización, lo que da como resultado granos de tungsteno más redondeados y reduce las fuentes de concentración de tensiones.

El cobre se utiliza principalmente como aglutinante en sistemas de esferas de aleación de tungsteno no magnéticas. Si bien el cobre y el tungsteno son mutuamente insolubles, el cobre puede mojar completamente las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida y formar una red de cobre continua e independiente al enfriarse. Debido a que el cobre es completamente no magnético y posee una excelente conductividad térmica y eléctrica, las esferas de aleación de tungsteno con níquel-cobre o cobre puro como fase aglutinante son los materiales preferidos para la obtención de imágenes en medicina nuclear, la ponderación ambiental en resonancia magnética y los dispositivos inerciales no magnéticos de precisión. La presencia de la fase de cobre también mejora significativamente la resistencia de la aleación a la corrosión atmosférica y electroquímica, lo que permite que las esferas mantengan una superficie lisa y un rendimiento estable durante largos períodos en ambientes húmedos o salinos.

La combinación científica y el diseño proporcional de los tres aglutinantes determinan directamente si las esferas de aleación de tungsteno pueden, en última instancia, poseer la tenacidad, maquinabilidad y especificidad funcional suficientes, manteniendo una alta densidad. En la producción, la cantidad total de fase aglutinante se controla generalmente dentro de un rango bajo para maximizar la retención de la ventaja de alta densidad del tungsteno. Simultáneamente, las proporciones elementales precisas permiten

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



una regulación del rendimiento específica, desde materiales completamente no magnéticos hasta micromagnéticos controlables, y desde el lastre de uso general hasta el blindaje especializado. Es precisamente esta aplicación flexible de aglutinantes la que proporciona un puente sólido para que las esferas de aleación de tungsteno transiten de materiales de laboratorio a aplicaciones de ingeniería a gran escala.

### 1.2.3 Funciones de los aditivos traza en las bolas de aleación de tungsteno

Aunque los aditivos traza están presentes en cantidades ínfimas en las esferas de aleación de tungsteno, desempeñan un papel regulador insustituible en aspectos clave como la purificación de los límites de grano, el fortalecimiento de la interfase de fases, la absorción de radiación específica y la inhibición de reacciones perjudiciales. Su incorporación suele determinar si una esfera de aleación de tungsteno puede pasar de ser un «producto homologado» a un «producto especial de alta gama».

En primer lugar, se utilizan ciertos elementos de tierras raras o metales de transición como activadores de los límites de grano y captadores de oxígeno. Durante la sinterización, reaccionan preferentemente con el oxígeno residual para formar compuestos estables, lo que reduce significativamente las inclusiones de óxido en la interfaz tungsteno-aglomerante, mejora la resistencia de la unión interfacial y reduce los puntos de inicio de microfisuras. Esto resulta fundamental para la fabricación de esferas inerciales y esferas de cojinete de ultra alta precisión y ultra larga vida útil.

En segundo lugar, para abordar las necesidades específicas de la industria nuclear y el blindaje contra la radiación, se pueden añadir selectivamente elementos con alta capacidad de absorción de neutrones, como el boro, el gadolinio, el samario y el disprosio. Estos elementos se encuentran en la fase aglutinante o en la superficie de las partículas de tungsteno en forma de compuesto o solución sólida, lo que permite que las esferas de aleación de tungsteno mantengan una alta densidad de blindaje gamma, a la vez que adquieren una excelente capacidad de absorción de neutrones térmicos y rápidos, logrando así una función integrada de blindaje combinado gamma-neutrón.

Además, la adición de pequeñas cantidades de elementos refractarios como cobalto, molibdeno y renio puede aumentar significativamente la temperatura de recristalización y la resistencia a altas temperaturas, lo que permite que las esferas de aleación de tungsteno mantengan una estabilidad dimensional a largo plazo y eviten la degradación de sus propiedades mecánicas durante su uso en volantes de motores aeronáuticos o en entornos de radiación a altas temperaturas. El cobalto puede mejorar aún más la resistencia de la fase aglutinante, mientras que la adición de renio mejora notablemente la resistencia a la fluencia a altas temperaturas.

Además, se utilizan ciertos oligoelementos para inhibir la volatilización y migración de la fase aglutinante bajo irradiación prolongada o alta temperatura, evitando así que las esferas sufran una disminución de la densidad o una superficie porosa. Algunos fabricantes también añaden trazas de metales preciosos o elementos de tierras raras para lograr funciones autolimpiantes o antibacterianas en la superficie, con el fin de cumplir con los requisitos especiales de los contrapesos implantables médicos

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o los entornos de salas blancas.

El uso científico de aditivos traza demuestra el ingenio del diseño del material de las bolas de aleación de tungsteno: al introducir una cantidad muy pequeña de un tercer componente, se logra un salto cualitativo en el rendimiento, lo que permite que el mismo sistema de material de matriz genere una serie de productos de alta gama que cubren múltiples áreas de alta gama, como contrapesos generales, dispositivos médicos no magnéticos, blindaje nuclear y soporte de carga a altas temperaturas, ampliando enormemente sus límites de aplicación en ingeniería.

### 1.3 Parámetros de rendimiento de bolas de aleación de tungsteno con diferentes composiciones

Las esferas de aleación de tungsteno con diferentes composiciones presentan diferencias significativas en densidad, propiedades mecánicas, características magnéticas, capacidad de blindaje contra la radiación, estabilidad térmica y adaptabilidad ambiental. Estas diferencias se deben al efecto sinérgico del tipo y la proporción de la fase aglutinante y los aditivos traza, que a su vez determinan su posicionamiento y aplicaciones de ingeniería más adecuados.

El sistema W-Ni-Fe, con su alto contenido de tungsteno y fase aglutinante reforzada con níquel-hierro, logra un equilibrio óptimo entre densidad, resistencia y tenacidad, convirtiéndolo en la opción predominante para dispositivos inerciales aeroespaciales, proyectiles penetrantes de energía cinética y la mayoría de las esferas de contrapeso de alta densidad de uso general. Sus propiedades micromagnéticas son aceptables en la mayoría de las aplicaciones militares y civiles, mientras que su costo se mantiene relativamente controlable.

El sistema W-Ni-Cu logra un no magnetismo total al sustituir completamente el hierro por cobre, manteniendo una densidad extremadamente alta y una buena resistencia a la corrosión. Esto lo convierte en un material fundamental para esferas colimadoras en medicina nuclear, esferas de contrapeso en entornos de resonancia magnética y giroscopios no magnéticos de precisión. La excelente conductividad térmica de la fase de cobre también le confiere un rendimiento excepcional en ciertas condiciones operativas especiales que requieren una rápida disipación del calor.

El sistema W-Cu reduce aún más el punto de fusión de la fase aglutinante y mejora la eficiencia de la sinterización en fase líquida. Asimismo, confiere a las esferas una excelente conductividad eléctrica y térmica, así como resistencia a la erosión por arco eléctrico. Se utiliza frecuentemente en materiales de contacto eléctrico o electrodos esféricos especiales que requieren un equilibrio entre propiedades eléctricas, térmicas y de densidad.

Las esferas modificadas de W-Ni-Fe o W-Ni-Cu dopadas con absorbentes de neutrones, además de conservar su alta densidad de blindaje gamma, adquieren una potente capacidad adicional de atrapamiento de neutrones. Se utilizan ampliamente en mecanismos de accionamiento de barras de control de reactores nucleares, contenedores de fuentes radiactivas y componentes de blindaje de haces de neutrones, logrando una protección integral contra múltiples tipos de radiación con un solo material.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que contiene renio, El molibdeno u otros elementos refractarios han mejorado significativamente su resistencia a altas temperaturas, su resistencia a la fluencia y su resistencia a la oxidación, lo que les permite funcionar de manera confiable durante períodos prolongados en entornos térmicos extremos, como volantes de inercia de motores aeronáuticos, contrapesos de vehículos hipersónicos o la primera pared de dispositivos de fusión nuclear.

Las diferencias de rendimiento entre los diversos sistemas de composición ofrecen a los ingenieros una amplia gama de opciones: desde contrapesos económicos de uso general hasta grados médicos no magnéticos, pasando por blindaje nuclear y grados para temperaturas ultra altas. Las esferas de aleación de tungsteno conforman una jerarquía de rendimiento completa, capaz de satisfacer con precisión todas las necesidades, desde el uso civil hasta los equipos de defensa y energía más avanzados. Esta estrecha correspondencia entre composición, rendimiento y aplicación es una clara manifestación de la madurez y el alto grado de ingeniería de los sistemas de materiales de esferas de aleación de tungsteno.

#### 1.4 Especificaciones y dimensiones comunes de las bolas de aleación de tungsteno

Las esferas de aleación de tungsteno se presentan en una amplia gama de tamaños, desde microesferas submilimétricas hasta esferas de decenas de milímetros de diámetro, todas ellas susceptibles de una producción en masa estable. La selección del diámetro, el nivel de precisión superficial y el diseño de la zona de tolerancia determinan directamente la aplicación final y el método de ensamblaje. En el sector se ha establecido un sistema dimensional consolidado y altamente estandarizado para satisfacer todas las necesidades, desde contrapesos civiles hasta aplicaciones militares de vanguardia.

Las esferas miniatura de aleación de tungsteno se concentran principalmente en el rango de milímetros a pocos milímetros. Estas esferas se utilizan sobre todo en los orificios de enfoque de colimadores de medicina nuclear, cojinetes de precisión, contrapesos implantables médicos y granallado de alta precisión. Gracias a los avanzados procesos de prensado isostático y rectificado en varias etapas, la esfericidad, la redondez y la rugosidad superficial de estas esferas alcanzan niveles extremadamente altos, cumpliendo a la perfección los estrictos requisitos de canales a nivel micrométrico o pares de laminación de ultraprecisión.

Las esferas de diámetro pequeño a mediano, que van desde unos pocos milímetros hasta aproximadamente veinte milímetros, representan el rango de tamaño más amplio y utilizado. Este rango de tamaño satisface simultáneamente las diversas necesidades de rotores de giroscopios de navegación inercial, contrapesos de volantes de satélite, bolas de blindaje para tomografía computarizada industrial, plomos de pesca, contrapesos para equipos deportivos y bolas resistentes al desgaste para cribas vibratorias. Los fabricantes suelen ofrecer un stock estándar con diámetros fijos, a la vez que aceptan personalizaciones no estándar en lotes pequeños para lograr un equilibrio entre versatilidad y personalización.

Las esferas de aleación de tungsteno de gran diámetro suelen ser aquellas que superan los 20 milímetros de diámetro, alcanzando el límite máximo de mecanizado. Se utilizan principalmente en aplicaciones que

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

requieren masas de varios cientos de gramos o incluso varios kilogramos por esfera, como contrapesos para maquinaria pesada, esferas de gran peso para válvulas de aceite, lastre para barcos y núcleos especiales de energía cinética. Estas esferas se producen a menudo mediante rectificado segmentado o equipos de rectificado especializados de gran escala para garantizar una alta esfericidad y uniformidad de densidad, a la vez que se incrementa significativamente su volumen.

Además del diámetro, las bolas de aleación de tungsteno se presentan en distintos grados de precisión: el grado estándar es adecuado para contrapesos generales y aplicaciones civiles; el grado de precisión media a alta satisface las necesidades de las cribas vibratorias industriales y la calibración metrológica; y el grado de ultraprecisión está diseñado específicamente para dispositivos inerciales aeroespaciales, colimadores de medicina nuclear y rodamientos de alta precisión. Los distintos grados de precisión presentan diferencias significativas en la tolerancia del diámetro, la esfericidad, la rugosidad superficial y la homogeneidad entre lotes, lo que se traduce directamente en diferentes rangos de precios y plazos de entrega.

Cabe destacar que el sistema de especificaciones de las esferas de aleación de tungsteno es altamente modular y serializado. Con la misma composición y nivel de precisión, se puede ofrecer una gama completa de tamaños, desde los más pequeños hasta los más grandes, lo que facilita enormemente la selección de diseños y la adquisición a granel. Asimismo, las empresas líderes ofrecen servicios de procesamiento secundario, como recubrimiento superficial, ranurado, taladrado e incrustación, que permiten transformar una sola esfera en un componente funcional complejo, combinando así a la perfección la producción estandarizada con las necesidades personalizadas.

### 1.5 bolas de aleación de tungsteno

de tungsteno se han integrado en numerosos sectores clave del sistema industrial moderno. Su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas, no toxicidad y respeto al medio ambiente, así como su capacidad de mecanizado de precisión, las convierten en el material idóneo para aplicaciones donde se requiere un volumen reducido para lograr una gran masa o para garantizar un funcionamiento fiable en entornos extremos.

En los sectores aeroespacial y de defensa, las esferas de aleación de tungsteno se encuentran entre los componentes de masa inercial más importantes. Los rotores de giroscopios de alta velocidad, los volantes de inercia de satélites, los acelerómetros de navegación inercial de misiles y los actuadores de control de actitud utilizan ampliamente esferas de aleación de tungsteno de alta precisión como componentes centrales de almacenamiento de energía y ajuste. Su densidad volumétrica extremadamente alta proporciona suficiente inercia rotacional y fuerza centrífuga en un espacio limitado, lo que garantiza una respuesta rápida y la estabilidad a largo plazo del sistema en entornos espaciales complejos.

Los campos de la tecnología médica y nuclear son ejemplos paradigmáticos de las aplicaciones de alta gama de las esferas de aleación de tungsteno. Los colimadores de enfoque y de apertura paralela en equipos de imagenología de medicina nuclear utilizan ampliamente esferas de aleación de tungsteno no

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

magnéticas y de alta precisión para confinar la trayectoria de los rayos gamma y suprimir la interferencia por dispersión; los equipos de radioterapia aprovechan sus capacidades superiores de atenuación de la radiación para lograr una irradiación precisa de las lesiones; los componentes de blindaje de las instalaciones nucleares y los contenedores de fuentes de radiación también se basan en esferas de aleación de tungsteno para construir estructuras de blindaje multicapa de alta eficiencia, reemplazando por completo los materiales de plomo tradicionales y eliminando totalmente los riesgos de toxicidad y contaminación ambiental.

Los contrapesos industriales y las aplicaciones civiles constituyen el mercado principal más amplio para las bolas de aleación de tungsteno. Entre sus aplicaciones se incluyen maquinaria de construcción, válvulas de perforación petrolífera, lastre para barcos, contrapesos para coches de carreras y ascensores, plomos de pesca, cabezas de palos de golf y rotores de cuerda automática en relojes de alta gama. Las bolas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente porque pueden proporcionar un peso mucho mayor que el acero y el plomo en un volumen muy reducido, logrando así la miniaturización del producto y la mejora del rendimiento, a la vez que cumplen con las normativas medioambientales vigentes.

En el campo de la maquinaria e instrumentación de precisión, la alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad dimensional de las bolas de aleación de tungsteno se aprovechan plenamente como bolas de rodamientos de alta gama, bolas para medios de cribado vibratorio, pesas patrón metrológicas y bloques de masa amortiguadores de vibraciones para plataformas ópticas, lo que prolonga significativamente la vida útil de los equipos y mejora la precisión de las mediciones. Además, campos punteros como las energías emergentes, la exploración de aguas profundas, la tecnología hipersónica y los dispositivos de fusión nuclear están ampliando rápidamente los límites de aplicación de las esferas de aleación de tungsteno. Ya se trate de esferas para electrodos de soldadura ultrasónica en baterías de nueva generación, esferas de lastre para sumergibles de aguas profundas o esferas de protección de la primera pared para futuros reactores de fusión, las esferas de aleación de tungsteno siguen ocupando una posición insustituible gracias a su excepcional rendimiento integral. Es previsible que, a medida que los equipos evolucionen hacia diseños ligeros, extremos y sostenibles, el ámbito de aplicación de las esferas de aleación de tungsteno se amplíe aún más, convirtiéndose en uno de los materiales básicos clave que impulsan el desarrollo de numerosas industrias estratégicas.

## 1.6 Contexto de desarrollo de las bolas de aleación de tungsteno

tungsteno han experimentado una evolución completa, desde su uso militar hasta su integración en aplicaciones militares y civiles, y desde un simple contrapeso hasta un material multifuncional integrado. Este desarrollo refleja claramente la tendencia histórica de promoción mutua y progreso exponencial entre la ciencia de los materiales, la tecnología de la pulvimetalurgia y las exigencias de los equipos de alta gama.

### 1.6.1 Etapa inicial de investigación y desarrollo (mediados del siglo XX - década de 1980)

de tungsteno surgieron directamente de la urgente necesidad, durante la Guerra Fría, de proyectiles

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



perforantes de alta densidad y energía cinética, así como de sistemas de navegación inercial. Ya a finales de la década de 1950, las principales potencias militares occidentales comenzaron a investigar sistemáticamente aleaciones de alta densidad con tungsteno como matriz y níquel-hierro como aglutinante. Inicialmente, se fabricaban en forma de barras y placas para núcleos de proyectiles perforantes. A mediados de la década de 1960, ante las extremas exigencias de los giroscopios y los sistemas de navegación inercial de misiles, que requerían contrapesos de pequeño volumen y gran masa, los investigadores intentaron por primera vez fabricar esferas de precisión a partir de aleaciones de tungsteno para su uso en rotores de alta velocidad, sustituyendo así a las tradicionales esferas de acero o aleación de uranio. El avance fundamental en esta etapa radicó en el establecimiento y la verificación industrial de la teoría de la sinterización en fase líquida: controlando con precisión la temperatura de sinterización, la fase aglutinante se fundió brevemente y humedeció completamente las partículas de tungsteno, logrando un moldeo esférico con una densidad casi teórica.

Los primeros procesos eran extremadamente rudimentarios, basados principalmente en el moldeo y la sinterización libre, lo que resultaba en una esfericidad y consistencia dimensional deficientes, con una precisión que solo cumplía con los requisitos de munición y contrapesos generales. Sin embargo, fue durante este período que el sistema W-Ni-Fe se estableció como la composición estándar, y se verificó inicialmente el sistema W-Ni-Cu, que no requiere magnetismo. Simultáneamente, los laboratorios militares desarrollaron la primera generación de tecnología de rectificado y pulido, lo que permitió que la calidad superficial de las esferas de aleación de tungsteno pasara de un nivel tosco a uno aceptable, sentando las bases materiales y de proceso para la posterior industrialización. La investigación y el desarrollo durante esta etapa estuvieron casi exclusivamente orientados a proyectos de defensa, prácticamente sin aplicación en el sector civil, y la producción fue a pequeña escala y altamente clasificada.

### 1.6.2 Etapa de desarrollo de la industrialización (década de 1990 - principios del siglo XXI)

El fin de la Guerra Fría y el avance de la globalización han permitido que las esferas de aleación de tungsteno transiten rápidamente de ser materiales exclusivamente militares a mercados civiles y de doble uso a gran escala. La creciente escala y automatización de los equipos de pulvimetalurgia, junto con la consolidación de la tecnología de prensado isostático en frío, han impulsado la producción de esferas de aleación de tungsteno en un solo horno, pasando de kilogramos a toneladas y reduciendo significativamente los costos. La aplicación generalizada de hornos de sinterización al vacío y hornos de sinterización con protección de hidrógeno ha eliminado aún más las inclusiones de óxido y mejorado la consistencia interna de la calidad de las esferas.

La característica más significativa de este período fue el establecimiento y la estandarización de un sistema de clasificación de precisión. Los avances en equipos de rectificado especializados y abrasivos de diamante permitieron que las bolas de aleación de tungsteno evolucionaran de grados ordinarios a grados de precisión media a alta, alcanzando niveles sin precedentes de esfericidad y rugosidad superficial, cumpliendo así por primera vez los estrictos requisitos de los dispositivos inerciales aeroespaciales y los rodamientos industriales. Simultáneamente, el rápido desarrollo de los equipos de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

imagenología de medicina nuclear impulsó la industrialización de las bolas de aleación de tungsteno no magnéticas, convirtiéndose el sistema W-Ni-Cu en el material estándar para los colimadores PET-CT y SPECT. de tungsteno se utilizaban ampliamente en productos como plomos de pesca, cabezas de palos de golf, contrapesos para coches de carreras y pesas para válvulas de aceite, lo que impulsó una rápida expansión de la capacidad de producción mundial. China, Estados Unidos, Alemania y Rusia conformaban el grupo de producción líder, con el surgimiento de fábricas especializadas en bolas de aleación de tungsteno y una cadena de suministro cada vez más completa. Las normativas medioambientales más estrictas aceleraron aún más el proceso de sustitución del plomo, lo que conllevó un rápido aumento de la penetración de las bolas de aleación de tungsteno en el sector civil.

### 1.6.3 Etapa de mejora de alto rendimiento (desde el siglo XXI)

Al entrar en el siglo XXI, el desarrollo de esferas de aleación de tungsteno ha entrado en su tercera etapa, centrada en el alto rendimiento, la funcionalidad y la precisión. La nueva generación de equipos de alta gama impone exigencias casi rigurosas a las propiedades de los materiales, impulsando avances simultáneos en la composición, el procesamiento y la aplicación de las esferas de aleación de tungsteno.

En cuanto al diseño de la composición, se han producido en masa sistemas especiales como tungsteno-renio, tungsteno-cobre con alta conductividad térmica, alta pureza no magnética y dopaje con gadolinio/boro para la absorción de neutrones. Se han introducido trazas de tierras raras y nanotecnología para mejorar aún más la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad a la irradiación. En cuanto al proceso, métodos avanzados como el prensado isostático en frío a ultra alta presión, el pulido continuo multietapa, el pulido magnetorreológico y la cosinterización al vacío con hidrógeno se han generalizado, lo que permite que las esferas de aleación de tungsteno alcancen niveles de ultraprecisión, y que esferas de tamaño micrométrico e incluso submicrométrico comiencen a producirse en masa de forma estable.

Las áreas de aplicación están experimentando un crecimiento explosivo: campos de vanguardia como la esfera protectora de primera pared para dispositivos de fusión nuclear, la esfera de contrapeso para aeronaves hipersónicas, la esfera de lastre para sondas submarinas, la esfera de soldadura ultrasónica para baterías de nueva energía y la esfera osciladora para filtros 5G están emergiendo rápidamente. Mientras tanto, las investigaciones en fabricación aditiva y tecnologías de conformado casi a medida están abriendo nuevas vías para esferas de aleación de tungsteno con cavidades internas complejas o funciones de gradiente. La característica más distintiva de esta etapa es la profunda integración de los sectores militar y civil, así como la innovación colaborativa global. Gracias a su completa cadena de valor del tungsteno y su capacidad de fabricación a gran escala, China se ha consolidado como el país líder mundial en I+D y producción de esferas de aleación de tungsteno, con algunos productos de alta gama que ya superan a los de las potencias tradicionales. Las esferas de aleación de tungsteno ya no son solo materiales de una sola función, sino un ejemplo paradigmático de la profunda integración de materiales modernos, fabricación de precisión y equipamiento estratégico. Su desarrollo continúa en marcha y, sin duda, alcanzarán nuevas cotas en el futuro con el avance de megaproyectos como la energía de fusión, la exploración del espacio profundo y los cazas de sexta generación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

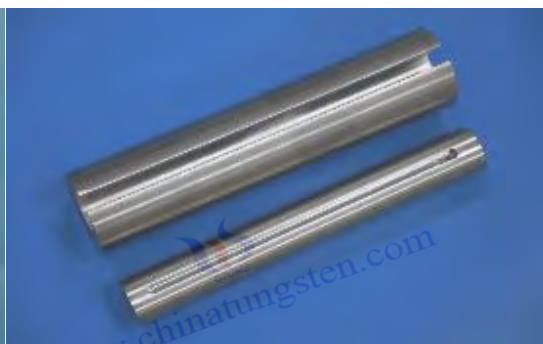
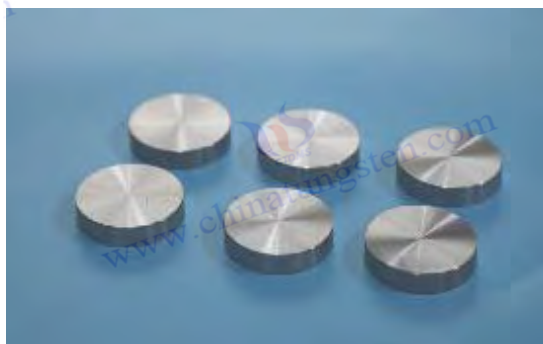
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Capítulo 2 : Propiedades básicas de las bolas de aleación de tungsteno

### 2.1 Características de densidad de esferas de aleación de tungsteno

La densidad es la principal ventaja de las esferas de aleación de tungsteno sobre todos los materiales funcionales esféricos tradicionales, y constituye la base material para lograr una gran masa, una fuerte inercia y un blindaje eficiente en un volumen muy reducido. Esta característica se debe directamente a que el tungsteno es uno de los metales estructurales más pesados de la naturaleza y a la capacidad única de la pulvimetalurgia para aumentar su contenido a niveles extremadamente altos.

#### 2.1.1 Rango del parámetro de densidad de las esferas de aleación de tungsteno

La densidad de las esferas de aleación de tungsteno no es un valor fijo, sino que varía dentro de un rango relativamente amplio pero altamente controlable para satisfacer diversas necesidades, desde contrapesos generales hasta aplicaciones especiales extremas. Ajustando el contenido de tungsteno, el tipo y la proporción de la fase aglutinante y el grado de densificación por sinterización, la densidad de las esferas de aleación de tungsteno producidas industrialmente puede abarcar de forma estable todo el rango de densidades, desde bajas hasta extremadamente altas. En los sistemas convencionales W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, el tungsteno suele ser el componente mayoritario, lo que da como resultado una alta densidad de esferas sinterizadas que supera con creces la de la mayoría de los metales de ingeniería. Este rango garantiza el cumplimiento de los requisitos de rendimiento de la mayoría de las esferas inerciales aeroespaciales, las esferas colimadoras para medicina nuclear y las esferas de contrapeso de alto rendimiento, a la vez que permite un margen suficiente para el ajuste de la composición con el fin de equilibrar la tenacidad, la maquinabilidad y el coste.

Al emplear una fórmula con alto contenido de tungsteno y combinarla con prensado isostático en frío a ultra alta presión y múltiples procesos de sinterización al vacío, la densidad de las esferas de aleación de tungsteno puede aproximarse aún más al valor teórico del tungsteno puro, convirtiéndola en la variedad de mayor densidad entre todas las esferas mecanizadas con precisión disponibles actualmente. Se utiliza específicamente en volantes de inercia para satélites, acelerómetros de navegación inercial para misiles y núcleos de proyectiles de energía cinética especiales, donde los requisitos de volumen son extremadamente estrictos. Por el contrario, en ciertos sistemas especializados que requieren conductividad térmica y eléctrica o absorción de neutrones, la densidad general puede reducirse adecuadamente mediante la adición de cobre, plata o el dopaje con boruros, creando un rango de densidad media a alta para lograr la integración multifuncional.

#### 2.1.2 Comparación de la densidad de las bolas de aleación de tungsteno con el plomo, el acero y otros materiales

En comparación con los materiales tradicionales de alta densidad, las esferas de aleación de tungsteno presentan una ventaja de densidad abrumadora. El plomo, que en su día fue el material pesado más utilizado, todavía se emplea en algunas aplicaciones de contrapeso de gama baja, pero su densidad es

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mucho menor que la de las esferas de aleación de tungsteno convencionales, además de presentar una elevada toxicidad ambiental y defectos en sus propiedades mecánicas. Para un mismo volumen, una esfera de aleación de tungsteno puede pesar más de 1,5 veces que una esfera de plomo. Esto significa que, para los mismos requisitos de contrapeso, el volumen de una esfera de aleación de tungsteno es solo aproximadamente el 60 % del de una esfera de plomo, lo que conlleva cambios revolucionarios en la miniaturización y la estructura compacta de los productos. Aún más importante, las esferas de aleación de tungsteno son completamente atóxicas y reciclables, poniendo fin a la prohibición del uso de plomo en productos médicos, alimentarios e infantiles.

En comparación con diversos tipos de acero, las bolas de aleación de tungsteno presentan una ventaja de densidad significativamente mayor. La densidad del acero estructural y del acero para rodamientos común es solo un 40 % de la de las bolas de aleación de tungsteno, e incluso el acero para herramientas más pesado no puede igualarla. Esto permite que las bolas de aleación de tungsteno logren el mismo o incluso mayor efecto de contrapeso con menos de la mitad del volumen, o incluso menos, en aplicaciones como volantes de inercia para coches de carreras, cabezas de palos de golf, plomos de pesca y bolas pesadas para válvulas de aceite, mejorando notablemente el rendimiento del producto y la experiencia del usuario.

En comparación con otros metales pesados candidatos, como el uranio empobrecido, las esferas de aleación de tungsteno, manteniendo una densidad igual o superior, evitan por completo la contaminación radiactiva y los problemas regulatorios especiales, convirtiéndose así en la única opción viable para materiales modernos, ecológicos y de alta densidad. Esta ventaja de densidad sin precedentes, combinada con excelentes propiedades mecánicas y respeto al medio ambiente, ha permitido que las esferas de aleación de tungsteno reemplacen rápidamente al plomo, el acero y otros materiales tradicionales durante los últimos treinta años, convirtiéndose en el componente funcional esférico de alta densidad dominante en aplicaciones de todo tipo, desde pequeñas hasta grandes, y desde el ámbito civil hasta el militar.

## 2.2 Características de resistencia de las bolas de aleación de tungsteno

de tungsteno son la garantía fundamental de su servicio fiable a largo plazo en entornos de rotación a alta velocidad, impactos de cargas elevadas y tensiones complejas. Además de mantener una densidad extremadamente alta, presentan una resistencia mecánica integral que supera con creces la de los materiales tradicionales de alta densidad y se aproxima a la del acero aleado de alta calidad, lo que las convierte en la primera opción para aplicaciones industriales exigentes y aplicaciones civiles de alta gama.

La resistencia a la tracción y el límite elástico se originan principalmente en la elevada resistencia intrínseca de las partículas de tungsteno y en la red tridimensional continua formada por la fase aglutinante. Tras la sinterización, las partículas de tungsteno se interconectan y quedan completamente encapsuladas por la fase aglutinante dúctil, lo que permite la transmisión y dispersión uniforme de la tensión, transformando así la fragilidad del tungsteno puro en un comportamiento macroscópico cuasi-dúctil. Gracias al efecto de refuerzo de la fase aglutinante, el sistema W-Ni-Fe suele presentar la mayor

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia, lo que lo hace especialmente adecuado para aplicaciones que requieren volantes de inercia de alta velocidad, bolas pesadas en válvulas de aceite y contrapesos en maquinaria de ingeniería de gran tamaño, donde se requieren enormes fuerzas centrífugas o cargas estáticas. El sistema W-Ni-Cu tiene una resistencia ligeramente inferior, pero aun así supera significativamente a los metales pesados no ferrosos y posee ventajas insustituibles en aplicaciones no magnéticas.

La esfera de aleación de tungsteno presenta una excepcional tenacidad al impacto y resistencia a la fatiga, lo que la hace resistente al agrietamiento o desprendimiento bajo condiciones de carga repetida, como las que se encuentran en cribas vibratorias, volantes de inercia de coches de carreras y zonas de impacto de palos de golf. Su resistencia a la compresión es particularmente impresionante, manteniendo la integridad geométrica sin deformación plástica bajo condiciones extremas de carga estática, como el lastre en aguas profundas y los contrapesos de los buques. Este equilibrio entre alta resistencia y tenacidad moderada transforma la esfera de aleación de tungsteno, de una simple esfera de alta densidad, en un componente fiable capaz de desempeñar funciones estructurales en entornos mecánicos complejos.

### 2.3 Características de dureza de las bolas de aleación de tungsteno

Las bolas de aleación de tungsteno exhiben características típicas de los materiales compuestos: la dureza macroscópica está dominada por partículas de tungsteno de alta dureza, coordinadas con la tenacidad y la unión, formando finalmente un rango ideal que es mucho mayor que el plomo y el acero ordinario, pero menor que el tungsteno puro o el carburo cementado, logrando así el mejor equilibrio entre resistencia al desgaste y economía de procesamiento.

Las partículas de tungsteno poseen una microdureza extremadamente alta, lo que las convierte en el principal factor que contribuye a la dureza. Tras la sinterización, las partículas de tungsteno ocupan la mayor parte del volumen, y su esqueleto duro proporciona a la esfera una excelente resistencia a la indentación y a los arañazos. Aunque la fase aglutinante tiene una dureza menor, es extremadamente delgada y difícil de indentar individualmente en las pruebas de dureza convencionales; por lo tanto, la dureza global refleja principalmente las características de la fase de tungsteno. El sistema W-Ni-Fe, debido a la presencia de elementos de refuerzo, suele tener la mayor dureza y es adecuado para esferas de tamices vibratorios, pesas de medición de precisión y contrapesos que requieren una alta resistencia a la deformación. El sistema W-Ni-Cu tiene una dureza ligeramente inferior, pero es suficiente para cumplir con los requisitos de los colimadores médicos y los instrumentos de precisión en cuanto a la resistencia superficial al microdaño. La dureza también se puede controlar de forma flexible mediante procesos y composición: prolongar el tratamiento térmico para promover el crecimiento de las partículas de tungsteno o añadir trazas de elementos como el cobalto y el molibdeno puede aumentar aún más la dureza. Por el contrario, aumentar la proporción de la fase aglutinante o realizar un recocido adecuado puede optimizar la tenacidad sin comprometer la dureza. Esta capacidad de diseño de la dureza permite que las esferas de aleación de tungsteno se adapten con precisión a diversas necesidades, desde contrapesos de alta resistencia hasta cojinetes de ultraprecisión, sin las dificultades de procesamiento ni los riesgos de fragilidad asociados a materiales excesivamente duros.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



## 2.4 Resistencia al desgaste de las bolas de aleación de tungsteno

Para lograr una larga vida útil en cribas vibratorias, rodamientos de precisión, medios de molienda y piezas giratorias de alta velocidad. Su excelente rendimiento proviene del comportamiento tribológico único formado por la sinergia de partículas de tungsteno de alta dureza y una unión resistente.

En condiciones de fricción seca o lubricación límite, las partículas duras de tungsteno que sobresalen soportan inicialmente la carga, resistiendo eficazmente el microcorte y el arado de las piezas en contacto. La fase aglutinante más blanda, tras un desgaste moderado, forma pequeñas cavidades, reduciendo la superficie de contacto real y contribuyendo al almacenamiento de aceite y a la reducción de la fricción. Con el paso del tiempo, los finos residuos de desgaste forman una película de transferencia en la interfaz de fricción, reduciendo aún más el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste.

En medios líquidos o entornos lubricados con aceite, la excelente tenacidad de la fase aglutinante evita el desprendimiento por fatiga, mientras que la alta estabilidad química de las partículas de tungsteno garantiza una excelente resistencia a la corrosión y al desgaste, manteniendo una tasa de desgaste extremadamente baja incluso en condiciones extremas como agua de mar, soluciones ácidas y alcalinas, o lodos que contienen mortero. En comparación con las bolas de acero tradicionales para rodamientos, las bolas de aleación de tungsteno presentan un volumen de desgaste significativamente menor y una vida útil mucho mayor en las mismas condiciones; en comparación con las bolas de cerámica, evitan el riesgo de fractura frágil.

La resistencia al desgaste a altas temperaturas es igualmente importante. A temperaturas de varios cientos de grados Celsius, la dureza y la resistencia de las bolas de aleación de tungsteno disminuyen extremadamente despacio, y la fase aglutinante no falla como en los lubricantes convencionales, lo que las convierte en la opción ideal para cojinetes de alta temperatura, volantes de inercia de alta velocidad y piezas móviles en equipos que trabajan en caliente. Es esta resistencia superior al desgaste en todas las condiciones de funcionamiento y durante todo su ciclo de vida lo que convierte a las bolas de aleación de tungsteno en los componentes esféricos de alto rendimiento más fiables y resistentes al desgaste en entornos de desgaste extremo, como cargas pesadas, altas velocidades, corrosión y altas temperaturas.

## 2.5 Conductividad térmica de las bolas de aleación de tungsteno

Las bolas de aleación de tungsteno varían significativamente en diferentes sistemas de composición, lo que permite satisfacer diversas necesidades, desde contrapesos comunes hasta disipación de calor a alta velocidad y condiciones frecuentes de choque térmico.

El sistema W-Cu presenta la mayor conductividad térmica general gracias a la elevada conductividad térmica intrínseca del cobre y a la formación de una red de cobre continua o semicontinua tras la sinterización. Esta característica lo hace ideal para aplicaciones que requieren la rápida disipación de grandes cantidades de calor en cortos periodos, como disipadores térmicos en encapsulados electrónicos de alta potencia, esferas de electrodos soldadas por resistencia y esferas funcionales en componentes de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

disipadores térmicos de alta temperatura. Incluso con un alto contenido de tungsteno, la fase de cobre proporciona canales de flujo de calor sin obstrucciones, manteniendo una baja diferencia de temperatura entre la superficie y el interior de la esfera.

La conductividad térmica de los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu es moderadamente alta. Si bien es mucho menor que la del cobre puro, sigue siendo significativamente mejor que la del acero inoxidable y las aleaciones de plomo. En volantes de inercia de alta velocidad, rotores automáticos de relojes o contrapesos de maquinaria pesada, esta conductividad térmica es suficiente para disipar el calor generado por fricción o corrientes parásitas de manera oportuna, evitando cambios dimensionales o el ablandamiento de la fase aglutinante causados por el sobrecalentamiento localizado.

En general, las esferas de aleación de tungsteno logran un gradiente controlable en la conductividad térmica mediante el diseño de su composición: se utiliza un sistema con alto contenido de cobre cuando se requiere una disipación de calor extrema, mientras que se emplea un sistema a base de níquel cuando se necesita un equilibrio entre alta densidad y conductividad térmica moderada. Esta flexibilidad les permite mantener una gestión térmica fiable en un amplio rango de temperaturas, desde instrumentos de precisión de baja temperatura hasta equipos industriales de alta temperatura.

## 2.6 Conductividad eléctrica de esferas de aleación de tungsteno

La conductividad eléctrica es una propiedad importante de las bolas de aleación de tungsteno en los campos del contacto eléctrico y el procesamiento eléctrico, y está determinada principalmente por el tipo y la distribución de la fase aglutinante.

Los sistemas W-Cu y W-Ag presentan la mejor conductividad eléctrica, con la fase de cobre o plata formando una red continua, lo que resulta en una resistividad esférica cercana a la del cobre o la plata puros. Estas esferas de aleación de tungsteno se utilizan ampliamente como esferas de contacto en interruptores de alta tensión, electrodos en soldadura por resistencia y componentes conductores en interruptores de vacío. Aprovechan la alta dureza y resistencia a la ablación del tungsteno para resistir el impacto del arco eléctrico, mientras que la alta conductividad del cobre y la plata garantiza una baja resistencia de contacto y un bajo calentamiento Joule.

Debido a la presencia de níquel, la conductividad de los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu es significativamente menor que la de los sistemas cobre-plata, pero aún así es mucho mayor que la del acero inoxidable, las aleaciones de titanio o los materiales cerámicos. En aplicaciones que requieren un equilibrio entre alta densidad, propiedades no magnéticas y un cierto nivel de conductividad, como contrapesos conductores en equipos médicos o componentes rodantes conductores en instrumentos de precisión, estas esferas aún pueden cumplir con los requisitos.

Cabe destacar que todas las bolas de aleación de tungsteno pueden recubrirse con plata, oro o níquel para reducir aún más la resistencia de contacto o mejorar la resistencia a la oxidación y la conductividad. Esta modificación superficial, junto con la conductividad intrínseca, permite que las bolas de aleación de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno alcancen un rendimiento óptimo en una amplia gama de aplicaciones de contacto eléctrico, desde instrumentos de precisión de bajo voltaje hasta interruptores de alto voltaje y alta corriente.

## 2.7 Estabilidad térmica de las esferas de aleación de tungsteno

de las bolas de aleación de tungsteno para mantener sus propiedades mecánicas, precisión dimensional y microestructura durante largos períodos a altas temperaturas se refleja en su eficacia, lo que constituye una ventaja clave que las distingue del plomo, las pesas de polímero y el acero aleado ordinario.

El tungsteno posee un punto de fusión extremadamente alto, lo que confiere a las esferas de aleación una excelente resistencia al ablandamiento por altas temperaturas. Incluso a temperaturas de varios cientos de grados o superiores, el esqueleto de partículas de tungsteno conserva su dureza y resistencia originales, y la fase aglutinante no presenta una volatilización significativa ni pérdida de fluidez. Los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu exhiben una mínima degradación de la resistencia tras un uso prolongado a altas temperaturas, lo que los hace especialmente adecuados para volantes de inercia rotativos de alta temperatura, piezas móviles de equipos de trabajo en caliente y contrapesos en hornos de alta temperatura.

Otra característica importante es su bajo coeficiente de dilatación térmica. El coeficiente de dilatación térmica global de las esferas de aleación de tungsteno es mucho menor que el del aluminio, el cobre y el acero inoxidable, y similar al de la mayoría de las cerámicas y materiales de cuarzo, lo que se traduce en mínimas variaciones dimensionales en un amplio rango de temperaturas. Esto es fundamental para instrumentos de precisión, rotores de relojes, esferas amortiguadoras de vibraciones en plataformas ópticas y pesas metrológicas de alta temperatura, ya que garantiza que mantengan su precisión geométrica y estabilidad funcional originales incluso ante fluctuaciones de temperatura.

Su resistencia al choque térmico es excepcional. Bajo condiciones de cambios bruscos de temperatura o choque térmico localizado, la expansión térmica de las partículas de tungsteno y la fase aglutinante se sincronizan perfectamente, lo que resulta en una baja tensión interfacial y una mínima probabilidad de formación de microfisuras. Esto permite que las esferas de aleación de tungsteno se utilicen durante largos periodos en electrodos de soldadura de alta temperatura, piezas móviles de moldes de prensado en caliente y entornos de vacío a alta temperatura. Es precisamente esta excelente estabilidad térmica en todo el rango de temperaturas, desde la temperatura ambiente hasta altas temperaturas, lo que convierte a las esferas de aleación de tungsteno en uno de los pocos materiales funcionales de alta densidad en los sistemas industriales modernos que pueden mantener un rendimiento prácticamente inalterado en rangos de temperatura extremos.

## 2.8 Ventajas y aplicaciones no magnéticas de las esferas de aleación de tungsteno

de tungsteno es su capacidad para aplicaciones en instrumentos de precisión, imágenes médicas y entornos electromagnéticos limpios. Mediante un control preciso de su composición, estas esferas logran una cobertura espectral completa, desde completamente no magnéticas hasta débilmente magnéticas, eliminando por completo las limitaciones de los materiales tradicionales de alta densidad en entornos

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



sensibles con campos magnéticos intensos o interferencias magnéticas débiles.

Las esferas de aleación de tungsteno completamente no magnéticas, representadas por el sistema W-Ni-Cu, presentan una característica única: el cobre y el tungsteno no forman fases ferromagnéticas, y el contenido de níquel se controla rigurosamente por debajo del umbral no magnético, lo que resulta en una permeabilidad magnética cercana a los niveles de vacío. Esta propiedad satisface el requisito de no magnetismo para todos los pesos y componentes estructurales que rodean los equipos de resonancia magnética (RM), garantizando que no se produzcan artefactos ni deriva posicional causados por la magnetización durante la adquisición de imágenes. De manera similar, en colimadores y componentes de blindaje de sistemas de imagen de medicina nuclear de alta gama, como PET-CT y SPECT, las esferas de aleación de tungsteno no magnéticas se han convertido en un material estándar indispensable, proporcionando un blindaje de alta densidad sin interferir con el campo magnético del detector.

En el campo de los instrumentos científicos de precisión, las esferas de aleación de tungsteno no magnéticas se utilizan ampliamente en balanzas de alta precisión, plataformas giratorias para pruebas de navegación inercial, masas amortiguadoras de vibraciones para plataformas ópticas y contrapesos para detectores sísmicos. Incluso la más mínima histéresis magnética o magnetoestricción puede provocar errores de medición, mientras que la naturaleza no magnética de las esferas de aleación de tungsteno garantiza que el sistema mantenga la máxima repetibilidad y estabilidad durante el funcionamiento a largo plazo. En la automatización industrial, los cojinetes de levitación magnética de alta velocidad, las bolas de equilibrado de bombas magnéticas y los contrapesos para pruebas de compatibilidad electromagnética también utilizan preferentemente esferas de aleación de tungsteno no magnéticas debido a sus características de nula interferencia magnética.

En comparación con las aleaciones tradicionales de acero inoxidable o titanio no magnéticas, las esferas de aleación de tungsteno no magnéticas presentan una masa significativamente mayor en el mismo volumen, lo que permite que los dispositivos logren una mayor inercia o efectos de contrapeso en un espacio más reducido. Esto evita los inconvenientes de la baja densidad del acero inoxidable y el elevado coste de las aleaciones de titanio. Por estas razones, las esferas de aleación de tungsteno no magnéticas se han convertido en el material funcional no magnético de alta densidad más consolidado y fiable para los dispositivos médicos modernos, la metrología de precisión y los entornos electromagnéticos limpios.

## 2.9 Rendimiento de blindaje contra la radiación neutrónica de esferas de aleación de tungsteno

de tungsteno, utilizadas para el blindaje contra la radiación neutrónica, se benefician de la posibilidad de introducir de forma direccional elementos con alta capacidad de absorción de neutrones mediante aditivos traza. Esto les permite mantener una alta densidad de blindaje gamma, a la vez que adquieren una eficiente capacidad de captura de neutrones térmicos y rápidos, logrando así una protección integral contra campos de radiación mixtos.

Elementos con alta sección de captura, como boro, gadolinio, samario y disprosio, se incorporan a matrices de W-Ni-Fe o W-Ni-Cu, distribuyéndose uniformemente en la fase aglutinante o sobre la

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficie de las partículas de tungsteno en forma de micropartículas compuestas o soluciones sólidas. Al pasar el haz de neutrones a través de la esfera, los elementos dopantes experimentan reacciones de absorción intensas con los neutrones térmicos, convirtiéndolos en partículas secundarias de baja energía o isótopos estables, lo que reduce eficazmente el flujo neutrónico. El tungsteno posee una buena capacidad para ralentizar los neutrones rápidos, reduciendo su energía a la región de los neutrones térmicos mediante múltiples procesos de dispersión elástica e inelástica. Posteriormente, los elementos dopantes completan la captura final, formando un mecanismo de blindaje conjunto completo contra neutrones rápidos y térmicos.

Esta propiedad de blindaje compuesto se demuestra plenamente en salas de tratamiento de medicina nuclear, dispositivos de terapia de captura de neutrones y estructuras de blindaje alrededor de reactores de investigación. Las esferas de aleación de tungsteno se pueden rellenar fácilmente en los huecos entre placas porosas, placas corrugadas o contenedores para formar una capa de blindaje de alta densidad y gran capacidad de absorción, evitando así los inconvenientes del polietileno borosilicato tradicional, como su baja densidad y su elevada toxicidad por plomo. En el diseño de protección para la producción de isótopos radiactivos, el almacenamiento de fuentes de neutrones para uso médico y los equipos industriales de detección de defectos por neutrones, las esferas de aleación de tungsteno dopadas con neutrones se han convertido en la mejor opción para equilibrar la eficiencia espacial y la eficacia del blindaje.

En comparación con las placas de boruro puro o cadmio, las esferas de aleación de tungsteno presentan una resistencia mecánica, una resistencia a la temperatura y una estabilidad dimensional significativamente superiores, lo que les permite mantener su eficacia de blindaje sin envejecer en entornos de alta temperatura, alta humedad o irradiación prolongada. Es precisamente esta ventaja integral de personalización, capacidad de composición y moldeo de precisión la que ha consolidado gradualmente a las esferas de aleación de tungsteno como un elemento indispensable en el campo de la protección contra la radiación neutrónica.

## **2.10 Rendimiento de blindaje contra la radiación gamma de esferas de aleación de tungsteno**

El rendimiento de blindaje de las esferas de aleación de tungsteno contra los rayos gamma se debe principalmente al número atómico y la densidad extremadamente altos del tungsteno, lo que le confiere el coeficiente de atenuación másica más alto y el espesor de capa hemirreductora más corto entre todos los materiales mecanizados con precisión, convirtiéndolo en el material de blindaje contra rayos gamma más eficiente y compacto en el campo moderno de la protección radiológica.

Las principales interacciones entre los rayos gamma y la materia incluyen el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la formación de pares de electrones. La sección transversal del efecto fotoeléctrico es directamente proporcional a las potencias elevadas del número atómico. El elevado número atómico del tungsteno le confiere una capacidad de absorción extremadamente alta para los fotones gamma en un amplio rango de energía, especialmente en la región de energía baja a media. En combinación con la altísima densidad de las esferas de aleación de tungsteno, el espesor de una capa de blindaje de la misma

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

masa es mucho menor que el del plomo, el hierro o el hormigón, lo que permite un mayor factor de atenuación en un espacio limitado.

En el diseño de salas de tratamiento con aceleradores lineales médicos, salas de tomografía por emisión de positrones (PET-CT), cámaras oscuras para la detección de defectos industriales y tanques de almacenamiento de fuentes radiactivas, se suelen utilizar esferas de aleación de tungsteno para rellenar paredes de blindaje multicapa, huecos de puertas giratorias o zonas de refuerzo localizadas, formando una estructura de blindaje densa y flexible. Su geometría esférica también ofrece ventajas adicionales en la supresión de la dispersión: los canales curvos que se forman naturalmente entre las esferas aumentan eficazmente las trayectorias de dispersión de los fotones, mejorando aún más la eficacia general del blindaje.

En comparación con los tradicionales bloques de plomo, las esferas de aleación de tungsteno son completamente atóxicas, resistentes a la corrosión, reciclables y poseen una alta resistencia mecánica, sin presentar los problemas de fluencia, flujo o liberación de sustancias tóxicas asociados al plomo. El excelente rendimiento general de las esferas de aleación de tungsteno resulta especialmente destacable en contenedores de blindaje móviles, tanques de transporte y equipos de protección personal que requieren movimientos o ajustes frecuentes. Esta combinación perfecta de alta eficacia de blindaje, tamaño reducido, atoxicidad, respeto al medio ambiente y estabilidad a largo plazo convierte a las esferas de aleación de tungsteno en uno de los materiales de blindaje contra rayos gamma más prestigiosos en la protección radiológica médica, la protección radiológica industrial y la gestión de residuos radiactivos.

## **2.11 Factores que afectan el rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno**

de tungsteno no presentan una constante inherente al material, sino que son el resultado del control sinérgico de múltiples variables, como la proporción de la composición, el proceso de fabricación y el postprocesamiento. Este alto grado de adaptabilidad permite que un mismo material base genere un sistema de producto completo que abarca diversas áreas, como contrapesos civiles, blindaje médico, componentes para altas temperaturas e instrumentos de precisión.

### **2.11.1 Efecto de la proporción de componentes en el rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno**

La proporción de los componentes es el factor principal que determina la densidad, las propiedades mecánicas, el magnetismo, la conductividad térmica y eléctrica, y la capacidad de blindaje contra la radiación de las esferas de aleación de tungsteno. Mediante el ajuste preciso del contenido de tungsteno y el tipo y la proporción de la fase aglutinante, se puede lograr una amplia gama de optimizaciones de rendimiento.

El contenido de tungsteno es la forma más directa de controlar la densidad. Aumentar la proporción de tungsteno puede mejorar significativamente la densidad general, permitiendo que las esferas alcancen mayor masa en volúmenes de fijación más pequeños, lo que las hace idóneas para aplicaciones con

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

limitaciones de espacio, como volantes de inercia, rotores de relojes y colimadores médicos. Reducir moderadamente el contenido de tungsteno permite la adición de una fase aglutinante, mejorando así la tenacidad y la maquinabilidad, y satisfaciendo las mayores exigencias de resistencia al impacto en aplicaciones como bolas de cribado vibratorio y contrapesos de alta resistencia. El tipo y la proporción de la fase aglutinante determinan las propiedades magnéticas y funcionales. Los sistemas que utilizan níquel-hierro como fase aglutinante logran un equilibrio entre bajo magnetismo y alta resistencia, adecuado para la mayoría de las aplicaciones de rotación a alta velocidad y contrapesos industriales. Los sistemas que utilizan níquel-cobre o cobre puro como fase aglutinante logran un no magnetismo completo y una conductividad térmica y eléctrica mejorada, convirtiéndose en la opción preferida para imágenes de medicina nuclear, entornos de resonancia magnética y componentes de contacto eléctrico. Un mayor contenido de cobre resulta en una mejor conductividad térmica y eléctrica, pero una resistencia y densidad ligeramente menores, lo que constituye una compensación típica en el rendimiento.

La adición de oligoelementos funcionales amplía aún más las posibilidades de regulación. La adición de cobalto, molibdeno y renio mejora significativamente la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la fluencia; el dopaje con elementos como el boro y el gadolinio dota a las esferas de una mayor capacidad de absorción de neutrones; los elementos de tierras raras o metales de transición mejoran las propiedades mecánicas generales y la estabilidad a la radiación al purificar los límites de grano y suprimir las inclusiones de oxígeno. La formulación científica de estos oligoelementos permite que las esferas de aleación de tungsteno experimenten una mejora sustancial en su rendimiento, pasando de tipos de uso general a tipos con funciones especiales, manteniendo el sistema básico sin cambios.

En resumen, el diseño preciso de la proporción de los componentes confiere a las bolas de aleación de tungsteno una extraordinaria capacidad de adaptación de su rendimiento. Los ingenieros pueden encontrar la solución óptima en múltiples dimensiones, como densidad, resistencia, magnetismo, conductividad térmica y blindaje, según las condiciones de trabajo específicas. Esta es la base fundamental del material de las bolas de aleación de tungsteno, que permite satisfacer ampliamente las diversas necesidades de distintos campos, desde el uso civil hasta los sectores médico e industrial de alta gama.

### **2.11.2 Influencia del proceso de preparación en las propiedades de las bolas de aleación de tungsteno**

El proceso de fabricación es el nexo crucial entre las esferas de aleación de tungsteno y las materias primas en polvo, dando como resultado productos terminados de alto rendimiento. Cada paso clave afecta directamente al grado de densificación, la uniformidad de la microestructura y el grado de consecución del rendimiento final.

El método de conformado es el factor principal que afecta la uniformidad de la densidad. En comparación con el moldeo por compresión, el prensado isostático en frío proporciona una presión uniforme en todas las direcciones, lo que reduce significativamente el gradiente de densidad y la tensión interna dentro de la preforma. Esto da como resultado esferas sinterizadas que se aproximan más a la densidad teórica y

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

reduce el riesgo de agrietamiento. El prensado isostático a alta presión puede mejorar aún más la densidad de empaquetamiento inicial de las partículas de tungsteno, creando mejores condiciones para la posterior sinterización en fase líquida.

Los parámetros del proceso de sinterización influyen decisivamente en el rendimiento. La correcta combinación de la temperatura y el tiempo de sinterización en fase líquida determina directamente si la fase aglutinante moja adecuadamente las partículas de tungsteno y si estas experimentan una disolución-reprecipitación apropiada, lo que afecta la resistencia de la unión interfacial y la esfericidad de las partículas. Temperaturas excesivamente altas pueden provocar una pérdida excesiva de la fase aglutinante o un crecimiento anormal de las partículas de tungsteno, reduciendo la tenacidad; temperaturas demasiado bajas resultan en una densificación insuficiente, formando porosidad residual que compromete la resistencia. La elección de una atmósfera protectora de vacío o hidrógeno es igualmente crucial, ya que permite eliminar eficazmente impurezas nocivas como el oxígeno y el carbono, evitando la formación de inclusiones frágiles.

El rectificado, el pulido y el tratamiento térmico posteriores constituyen los ajustes finales para optimizar el rendimiento. El rectificado de precisión en varias etapas no solo determina la esfericidad y la rugosidad superficial, sino que también mejora significativamente la resistencia a la fatiga y al desgaste al eliminar la capa de defectos superficiales. Un tratamiento de recocido o envejecimiento adecuado puede eliminar la tensión residual del rectificado, optimizar el estado de la fase aglutinante y mejorar aún más la tenacidad al impacto y la estabilidad dimensional. El recubrimiento superficial o el tratamiento de pasivación química pueden aumentar la resistencia a la corrosión y a la oxidación, prolongando la vida útil en ambientes húmedos o con presencia de productos químicos.

En resumen, cada etapa del proceso de fabricación influye claramente en el rendimiento: el conformado determina la calidad del lingote, la sinterización determina la microestructura y la densidad, y el postratamiento determina el estado de la superficie y la distribución de tensiones. Solo mediante la optimización sistemática de todos los parámetros del proceso se puede transformar el potencial teórico de rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno en una fiabilidad práctica en ingeniería. Esta es la razón fundamental de las importantes diferencias de rendimiento y precio entre las bolas de aleación de tungsteno de alta gama y los productos convencionales.

### **2.11.3 Influencia del procesamiento posterior en las propiedades de las bolas de aleación de tungsteno**

El procesamiento posterior es un paso crucial en la transformación de esferas de aleación de tungsteno, desde piezas sinterizadas hasta productos funcionales de alta precisión, ya que afecta directamente la integridad superficial, la exactitud dimensional, las propiedades mecánicas y la fiabilidad a largo plazo de las esferas. Esta etapa comprende múltiples procesos, como el rectificado y pulido, el tratamiento térmico, la modificación superficial y la clasificación por calidad. Cada paso requiere un control preciso para evitar la introducción de nuevos defectos o la pérdida de las ventajas microestructurales obtenidas en los procesos anteriores.

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



El rectificado y el pulido, como procesos fundamentales, tienen el impacto más directo en la calidad superficial y las propiedades mecánicas. Mediante el rectificado progresivo con abrasivos de diamante multietapa o medios cerámicos, la superficie de la esfera puede evolucionar gradualmente desde un estado rugoso hasta un acabado tipo espejo, mejorando no solo la esfericidad y la redondez, sino también reduciendo significativamente las microfisuras superficiales y la tensión residual. Esta optimización superficial mejora directamente la resistencia a la fatiga y al desgaste, haciendo que la esfera sea menos propensa al desconchado o a la corrosión por picaduras durante el rodamiento a alta velocidad o los impactos repetidos. Sin embargo, un rectificado excesivo puede provocar una exposición excesiva de partículas de tungsteno en la superficie, reduciendo el espesor de la capa tenaz e induciendo una fractura frágil; por lo tanto, es necesario un control estricto de la cantidad de material eliminado y la presión de pulido.

El tratamiento térmico se utiliza principalmente para liberar la tensión residual de la sinterización y el rectificado, y para optimizar aún más el estado de la fase aglutinante. Un recocido al vacío o un envejecimiento a baja temperatura adecuados pueden promover la difusión y la unión de las partículas de tungsteno en la interfaz con la fase aglutinante, mejorando la tenacidad al impacto y la estabilidad a altas temperaturas, a la vez que se evita el crecimiento de grano causado por la recristalización a alta temperatura. Un tratamiento térmico inadecuado puede provocar ligeras variaciones dimensionales o un aumento de la porosidad interna, lo que afecta a la estabilidad dimensional a largo plazo de la esfera de contrapeso de precisión.

Los tratamientos de modificación superficial, como el niquelado, el dorado, la pasivación química o el recubrimiento PVD, mejoran la funcionalidad para cumplir con requisitos ambientales específicos. El recubrimiento no solo mejora la resistencia a la corrosión y a la oxidación, sino que también reduce el coeficiente de fricción y la emisión de electrones secundarios, lo que garantiza un rendimiento constante de las esferas en ambientes húmedos y ácidos. En ambientes alcalinos o de vacío, controlar el espesor y la adherencia del recubrimiento es fundamental; un espesor excesivo puede provocar desprendimiento, mientras que un espesor insuficiente no proporciona una protección eficaz.

Los procesos de clasificación de calidad e inspección final emplean métodos no destructivos, como la levitación magnética, el escaneo láser o la imagen óptica, para garantizar la consistencia entre lotes. Esta clasificación no solo elimina las bolas defectuosas, sino que también las categoriza según las diferencias en sus propiedades microscópicas, determinando directamente si son aptas para aplicaciones como rodamientos de alta gama, colimadores médicos o instrumentos de precisión. El impacto general del procesamiento posterior se puede resumir en «optimización de la superficie, alivio de tensiones, mejora funcional y garantía de calidad», y su aplicación científica representa el paso definitivo para que las bolas de aleación de tungsteno pasen de ser productos cualificados a componentes funcionales superiores.

## 2.12 CTIA GROUP LTD Bola de aleación de tungsteno MSDS

La Hoja de Datos de Seguridad (HDS) para esferas de aleación de tungsteno fabricadas por Zhongwu Intelligent Manufacturing Co., Ltd. es un documento estándar de seguridad química desarrollado para

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

las esferas de aleación de tungsteno de alta densidad de la compañía. Su objetivo es proporcionar una evaluación de riesgos integral y orientación sobre protección durante todo el ciclo de vida, desde la producción y el transporte hasta el uso y la eliminación. Como empresa de alta tecnología especializada en materiales de tungsteno, la HDS de Zhongwu Intelligent Manufacturing cumple estrictamente con las normas internacionales (como las directrices del SGA) y las regulaciones nacionales (como la GB/T 16483), abarcando secciones clave como la identificación de sustancias, la clasificación de peligros, las medidas de primeros auxilios, la respuesta ante incendios, el manejo de derrames, el control de la exposición, las propiedades fisicoquímicas, la estabilidad y reactividad, la información toxicológica, el impacto ecológico, la eliminación de residuos, la información sobre el transporte y la información regulatoria, garantizando así la seguridad y el cumplimiento para los usuarios en aplicaciones industriales, civiles o médicas.

La sección de identificación de materiales aclara en primer lugar la identidad química de las esferas de aleación de tungsteno: su número CAS corresponde principalmente a tungsteno (7440-33-7), complementado con níquel (7440-02-0), hierro (7439-89-6) o cobre (7440-50-8), entre otros. Se trata de esferas metálicas de alta densidad, generalmente con un brillo plateado o metálico. El documento subraya que las esferas son productos sólidos de pulvimetalurgia, no polvo, y no liberan gases volátiles.

La sección de propiedades fisicoquímicas describe las bolas de aleación de tungsteno como compuestos metálicos de alto punto de fusión y resistentes a altas temperaturas, con una solubilidad extremadamente baja; son insolubles en agua, pero solubles en agua regia o ácido sulfúrico concentrado caliente.

La información de transporte clasifica las bolas de aleación de tungsteno como mercancías no peligrosas y permite su transporte como productos metálicos comunes. La información reglamentaria incluye las declaraciones de conformidad con REACH y RoHS, así como el cumplimiento de las normas chinas de la serie GB 30000.



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



### Capítulo 3 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno

#### 3.1 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno según su composición

La clasificación de esferas de aleación de tungsteno según su composición es el método más fundamental y práctico, ya que el tipo y la proporción de la fase aglutinante determinan directamente la densidad, el magnetismo, la conductividad térmica, la resistencia y las funciones especiales. Esta es una dimensión crucial que debe definirse claramente al seleccionar esferas. Actualmente, los dos sistemas industriales más consolidados y utilizados son las esferas de aleación W-Ni-Fe y las esferas de aleación W-Ni-Cu, que cubren prácticamente todas las necesidades principales.

##### 3.1.1 Esferas de aleación W-Ni-Fe

Las esferas de aleación W-Ni-Fe están compuestas de tungsteno como componente principal y níquel-hierro como fase aglutinante, en una proporción específica. Actualmente, son el tipo de esfera de aleación de tungsteno más producido, de mejor rendimiento y con mayor aplicación. La función principal del níquel es proporcionar una excelente humectabilidad, lo que permite que las partículas de tungsteno se reordenen completamente y formen una estructura densa durante la sinterización en fase líquida. La adición de hierro refuerza aún más la fase aglutinante a base de níquel, logrando un equilibrio óptimo entre resistencia y tenacidad. Tras la sinterización, este sistema presenta una estructura típica de dos fases: las duras partículas de tungsteno se interconectan para formar una estructura continua, mientras que la solución sólida de níquel-hierro rellena los espacios y une cada partícula de tungsteno, manteniendo una densidad extremadamente alta y una ductilidad y tenacidad al impacto a temperatura ambiente muy superiores a las del tungsteno puro.

Debido a la presencia de la fase aglutinante de níquel-hierro, las esferas de este sistema suelen presentar un magnetismo débil. Sin embargo, en la mayoría de los contrapesos industriales, bloques de equilibrado para maquinaria de ingeniería, bolas de contrapeso para válvulas de aceite, volantes de inercia para coches de carreras, bolas para cribas vibratorias y contrapesos para grandes equipos rotativos, este ligero magnetismo no supone ninguna interferencia y, por el contrario, resulta una característica útil para la identificación y clasificación. Gracias a su elevada resistencia y dureza, las esferas de W-Ni-Fe presentan una vida útil extremadamente larga bajo impactos repetidos, rodadura con cargas pesadas y fricción a altas temperaturas, con una superficie menos propensa al desprendimiento por fatiga o a la deformación plástica. Los fabricantes suelen ajustar con precisión la proporción de níquel-hierro para lograr un equilibrio más exacto entre resistencia y tenacidad: un contenido de hierro ligeramente superior proporciona una mayor resistencia, adecuada para contrapesos estáticos de cargas pesadas; un contenido de níquel ligeramente superior proporciona una mayor tenacidad, adecuada para el equilibrado dinámico a alta velocidad.

En el sector civil, las esferas de W-Ni-Fe, gracias a su coste controlable, suministro estable y rendimiento fiable, se han convertido en el material predominante para plomos de pesca, núcleos de cabezas de pelotas de golf, contrapesos de equipos deportivos y rotores automáticos de relojes de alta gama. En el sector

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

industrial, se utilizan ampliamente en contrapesos de soportes de cables de puentes, contrapesos de ascensores, lastre para barcos y pesas de medición de precisión.

### 3.1.2 Esferas de aleación W-Ni-Cu

Las esferas de aleación W-Ni-Cu utilizan cobre en lugar de hierro como aglutinante principal, eliminando así por completo el magnetismo y convirtiéndolas en la única opción para todas las aplicaciones sensibles al electromagnetismo. El cobre y el tungsteno tampoco forman fases ferromagnéticas, y el cobre en sí mismo es completamente no magnético. El contenido de níquel también se controla rigurosamente dentro de un rango seguro para evitar el magnetismo, lo que da como resultado una permeabilidad magnética relativa de las esferas cercana a los niveles de vacío. Esta característica totalmente no magnética permite su uso sin reservas en la periferia de equipos de resonancia magnética (RM), colimadores PET-CT y SPECT, bloques de amortiguación de vibraciones para plataformas ópticas de precisión, balanzas de alta precisión y cualquier instrumento científico con requisitos extremadamente exigentes de limpieza del campo magnético.

Durante la sinterización, la fase de cobre forma una red continua o semicontinua, lo que no solo hace que las esferas sean completamente no magnéticas, sino que también mejora significativamente su conductividad térmica y eléctrica, lo que las hace excelentes en condiciones que requieren una rápida disipación del calor o de la electricidad estática. La excelente resistencia del cobre a la corrosión atmosférica también permite que las esferas de W-Ni-Cu mantengan una superficie brillante, prácticamente sin oxidación ni decoloración, en ambientes húmedos, con niebla salina o ligeramente ácidos/alcalinos, una característica especialmente valiosa para dispositivos médicos y equipos de salas blancas. En comparación con el sistema W-Ni-Fe, la resistencia y la dureza de las esferas de W-Ni-Cu son ligeramente inferiores, pero siguen siendo muy superiores a las de los materiales de lastre tradicionales como el plomo y el aluminio, y su tenacidad es suficiente para soportar la mayoría de las cargas dinámicas.

En el ámbito médico, las esferas de W-Ni-Cu se han convertido en el material de relleno estándar para colimadores de radioterapia, aperturas de enfoque de Gamma Knife y componentes de blindaje de diversos aceleradores lineales médicos. Ofrecen una eficiencia de atenuación de rayos gamma extremadamente alta sin interferir con la resonancia magnética. En el campo de los instrumentos de precisión, se utilizan como bloques de masa para plataformas giratorias de levitación magnética, contrapesos para detectores sísmicos, sistemas de aislamiento de vibraciones para interferómetros láser y pesas de calibración para balanzas analíticas de alta gama. Los productos de consumo de alta gama, como los rotores de relojes mecánicos de lujo y las patas amortiguadoras de vibraciones para sistemas de audio de alta fidelidad, también recurren cada vez más a las esferas de W-Ni-Cu para eliminar por completo la posible influencia del magnetismo en las señales débiles. Es esta combinación única de "alta densidad + no magnetismo total + resistencia a la corrosión y conductividad térmica" la que ha consolidado a las esferas de aleación W-Ni-Cu como líderes indiscutibles en limpieza electromagnética y seguridad médica, convirtiéndolas en uno de los representantes más avanzados tecnológicamente y de mayor valor añadido de la familia de esferas de aleación de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.1.3 Esferas de aleación W-Cu

Las esferas de aleación W-Cu se preparan mediante un proceso de infiltración de cobre por pulvimetalurgia. Primero, las partículas de tungsteno se sinterizan formando una estructura porosa, y luego el cobre fundido se infiltra completamente en los poros, dando lugar a una estructura típica de pseudoaleación. La fase de cobre y el tungsteno no son solubles entre sí, pero se encuentran firmemente embebidos a nivel microscópico, logrando una fusión perfecta entre la alta dureza y densidad del tungsteno y la excelente conductividad térmica y eléctrica del cobre. Debido a su alto contenido típico de cobre, las esferas de W-Cu tienen una densidad general ligeramente inferior a la de los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu, pero poseen la mayor conductividad térmica y eléctrica de todas las esferas de aleación de tungsteno. El calor y la corriente se conducen prácticamente sin obstáculos dentro de la red de cobre, lo que las convierte en el material idóneo para aplicaciones que requieren alta densidad y una disipación de calor extrema. En el encapsulado electrónico de alta densidad de potencia, los disipadores de calor de filtros para estaciones base 5G, las almohadillas térmicas para zócalos de prueba de chips y las bolas de electrodos para soldadura por resistencia de alta corriente, las esferas de W-Cu disipan rápidamente las altas temperaturas localizadas, evitando el agrietamiento o la disminución del rendimiento causada por la concentración de tensiones térmicas.

La fase de cobre también confiere a las esferas una excelente resistencia a la erosión por arco eléctrico. En aplicaciones que implican la conmutación frecuente de altas corrientes, como interruptores de vacío de alto voltaje, contactos de tiristores y electrodos de electroerosión, la superficie de las esferas de W-Cu solo experimenta una ligera fusión y evaporación bajo el impacto del arco. La estructura de tungsteno soporta inmediatamente la nueva superficie, manteniendo una resistencia de contacto estable y extendiendo la vida útil mucho más allá de la del cobre puro o las aleaciones de cobre. La superficie se puede recubrir fácilmente con plata u oro, lo que reduce aún más la resistencia de contacto y la tendencia a la oxidación. Las esferas de aleación W-Cu se han convertido en esferas funcionales de alto rendimiento indispensables en la electrónica de potencia moderna, los contactos eléctricos para el transporte ferroviario y los equipos de soldadura de alta gama, ocupando una posición dominante en campos que buscan el equilibrio óptimo entre densidad, conductividad térmica y resistencia al arco eléctrico.

### 3.1.4 Bolas de aleación W-Ag

Las bolas de aleación W-Ag también se fabrican mediante un proceso de infiltración de plata. Si bien la plata tiene un punto de fusión inferior al del cobre, su conductividad eléctrica y térmica es superior, y presenta una mayor resistencia a la oxidación en vacío o atmósfera inerte. Por ello, se ha convertido en la opción predilecta para aplicaciones con requisitos exigentes en cuanto al rendimiento del contacto eléctrico.

La fase de plata forma una red conductora altamente interconectada dentro de la esfera, lo que confiere a las esferas de W-Ag la menor resistividad y la mayor resistencia a la erosión por arco eléctrico entre todos los materiales metálicos. Incluso bajo corrientes de impacto de miles de amperios, la plata experimenta solo una ligera evaporación, y la estructura de tungsteno forma rápidamente nuevas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficies de contacto estables, lo que garantiza que la resistencia de contacto apenas aumente con el número de ciclos de conmutación. Esta característica la convierte en un material de contacto fundamental en relés de CC de alta tensión, interruptores de vacío de alta potencia y conectores eléctricos de grado aeroespacial.

La ductilidad de la plata le confiere una excelente resistencia a la soldadura en frío y propiedades autolimpiantes. Es menos propensa a la adhesión o acumulación de carbono en entornos con inserciones/extracciones frecuentes o vibraciones, lo que la hace especialmente adecuada para aplicaciones de contactos eléctricos de precisión con requisitos de fiabilidad y vida útil extremadamente altos. Asimismo, la plata posee propiedades antibacterianas de amplio espectro, lo que otorga a las bolas de W-Ag una ventaja natural en aplicaciones sensibles a la higiene, como equipos electromédicos y contactos de maquinaria de procesamiento de alimentos. Si bien su coste es elevado, su rendimiento integral e inigualable en contactos eléctricos garantiza que las bolas de aleación W-Ag se mantengan firmemente a la cabeza de los materiales de contacto eléctrico de alta gama.

### 3.1.5 Otros componentes Bolas de aleación de tungsteno

Las bolas de aleación de tungsteno con diferentes composiciones, profundamente personalizadas para condiciones de trabajo especiales, también han logrado una producción en masa estable o un suministro de lotes pequeños, lo que representa la última extensión del sistema de materiales de bolas de aleación de tungsteno hacia la funcionalización y las aplicaciones extremas.

Las esferas de aleación de tungsteno dopadas con absorbentes de neutrones contienen elementos de alta sección transversal de captura, como boro, gadolinio y samario, añadidos direccionalmente a una matriz de W-Ni-Fe o W-Ni-Cu. Esto permite que las esferas alcancen una excelente capacidad de absorción de neutrones, manteniendo a la vez un blindaje gamma de alta densidad. Se utilizan ampliamente en salas de tratamiento de medicina nuclear, capas de blindaje de reactores de investigación y contenedores de isótopos radiactivos para lograr una protección integral contra campos de radiación mixtos.

La adición de pequeñas cantidades de elementos refractarios como el renio o el molibdeno incrementa significativamente la temperatura de recristalización y la resistencia a altas temperaturas. Esto permite que las bolas mantengan su dureza y estabilidad dimensional a temperaturas de varios cientos de grados o incluso superiores, lo que las hace idóneas para cojinetes de alta temperatura, piezas laminadas en moldes para trabajo en caliente y contrapesos y piezas móviles en equipos de vacío de alta temperatura.

Las esferas de aleación de tungsteno modificadas con tierras raras, mediante la adición de trazas de elementos como itrio, lantano y cerio, purifican significativamente los límites de grano, refinan las partículas de tungsteno e inhiben la hinchazón por irradiación, mejorando notablemente la estabilidad estructural en condiciones de irradiación prolongada. Se utilizan principalmente en componentes de cámaras de blancos de aceleradores médicos y en el interior de reactores de isótopos de alto flujo.

Las esferas de aleación de tungsteno con fases unidas nanocristalinas o amorfas representan una línea de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



investigación puntera. Mediante procesos de solidificación rápida o aleación mecánica, se obtienen fases unidas ultrafinas o incluso amorfas, lo que permite que las esferas alcancen una mayor resistencia y durabilidad, manteniendo una alta densidad. Actualmente, se utilizan en aplicaciones de alto rendimiento, como rotores de relojes de alta gama y esferas amortiguadoras de vibraciones para instrumentos de precisión. Estas bolas especiales de aleación de tungsteno tienen un volumen de producción pequeño y un coste elevado; sin embargo, han ampliado enormemente los límites de aplicación de las bolas de aleación de tungsteno, transformándolas con éxito de materiales de contrapeso tradicionales de alta densidad en componentes de precisión multifuncionales altamente personalizables, demostrando plenamente la extensibilidad infinita y el potencial de ingeniería del sistema de bolas de aleación de tungsteno.

### 3.2 Clasificación de bolas de aleación de tungsteno según su precisión

La precisión es el estándar de clasificación de calidad más directo para las bolas de aleación de tungsteno, ya que determina directamente su aplicabilidad en escenarios como el contacto rodante, el equilibrio dinámico, la colimación de la radiación y los requisitos de apariencia. La industria ha establecido una clara división en dos niveles: grado de precisión y grado ordinario, con diferencias significativas entre ambos en cuanto a procesos de rectificado, métodos de ensayo, rendimiento final y precio.

#### 3.2.1 Bolas de aleación de tungsteno de precisión

Las esferas de aleación de tungsteno de precisión representan el máximo nivel de la tecnología actual de procesamiento de esferas de aleación de tungsteno. Su esfericidad, redondez, rugosidad superficial y uniformidad entre lotes se controlan dentro de rangos extremadamente estrictos, cumpliendo plenamente con los requisitos más exigentes de la imagen médica de alta gama, los instrumentos de precisión, los experimentos científicos y los productos de consumo de alta gama.

El proceso de producción emplea un pulido progresivo con diamante en varias etapas, combinado con pulido magnetorreológico o pulido fino asistido por ultrasonidos. Desde el desbaste hasta el pulido espejo, se requieren más de diez pasos, cada uno realizado en un entorno limpio, con temperatura y humedad constantes. La esfera se monitoriza en tiempo real mediante escaneo láser de alta precisión o interferómetros ópticos en cada etapa para garantizar la eliminación progresiva de las desviaciones, evitando su acumulación. La superficie final presenta un acabado tipo espejo, prácticamente sin marcas de pulido visibles y con un tacto suave y sedoso.

Esta extrema precisión se manifiesta por primera vez en los colimadores de medicina nuclear y los sistemas de enfoque de radioterapia: solo las esferas de aleación de tungsteno de grado de precisión pueden garantizar la consistencia geométrica de decenas de miles de microcanales, lo que permite enfocar el haz de rayos gamma con la nitidez de la punta de un bolígrafo, evitando la interferencia por dispersión y la fuga de dosis. En el ámbito de los rotores automáticos de relojes mecánicos de alta gama, las plataformas giratorias de prueba de giroscopios láser, los bloques de masa amortiguadores de vibraciones para plataformas de aislamiento óptico y las pesas patrón metroológicas nacionales, las esferas de grado

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de precisión aseguran una distribución uniforme de la masa a nivel de microgramos y un equilibrio dinámico a nivel submicrónico, lo que permite que el sistema mantenga una estabilidad perfecta incluso en condiciones de extrema baja velocidad o funcionamiento silencioso. Las esferas de aleación de tungsteno de grado de precisión se suministran generalmente en lotes pequeños de alto valor añadido, envasadas en viales individuales sellados al vacío o cajas llenas de nitrógeno, y cada esfera viene acompañada de un número de serie único y un informe de inspección completo. No son solo materiales, sino que también se consideran componentes funcionales esenciales de los instrumentos científicos de precisión. Su dificultad de procesamiento y su coste son mucho mayores que los de las esferas de grado ordinario, pero proporcionan garantías insustituibles para la seguridad médica, la precisión de la investigación científica y la fabricación de alta gama.

### 3.2.2 Bolas de aleación de tungsteno de grado ordinario

Las bolas de aleación de tungsteno de grado estándar están destinadas a los mercados industriales y civiles a gran escala. El control de precisión equilibra los requisitos funcionales con el coste y la producción, convirtiéndolas en la categoría de bolas de aleación de tungsteno más exportada a nivel mundial. Su procesamiento es relativamente sencillo, utilizando normalmente molinos horizontales o verticales de gran capacidad con bolas de cerámica o acero para la molienda por lotes, complementado con tamices de clasificación y pruebas de corrientes de Foucault para eliminar defectos superficiales. La superficie presenta un acabado mate o semibrillante uniforme, sin arañazos ni picaduras visibles a simple vista, suficiente para la mayoría de las aplicaciones de contrapesos y laminación a baja y media velocidad. Si bien las tolerancias de esfericidad y diámetro no son tan estrictas como las de las bolas de precisión, superan con creces las de las bolas tradicionales de plomo fundido o acero, lo que las hace perfectamente aptas para aplicaciones como contrapesos en maquinaria de ingeniería, lastre para barcos, contrapesos de ascensores, bolas pesadas para válvulas de aceite, bolas para cribas vibratorias, plomos de pesca y núcleos para cabezas de palos de golf.

Las esferas de grado ordinario se producen priorizando la uniformidad entre lotes y la rentabilidad. Generalmente se envasan a granel por kilogramo o tonelada, o en simples bolsas de plástico. Las pruebas se basan principalmente en el muestreo, y los informes solo proporcionan valores promedio y rangos. Esta estrategia les permite responder rápidamente a la demanda de compras al por mayor a precios altamente competitivos, convirtiéndolas en el principal material para la sustitución de plomo en esferas de aleación de tungsteno.

Si bien no son tan precisas como las bolas de aleación de tungsteno de grado de precisión, las bolas de aleación de tungsteno de grado estándar son idénticas a las de grado de precisión en indicadores clave como la densidad, la dureza y la resistencia a la corrosión, con solo algunas concesiones razonables en el acabado superficial y las tolerancias geométricas. Esta filosofía de diseño, que prioriza la calidad, ha impulsado la adopción a gran escala de materiales ecológicos de alta densidad en todo el mundo, sentando las bases para la modernización sostenible, desde la industria pesada hasta los bienes de consumo cotidianos.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

### 3.3 Clasificación de las bolas de aleación de tungsteno según su aplicación

La clasificación por aplicación es la forma más adecuada de categorizar los materiales según las necesidades del usuario final, traduciendo directamente las propiedades del material en un valor de ingeniería específico. Actualmente, las tres principales categorías de aplicación reconocidas en la industria son las bolas de aleación de tungsteno para contrapesos, las bolas de aleación de tungsteno para blindaje y las bolas de aleación de tungsteno para cojinetes, que abarcan más del 90 % de los escenarios de aplicación reales para las bolas de aleación de tungsteno.

#### 3.3.1 Bolas de aleación de tungsteno de grado contrapeso

Las bolas de contrapeso de aleación de tungsteno son la categoría más producida y utilizada dentro de la familia de bolas de aleación de tungsteno. Su principal función es proporcionar la máxima masa en un volumen mínimo, logrando así la miniaturización del producto, la compactación estructural y un rendimiento dinámico optimizado. Ya se trate de contrapesos en maquinaria pesada, bolas de gran peso en válvulas de perforación petrolífera, lastre de quillas de barcos, sistemas de contrapeso de ascensores, volantes de inercia de coches de carreras, núcleos de cabezas de pelotas de golf, plomos de pesca o rotores automáticos en relojes mecánicos de lujo, las bolas de contrapeso de aleación de tungsteno son el material de elección insustituible debido a su inigualable relación volumen-masa.

Estas esferas suelen utilizar sistemas de W-Ni-Fe o W-Ni-Cu, con la mayor densidad y acabados superficiales estándar, manteniendo un estricto control de costes para equilibrar rendimiento y economía. En rotores de relojes de alta velocidad o volantes de inercia de coches de carreras, las esferas de contrapeso concentran el momento de inercia en un radio muy pequeño, mejorando significativamente la eficiencia del almacenamiento de energía y la velocidad de respuesta. En aplicaciones de carga estática, como soportes de cables de puentes y contrapesos de grúas torre, logran el mismo efecto de equilibrio con un volumen mucho menor que el plomo o el hormigón, lo que supone un gran ahorro de espacio de instalación y costes de transporte. Su respeto por el medio ambiente es una ventaja decisiva para sustituir los productos de plomo; sus propiedades totalmente no tóxicas y reciclables cumplen fácilmente con las normativas más estrictas de la UE (RoHS), las regulaciones de seguridad de productos de consumo de Norteamérica y las normas medioambientales chinas. Las bolas de contrapeso de aleación de tungsteno están altamente estandarizadas. Las empresas suelen mantener existencias en series de diámetros, y los usuarios solo necesitan indicar el peso deseado y el espacio de instalación para encontrar rápidamente las especificaciones óptimas. Esta facilidad de uso, combinada con las ventajas de su tamaño reducido, su gran capacidad y su carácter ecológico y no tóxico, ha convertido a las bolas de contrapeso de aleación de tungsteno en uno de los productos más exitosos y ampliamente adoptados en la ola de sustitución del plomo de las últimas dos décadas.

#### 3.3.2 Esferas de aleación de tungsteno de grado blindaje

Las esferas de aleación de tungsteno de grado blindaje están diseñadas específicamente para la protección radiológica. Su principal ventaja radica en lograr la máxima eficiencia de atenuación contra rayos gamma,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

neutrones o radiación mixta con un volumen y peso mínimos. Son los materiales de blindaje más compactos y ecológicos en instalaciones modernas de tecnología médica, detección de defectos industriales y tecnología nuclear.

En salas de tratamiento con aceleradores lineales médicos, salas de máquinas PET-CT, Gamma Knife, cuartos oscuros para la detección de defectos en tomografías computarizadas industriales y contenedores de almacenamiento y transporte de isótopos radiactivos, se suelen utilizar esferas de aleación de tungsteno de grado blindaje para rellenar paredes de blindaje multicapa, puertas giratorias, zonas reforzadas localmente o contenedores de blindaje móviles, formando una estructura protectora densa, flexible y adaptable. En comparación con los tradicionales bloques de plomo, estas esferas ocupan aproximadamente dos tercios del volumen, manteniendo el mismo efecto de blindaje, lo que reduce significativamente el peso y facilita la miniaturización y el diseño modular de los equipos. Sus propiedades totalmente atóxicas, resistentes a la fluencia y a la pulverización catódica eliminan por completo el riesgo de contaminación por plomo y de deformación a largo plazo.

Para campos de radiación mixta que requieren el bloqueo simultáneo de rayos gamma y neutrones, las esferas de blindaje suelen emplear formulaciones modificadas dopadas con elementos como el boro y el gadolinio para lograr un blindaje integrado de rayos gamma y neutrones. La geometría esférica también proporciona ventajas adicionales en la supresión de la dispersión; los canales curvos que se forman naturalmente entre las esferas extienden eficazmente las trayectorias de fotones y neutrones, lo que mejora aún más el factor de atenuación general. En puertas blindadas y en el área de relleno alrededor del vidrio plomado de ventanas de observación que requieren apertura frecuente, la fluidez de las esferas de aleación de tungsteno facilita enormemente su instalación y mantenimiento.

Las esferas de aleación de tungsteno para blindaje generalmente requieren propiedades no magnéticas o de bajo magnetismo para evitar interferencias con el campo magnético de los equipos de imagen. Por ello, los sistemas W-Ni-Cu y las esferas W-Ni-Cu modificadas con absorbentes se han convertido en la opción predominante. Sus superficies se someten a tratamientos especiales de pasivación o chapado en oro para reducir aún más la dispersión secundaria de electrones y fotones. Se suministran en formatos de alto valor y lotes pequeños, cada uno acompañado de un informe detallado de verificación de su rendimiento de blindaje, lo que las convierte en el medio de blindaje más eficiente, ecológico y fiable en los campos actuales de la protección radiológica médica e industrial.

### 3.3.3 Bolas de aleación de tungsteno para rodamientos

Las bolas de aleación de tungsteno representan la aplicación de alta gama de este material en piezas móviles de precisión. Su función es lograr una vida útil ultralarga y una fricción ultrabaja bajo cargas extremas, medios corrosivos o entornos de vacío a alta temperatura, gracias a su elevada dureza, excelente resistencia al desgaste y a la fatiga. En condiciones operativas adversas donde los rodamientos industriales convencionales presentan dificultades, como en bombas para ácidos y álcalis fuertes, equipos de aguas profundas, bombas de alta presión para desalinización de agua de mar, recipientes de mezcla química y sistemas de transmisión de ejes de vacío a alta temperatura, las bolas de aleación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



tungsteno ofrecen una vida útil varias veces superior a la de las bolas de acero tradicionales debido a su dureza y estabilidad química, que superan con creces las del acero para rodamientos. El duro esqueleto de partículas de tungsteno resiste eficazmente la corrosión por microcorte y picaduras, mientras que la tenacidad de la fase aglutinante evita la fragmentación frágil común en las bolas cerámicas, manteniendo una fiabilidad extremadamente alta en entornos con impactos y vibraciones.

En aplicaciones que requieren coeficientes de fricción extremadamente bajos y velocidades extremadamente altas, como piezas de mano dentales de ultra alta velocidad, husillos de alta velocidad y centrífugas de precisión, las bolas de aleación de tungsteno de grado de precisión, tras un pulido espejo y una modificación superficial especial, pueden alcanzar una fricción casi tan baja como la de las bolas de cerámica, incluso con lubricación pobre en aceite. Su mayor densidad también facilita el control de la fuerza centrífuga y el equilibrio dinámico. Destacan especialmente en cojinetes de vacío y de alta temperatura. Las bolas de aleación de tungsteno presentan una degradación mínima de la dureza y la resistencia a cientos de grados Celsius, y su fase aglutinante no se volatiliza ni se carboniza como la grasa, lo que las convierte en la opción ideal para mecanismos de vacío aeroespaciales, equipos de recubrimiento de semiconductores y componentes de transmisión en hornos de tratamiento térmico de alta temperatura. Las bolas de aleación de tungsteno para cojinetes tienen requisitos extremadamente altos de precisión, consistencia e integridad superficial, y suelen emplear estándares de precisión o incluso de ultraprecisión. Cada bola se somete a pruebas de corrientes de Foucault y a una inspección óptica a tamaño real. La superficie suele tratarse con un recubrimiento de carbono tipo diamante (DLC) o un lubricante sólido de MoS<sub>2</sub> para reducir aún más la fricción y el desgaste. Se suministran en lotes muy pequeños a precios unitarios extremadamente altos, pero aportan mejoras revolucionarias en la vida útil y prolongan los ciclos de mantenimiento de equipos críticos, convirtiéndose en un material indispensable para los rodamientos de bolas en la fabricación moderna de alta gama y en piezas móviles sometidas a condiciones de trabajo especiales.

### 3.3.4 Balón de salud de aleación de tungsteno

#### Orígenes históricos y connotaciones culturales de las bolas chinas de aleación de tungsteno para la salud

Las pelotas de ejercicio, como herramienta tradicional para el cuidado de la salud, tienen una historia que se remonta a siglos atrás, a las civilizaciones orientales. Inicialmente, se utilizaban materiales naturales como nueces y jade. Con el desarrollo de la metalurgia, los metales se convirtieron gradualmente en un material importante para la fabricación de pelotas de ejercicio. Las pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno, como producto que combina tecnología moderna y conceptos tradicionales de salud, no solo perpetúan antiguas tradiciones culturales, sino que también representan avances significativos en la ciencia de los materiales y los procesos de fabricación. Esta evolución refleja la búsqueda constante de la humanidad por un estilo de vida saludable y su continua exploración de la funcionalidad de las herramientas. Desde una perspectiva cultural, el uso de las pelotas de ejercicio encarna un profundo pensamiento filosófico; su movimiento rotatorio simboliza los conceptos tradicionales del ciclo del cielo y la tierra y la armonía del yin y el yang, logrando un estado de equilibrio

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

físico y mental a través del movimiento regular de las manos.

En la sociedad contemporánea, el valor cultural de las pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno se ha reinterpretado y desarrollado. Su exquisita elaboración y diseño único no solo cumplen funciones prácticas, sino que también se convierten en un símbolo cultural y una forma de arte. Muchas pelotas de ejercicio de alta calidad están grabadas con patrones tradicionales o caligrafía, fusionando a la perfección la estética artística con la funcionalidad para el ejercicio. Esta característica como portadora de cultura eleva las pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno más allá de lo común, convirtiéndolas en un importante medio para la difusión de la cultura tradicional. Al mismo tiempo, con la creciente conciencia sobre la salud, el número de usuarios de pelotas de ejercicio continúa expandiéndose, y sus connotaciones culturales se enriquecen y actualizan constantemente durante su uso. Usuarios de diferentes edades y procedencias han tendido puentes para el intercambio cultural a través de este dispositivo, dando lugar a un fenómeno cultural único en torno a las pelotas de ejercicio.

Desde una perspectiva social, el uso y la difusión de las pelotas de salud de aleación de tungsteno han impulsado la popularización de conceptos de vida saludable. En actividades comunitarias y charlas sobre salud, estas pelotas se utilizan frecuentemente como herramientas de demostración para fomentar la atención a la salud de las manos y el entrenamiento de la coordinación corporal. Esta sutil forma de educación para la salud tiene un impacto positivo en la mejora de la alfabetización en salud pública. Además, la cultura de las pelotas de salud también ha promovido el desarrollo de industrias relacionadas, conformando una cadena industrial completa que abarca desde la investigación y el desarrollo de materiales hasta la innovación de procesos, y desde la instrucción de uso hasta la promoción cultural. Este proceso no solo genera valor económico, sino que, aún más importante, conserva y desarrolla la cultura de la salud tradicional, infundiéndole nueva vitalidad en la sociedad moderna.

### **Una combinación perfecta de propiedades del material y diseño ergonómico**

La pelota de ejercicio de aleación de tungsteno se distingue principalmente por las propiedades únicas de su material. Como material metálico de alta densidad, la aleación de tungsteno posee excelentes propiedades físicas y químicas. Su elevada densidad permite que la pelota tenga un peso adecuado en un volumen relativamente pequeño; esta óptima relación peso-volumen proporciona al usuario la carga de ejercicio precisa. La dureza y la resistencia al desgaste del material garantizan que el producto mantenga un acabado superficial duradero y una estabilidad dimensional durante su uso, evitando que el desgaste afecte la experiencia del usuario. Asimismo, la excelente conductividad térmica de la aleación de tungsteno le permite adaptarse rápidamente a la temperatura de la palma de la mano, proporcionando una sensación de confort. El efecto combinado de estas propiedades constituye la base de la funcionalidad de la pelota de ejercicio.

En cuanto al diseño, la pelota de ejercicio de aleación de tungsteno tiene en cuenta los principios ergonómicos. Su diámetro se calcula con precisión para garantizar un amplio espacio de movimiento y adaptarse a diferentes tamaños de mano. El tratamiento de la superficie emplea un proceso especial que mantiene un coeficiente de fricción óptimo para evitar el deslizamiento, sin presentar una rugosidad

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

excesiva que pudiera causar molestias. La distribución del peso está cuidadosamente diseñada para asegurar un centro de gravedad estable y una trayectoria de movimiento fluida durante la rotación. Algunos modelos de gama alta incorporan un diseño hueco con un dispositivo interno emisor de sonido que produce un sonido nítido y agradable al girar. Esta retroalimentación auditiva no solo aumenta el disfrute del uso, sino que también ayuda a los usuarios a controlar el ritmo de su ejercicio.

Las modernas pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno incorporan elementos inteligentes. Algunos modelos cuentan con sensores de movimiento integrados que registran datos como el número de rotaciones y la duración del ejercicio, y los sincronizan de forma inalámbrica con dispositivos móviles. Los usuarios pueden analizar sus datos de ejercicio mediante una aplicación específica y recibir consejos personalizados. Esta fusión entre el equipamiento de fitness tradicional y la tecnología moderna amplía considerablemente las funcionalidades de las pelotas de ejercicio. Además, teniendo en cuenta las necesidades específicas de los distintos grupos de usuarios, los fabricantes han desarrollado una gama de productos que incluye modelos básicos para principiantes, modelos médicos para rehabilitación y modelos avanzados para profesionales. Este diseño diferenciado refleja una filosofía de diseño centrada en el usuario, lo que permite que las pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno satisfagan las necesidades de un público más amplio.

### **Requisitos de precisión para el proceso de fabricación y el control de calidad**

fabricación de esferas de tungsteno para la salud implica múltiples etapas de precisión, cada una con un estricto control de calidad. La dosificación y preparación de las materias primas son fundamentales para garantizar la calidad del producto final. El polvo de tungsteno de alta pureza y otros elementos de aleación deben formularse en proporciones específicas y distribuirse uniformemente mediante equipos de mezcla avanzados. En la etapa de conformado, se utiliza tecnología de prensado isostático para asegurar una densidad uniforme en todas las direcciones del lingote, evitando defectos internos. El proceso de sinterización es el núcleo de todo el proceso de fabricación, y requiere un control preciso del perfil de temperatura y la atmósfera para permitir que las partículas de polvo formen una estructura metálica densa por difusión. Cualquier desviación en los parámetros durante este proceso puede provocar una disminución en el rendimiento del producto.

La etapa de acabado es crucial para la calidad final de la pelota de salud. Mediante múltiples procesos de pulido, se eliminan gradualmente los defectos superficiales para lograr la precisión dimensional y el acabado superficial requeridos. Es fundamental controlar los parámetros de corte durante el pulido para evitar microfisuras o la concentración de tensiones. El proceso de pulido no solo debe lograr un brillo espejo, sino también mantener la precisión geométrica de la esfera. En el caso de las pelotas de salud sonoras, el mecanizado de la cavidad interna y la instalación del dispositivo generador de sonido requieren una precisión extrema para garantizar un sonido nítido y agradable con un volumen moderado. El tratamiento superficial final, como el electrochapado o la pulverización, debe considerar tanto la estética como la durabilidad y la biocompatibilidad del recubrimiento.

Se implementa un sistema de control de calidad a lo largo de todo el proceso de fabricación. Desde el

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

almacenamiento de la materia prima hasta la entrega del producto terminado, se establecen estrictos estándares de prueba en cada etapa. Se utiliza ampliamente equipo de prueba avanzado, como instrumentos de medición 3D y analizadores acústicos, en la planta de producción para monitorear la calidad del producto en tiempo real. Es particularmente importante la prueba del rendimiento dinámico de la pelota de ejercicio, que incluye múltiples indicadores como el equilibrio rotacional, la calidad del sonido y la durabilidad de la superficie. Los fabricantes también deben establecer un sistema de trazabilidad integral para garantizar que cada producto pueda rastrearse hasta su lote de producción específico y los parámetros del proceso. Estas rigurosas medidas de control de calidad no solo garantizan el rendimiento del producto, sino que también brindan una garantía de seguridad confiable para los usuarios. Con los avances en la tecnología de fabricación, algunas empresas líderes han comenzado a introducir sistemas de fabricación inteligentes, optimizando continuamente los procesos de producción y mejorando la estabilidad y la consistencia de la calidad del producto mediante el análisis de datos y el aprendizaje automático.

### **Análisis científico de la eficacia y los beneficios para la salud**

Las bolas de terapia de tungsteno se basan en principios científicos y su mecanismo de acción involucra múltiples sistemas fisiológicos. La mano, una de las zonas con mayor densidad de terminaciones nerviosas del cuerpo humano, puede estimular sus puntos de acupuntura y zonas reflejas mediante el movimiento regular de la bola, regulando así las funciones de los órganos internos correspondientes. Esta estimulación se basa en el principio de los reflejos nerviosos, transmitidos a través de la médula espinal y el tronco encefálico hasta la corteza cerebral, formando un circuito regulador neuronal completo. Simultáneamente, el movimiento de rotación requiere la acción coordinada de varios grupos musculares de la mano; este entrenamiento de motricidad fina ayuda a mantener y mejorar la función motora de la mano, y es especialmente beneficioso para prevenir y aliviar los cambios degenerativos en las articulaciones de la mano.

Desde la perspectiva de la medicina deportiva, el ejercicio con balón medicinal es un ejercicio aeróbico continuo de baja intensidad. Este tipo de ejercicio es adecuado para personas de todas las edades, especialmente para personas de mediana edad y mayores. El movimiento de rotación regular favorece la circulación sanguínea en las extremidades superiores y mejora el flujo sanguíneo periférico, lo que resulta eficaz para prevenir síntomas como manos frías y entumecidas. Además, este ejercicio requiere un alto grado de concentración y coordinación óculo-manual; el entrenamiento constante a largo plazo ayuda a mejorar la velocidad de reacción y la coordinación del sistema nervioso. Algunos estudios también han demostrado que el ejercicio con balón medicinal tiene un impacto positivo en el mantenimiento y la mejora de la función cognitiva, posiblemente debido a su efecto promotor de la circulación sanguínea cerebral y la neuroplasticidad.

Desde la perspectiva de la salud mental, el uso de pelotas de ejercicio de aleación de tungsteno tiene un valor único. Su rotación rítmica tiene un efecto meditativo, ayudando a relajarse y aliviar el estrés. El sonido nítido proporciona retroalimentación auditiva, creando una atmósfera tranquila y pacífica. Muchos usuarios reportan alcanzar un estado de equilibrio entre mente y cuerpo durante la práctica con

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



la pelota, una experiencia altamente beneficiosa para el bienestar mental. Desde la perspectiva de la medicina preventiva, el ejercicio regular con pelota puede ser un componente importante de un plan integral de gestión de la salud, especialmente adecuado para la autorregulación en el acelerado estilo de vida actual. Es importante destacar que, para obtener los máximos beneficios para la salud, es necesario dominar la técnica correcta y mantener un hábito de ejercicio regular, idealmente con un plan personalizado desarrollado bajo la guía de un profesional.

### 3.3.5 Bolas de aleación de tungsteno para colimadores médicos

#### Principios básicos y requisitos funcionales de las bolas de aleación de tungsteno para colimadores médicos

En los equipos médicos modernos, el colimador, componente esencial de los sistemas de imagen y tratamiento por radiación, influye directamente en la precisión y seguridad de los procedimientos médicos. Un colimador es, fundamentalmente, un dispositivo que utiliza una estructura especial para controlar la distribución espacial de un haz de radiación, basándose en el principio de transmisión selectiva de partículas radiactivas. En aplicaciones médicas complejas, el colimador debe conformar con precisión la distribución del campo de radiación según las diferentes necesidades clínicas, garantizando que la dosis de radiación se proyecte con exactitud sobre la zona objetivo y minimizando la irradiación de los tejidos sanos circundantes. Esta capacidad de control preciso es crucial para mejorar los resultados diagnósticos y terapéuticos y reducir el riesgo de complicaciones.

Las esferas de aleación de tungsteno desempeñan un papel crucial en los sistemas colimadores, ya que su funcionamiento depende de estructuras mecánicas precisas y sistemas de control avanzados. Estas esferas, mediante disposiciones y mecanismos de movimiento específicos, ajustan dinámicamente la apertura y el cierre del haz de radiación, logrando una modulación en tiempo real del mismo. En los equipos de diagnóstico, los colimadores deben proporcionar una distribución uniforme del campo de radiación para garantizar una calidad de imagen estable; en los equipos terapéuticos, deben lograr una distribución tridimensional conformada de la dosis de radiación, cubriendo con precisión el tejido objetivo. Esta versatilidad funcional impone exigencias extremadamente altas en cuanto a la precisión de fabricación y la fiabilidad del movimiento de las esferas de aleación de tungsteno; cualquier mínima desviación dimensional o error de movimiento puede provocar una distorsión en la distribución del campo de radiación, afectando los resultados médicos.

Desde la perspectiva de la integración de sistemas, la funcionalidad de las bolas de aleación de tungsteno en los colimadores requiere la colaboración con múltiples subsistemas. El sistema de control de accionamiento debe garantizar un posicionamiento preciso de las bolas, el sistema de monitorización debe proporcionar información en tiempo real sobre su estado de movimiento y el sistema de seguridad debe asegurar la aplicación oportuna de medidas de protección ante situaciones anómalas. Esta colaboración entre múltiples sistemas exige que las bolas de aleación de tungsteno no solo posean excelentes propiedades físicas, sino que también mantengan una buena compatibilidad y fiabilidad con los componentes circundantes. Con el creciente desarrollo de la medicina de precisión, los colimadores

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

modernos imponen exigencias cada vez mayores al rendimiento de las bolas de aleación de tungsteno, incluyendo una mayor precisión de movimiento, una mayor velocidad de respuesta y una vida útil más prolongada. Estos requisitos impulsan la innovación y el desarrollo continuos en la tecnología de fabricación de bolas de aleación de tungsteno.

### **bolas de aleación de tungsteno**

La selección de materiales para colimadores médicos se basa en una rigurosa evaluación científica y una verificación práctica a largo plazo. Las aleaciones de tungsteno se eligen como el material ideal para la fabricación de esferas colimadoras principalmente debido a sus propiedades físicas y químicas únicas. En cuanto al blindaje contra la radiación, las aleaciones de tungsteno poseen excelentes coeficientes de atenuación másica y altos coeficientes de absorción lineal, bloqueando eficazmente diversos tipos de partículas radiactivas. Esta eficacia de blindaje se debe al elevado número atómico y a la suficiente densidad del tungsteno, lo que permite que la esfera de aleación de tungsteno logre el efecto protector deseado con un espesor relativamente pequeño. Asimismo, las aleaciones de tungsteno presentan excelentes propiedades mecánicas, con alta resistencia y dureza, lo que garantiza que la esfera mantenga una forma geométrica estable y una precisión dimensional durante su uso prolongado.

Las propiedades termofísicas del material son otra consideración importante. Durante el funcionamiento de los equipos médicos, el sistema colimador puede experimentar diversos grados de carga térmica, especialmente en modos de operación de alta carga. Las aleaciones de tungsteno poseen una excelente estabilidad y conductividad térmica, lo que les permite disipar rápidamente el calor acumulado y evitar fluctuaciones dimensionales o degradación del rendimiento causadas por cambios de temperatura. Además, la resistencia a la corrosión y a la fatiga de las aleaciones de tungsteno también son destacables, lo que garantiza la fiabilidad a largo plazo de la esfera en entornos médicos complejos. Es importante señalar que las diferentes proporciones de aleaciones de tungsteno presentan ciertas diferencias de rendimiento; por lo tanto, se debe seleccionar la formulación de material más adecuada en función del escenario de aplicación específico, buscando el equilibrio óptimo entre la eficacia de blindaje, las propiedades mecánicas y la dificultad de procesamiento.

Desde la perspectiva de la preparación de materiales, el control de calidad de las aleaciones de tungsteno comienza con la selección y el pretratamiento de las materias primas. El polvo de tungsteno de alta pureza y los aditivos de aleación requieren un análisis composicional riguroso y pruebas de propiedades físicas para garantizar la consistencia entre lotes. En la pulvimetalurgia, el control de los parámetros del proceso afecta directamente la microestructura y las propiedades finales del material. Una distribución uniforme del grano, una porosidad adecuada y una buena adhesión interfacial son indicadores clave para obtener aleaciones de tungsteno de alta calidad. Las técnicas modernas de análisis de materiales, como la microscopía electrónica de barrido y la difracción de rayos X, proporcionan una base científica para la evaluación del rendimiento de los materiales. Mediante estos métodos analíticos avanzados, podemos comprender mejor la relación intrínseca entre la composición, la estructura y las propiedades del material, lo que proporciona una guía teórica para la optimización y selección de materiales.

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

## Proceso de fabricación de precisión y sistema de control de calidad

de tungsteno para colimadores médicos es un proyecto de ingeniería integral que combina la ciencia de los materiales, el mecanizado de precisión y el control de calidad. El proceso de fabricación comienza con la etapa de pulvimetalurgia, donde el control preciso de la proporción de polvo, la presión de conformado y los parámetros de sinterización da como resultado una pieza en bruto con densidad y microestructura ideales. La optimización del proceso en esta etapa requiere una consideración exhaustiva del comportamiento de densificación del material, la cinética de crecimiento del grano y los mecanismos de difusión de los elementos de aleación para garantizar que la pieza en bruto alcance las propiedades físicas requeridas, minimizando a la vez los defectos internos y la tensión residual. Posteriormente, la pieza en bruto sinterizada se somete a un mecanizado de precisión para lograr gradualmente las dimensiones geométricas y la calidad superficial diseñadas. Este proceso implica la aplicación combinada de diversos métodos de mecanizado y el ajuste preciso de los parámetros del proceso.

En la etapa de acabado, el proceso de fabricación se centra en controlar la precisión geométrica y garantizar la integridad superficial. Mediante técnicas de rectificado y pulido CNC, se controla rigurosamente la redondez, la uniformidad del diámetro y la rugosidad superficial de las esferas, dentro de tolerancias micrométricas. El reto tecnológico en esta etapa reside en cómo asegurar una eliminación eficiente del material, evitando al mismo tiempo daños por mecanizado. Un diseño adecuado de la secuencia del proceso, una selección óptima de los parámetros de corte y unas condiciones apropiadas de refrigeración y lubricación son factores clave para garantizar la calidad del mecanizado. Cabe destacar la necesidad de un control estricto de la zona afectada por el calor y la tensión mecánica durante el mecanizado para prevenir cambios en la microestructura o daños en la integridad superficial. Estos defectos mínimos pueden afectar la estabilidad del rendimiento a largo plazo de las esferas en entornos de radiación.

Se implementa un sistema de control de calidad a lo largo de todo el proceso de fabricación, estableciendo un conjunto completo de estándares de prueba y métodos de monitoreo. Desde el almacenamiento de la materia prima hasta la entrega del producto terminado, cada etapa cuenta con puntos de control de calidad claramente definidos. Las dimensiones geométricas se miden con equipos de medición tridimensionales de alta precisión, la calidad superficial se evalúa mediante microscopios y perfilómetros avanzados, y el rendimiento del material se verifica mediante análisis fisicoquímicos profesionales. Además de las pruebas rutinarias, se realizan pruebas funcionales para simular el rendimiento en condiciones de uso reales. La introducción de métodos de control estadístico de procesos permite el monitoreo en tiempo real y el ajuste oportuno de las fluctuaciones de calidad durante el proceso de fabricación.

## Estándares de validación del desempeño y aplicación clínica

La evaluación de esferas de aleación de tungsteno para colimadores médicos se realiza mediante un proceso multidimensional y sistemático que requiere una consideración exhaustiva de sus propiedades físicas, mecánicas y funcionales. La verificación del rendimiento físico se centra en evaluar las características de respuesta de la esfera bajo condiciones de radiación, incluyendo parámetros como la

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transmitancia de radiación, el rendimiento de dispersión y la eficiencia de atenuación. Estas pruebas se llevan a cabo generalmente en montajes experimentales que simulan las condiciones de uso reales, empleando métodos de medición estandarizados y sistemas de referencia para garantizar la fiabilidad y la comparabilidad de los resultados. La verificación del rendimiento mecánico se centra en indicadores como la precisión de movimiento de la esfera, su resistencia al desgaste y su vida útil a la fatiga. Se utilizan pruebas de envejecimiento acelerado y de estabilidad a largo plazo para evaluar la capacidad de la esfera para mantener su rendimiento durante su vida útil prevista.

La verificación del rendimiento funcional es un paso crucial para asegurar que las esferas de aleación de tungsteno cumplan con los requisitos clínicos. Este proceso consta de dos fases: pruebas unitarias individuales y pruebas de integración del sistema. En la fase de pruebas unitarias individuales, la evaluación se centra en los parámetros funcionales básicos de la esfera, como la flexibilidad de movimiento, la precisión de posicionamiento y la repetibilidad. Las pruebas de integración del sistema colocan la esfera dentro de un sistema colimador completo para evaluar su rendimiento en un entorno de trabajo real. Esta fase implica pruebas más complejas, incluyendo características de respuesta dinámica, precisión de movimiento coordinado y adaptabilidad ambiental. El análisis e interpretación de los datos de las pruebas requiere conocimientos y experiencia especializados, centrándose no solo en el cumplimiento de los indicadores cuantitativos, sino también en las observaciones cualitativas de anomalías para asegurar que los riesgos potenciales se identifiquen y controlen eficazmente.

El establecimiento y la mejora de los estándares de aplicación clínica constituyen una base fundamental para garantizar la seguridad médica. Estos estándares, generalmente desarrollados por organizaciones especializadas, abarcan diversos aspectos, como la selección de materiales, los procesos de fabricación, los requisitos de rendimiento y los métodos de ensayo. El cumplimiento de estos estándares no solo se refleja en la conformidad del producto final, sino que también debe mantenerse durante todo el proceso de diseño, fabricación y validación. A medida que la tecnología médica avanza y se acumula experiencia clínica, estos estándares se actualizan y revisan continuamente para adaptarse a los nuevos desarrollos tecnológicos y las necesidades clínicas. Además de seguir los estándares y especificaciones establecidos, los fabricantes también establecen estándares de control interno más rigurosos para mejorar continuamente la seguridad y la eficacia de los productos. Esta búsqueda constante de la calidad refleja el alto sentido de responsabilidad de la industria de fabricación de dispositivos médicos con respecto a la seguridad del paciente.

### 3.3.6 Bolas de aleación de tungsteno para componentes inerciales aeroespaciales

Las bolas de aleación de tungsteno para componentes inerciales aeroespaciales se utilizan principalmente en sistemas de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia para satélites, actuadores de control de actitud para estaciones espaciales y plataformas de estabilización optoelectrónica de alta precisión. Son componentes de masa clave para lograr un tamaño reducido, un gran momento de inercia y una rotación estable a alta velocidad.

Estas esferas suelen tener diámetros grandes y exigen densidades extremadamente altas, empleando a

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



menudo un sistema W-Ni-Fe para lograr la mayor relación volumen/masa. La precisión superficial alcanza un nivel excepcional, y se someten a procesos especiales de equilibrado dinámico y desgasificación al vacío para garantizar que no se produzcan vibraciones ni fugas de gas durante la rotación a alta velocidad. Las esferas se incrustan o unen con precisión a los bordes de los volantes de inercia de aleación de titanio o fibra de carbono, lo que permite que estos volantes alcancen densidades de almacenamiento de energía muy superiores a las del acero o el aluminio con las mismas dimensiones externas. Esto mejora significativamente la maniobrabilidad del satélite y su vida útil en órbita.

Se han convertido en componentes estándar de sondas espaciales de gran profundidad, satélites de teledetección óptica y constelaciones de pequeños satélites comerciales. Pueden operar de forma fiable durante largos periodos en el vacío, con amplias variaciones de temperatura y en entornos de alta radiación, sin perder densidad, agrietarse ni liberar sustancias volátiles, lo que proporciona a las naves espaciales capacidades de almacenamiento e intercambio de momento angular estables, precisas y silenciosas. Con la creciente tendencia hacia la miniaturización y la alta movilidad de los satélites, la demanda de estas esferas de aleación de tungsteno está experimentando un crecimiento exponencial.

### 3.3.7 Bolas de aleación de tungsteno de uso civil (como plomos de pesca)

Las bolas de aleación de tungsteno de uso civil son conocidas principalmente por sus plomos de pesca, y también se utilizan en diversos productos cotidianos como contrapesos para cabezas de palos de golf, maquetas y juguetes. Son las bolas de aleación de tungsteno más económicas y se han popularizado en miles de hogares. Las bolas de aleación de tungsteno utilizadas en los plomos de pesca suelen emplear un sistema estándar de W-Ni-Fe, con un recubrimiento ecológico o un tratamiento de ennegrecimiento en la superficie. Esto conserva la textura metálica y evita que la aleación de tungsteno expuesta se oxide ligeramente durante su uso prolongado bajo el agua. En comparación con los plomos de plomo tradicionales, los plomos de aleación de tungsteno tienen solo entre un tercio y la mitad del volumen de plomo, pero pesan lo mismo o más, lo que permite a los pescadores hundirlos rápidamente hasta el fondo con menor resistencia al agua y reduce significativamente las pérdidas por enganches. Su mayor dureza también hace que el plomo sea menos propenso a la deformación en fondos rocosos o conchíferos, lo que prolonga considerablemente su vida útil. Las bolas de aleación de tungsteno también se utilizan ampliamente en el núcleo de las pelotas de golf, los contrapesos de los coches teledirigidos y las bolas de equilibrio internas de los juguetes magnéticos infantiles para lograr una forma más compacta y un control más preciso del centro de gravedad. Su superficie suele recubrirse con resina coloreada o goma blanda, lo que resulta estéticamente atractivo y seguro, y cumple plenamente con las más estrictas normas europeas y estadounidenses sobre la migración de metales pesados en juguetes. Las bolas de aleación de tungsteno para uso civil se han convertido en un producto altamente demandado por el mercado. En las plataformas de comercio electrónico se encuentran disponibles diversos colores, especificaciones y opciones de empaque, ofreciendo precios asequibles y una amplia gama de posibilidades. Estas bolas permiten a los consumidores experimentar la esencia de las aleaciones de tungsteno de la manera más directa, y se han convertido en la principal ventana de exportación para el público general y en una herramienta de promoción ambiental para la industria de las bolas de aleación de tungsteno.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

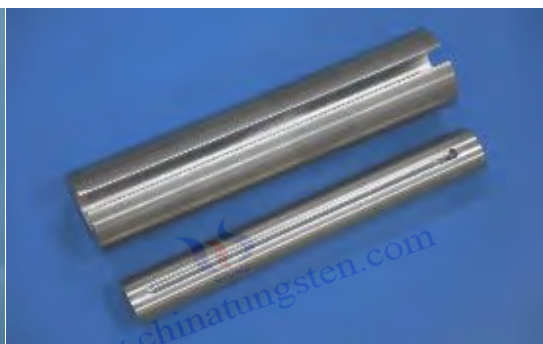
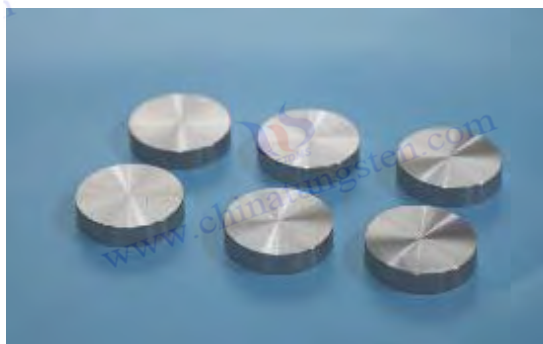
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Capítulo 4 Proceso de preparación de bolas de aleación de tungsteno

### 4.1 Pretratamiento de la materia prima de las bolas de aleación de tungsteno

El pretratamiento de la materia prima es el paso más fundamental y crucial en todo el proceso de fabricación de esferas de aleación de tungsteno. Su objetivo es transformar el polvo de tungsteno y el aglutinante en una mezcla de alta pureza química, tamaño de partícula uniforme y actividad adecuada, creando así una base microscópica de alta calidad para el posterior moldeo y sinterización. Cualquier impureza residual o mezcla irregular se manifestará en las esferas finales como segregación de densidad, inicio de grietas o fluctuaciones en el rendimiento. Por lo tanto, las empresas líderes consideran el pretratamiento de la materia prima un proceso confidencial clave.

#### 4.1.1 Purificación del polvo de tungsteno a partir de esferas de aleación de tungsteno

El polvo de tungsteno, componente principal de las esferas de aleación de tungsteno, determina directamente el límite superior teórico de densidad, el máximo de propiedades mecánicas y la estabilidad a largo plazo de las esferas mediante su pureza y características de partícula. La preparación industrial comienza con tungsteno azul o amarillo, reduciendo gradualmente el óxido a polvo de tungsteno metálico mediante un proceso de reducción con hidrógeno en varias etapas. Este proceso se lleva a cabo por etapas en un horno de empuje o rotatorio. La etapa de baja temperatura elimina preferentemente las impurezas volátiles y el agua de cristalización; la etapa de temperatura media controla el crecimiento del grano; y la etapa de alta temperatura completa la reducción final y la purificación de la superficie.

Tras la reducción, el polvo de tungsteno se somete a rigurosos procesos de purificación química y en fase gaseosa. El lavado ácido y los lavados repetidos con agua eliminan las impurezas solubles como el potasio, el sodio y el silicio, mientras que la desgasificación al vacío a alta temperatura o la reducción secundaria con hidrógeno eliminan por completo los elementos gaseosos nocivos como el oxígeno, el carbono, el azufre y el fósforo. Los procesos más avanzados incluso emplean tecnologías de fusión por zonas o purificación por plasma para lograr niveles de pureza extremadamente altos en el polvo de tungsteno, reduciendo el contenido de oxígeno a niveles prácticamente indetectables.

El control del tamaño y la morfología de las partículas es igualmente crucial. La distribución del tamaño de partícula de Fisher debe concentrarse en un rango estrecho; un polvo excesivamente fino produce un contenido de oxígeno excesivamente alto y una contracción de sinterización irregular, mientras que un polvo excesivamente grueso reduce la actividad de sinterización y la velocidad de densificación. Mediante clasificación por flujo de aire, sedimentación o corrientes de Foucault, el polvo de tungsteno se tamiza con precisión en rangos de tamaño de partícula que cumplen con los requisitos de sistemas de aleación específicos.

#### 4.1.2 Proporción elemental y mezcla de esferas de aleación de tungsteno

La dosificación y mezcla de los elementos son pasos clave para transformar el polvo de tungsteno con

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aglutinantes como níquel, hierro y cobre, así como posibles oligoelementos funcionales, en un polvo compuesto uniforme. El grado de uniformidad determina directamente si se producirán segregación de densidad, zonas de enriquecimiento de la fase aglutinante o fluctuaciones en el rendimiento entre lotes en las esferas sinterizadas.

El proceso de formulación se lleva a cabo en una sala blanca clase 10.000. En primer lugar, se utiliza una balanza electrónica de alta precisión para pesar cada elemento en polvo según la composición deseada. Los polvos de níquel, hierro y cobre también se someten a reducción con hidrógeno y desgasificación al vacío para garantizar su pureza y actividad. Se añaden aditivos traza como cobalto, molibdeno, elementos de tierras raras o boruros en forma de aleaciones madre o polvos prealeados para evitar errores y una distribución desigual derivados del pesaje directo. El proceso de mezclado es crucial para determinar la uniformidad final. Las mezcladoras tradicionales de tipo V han sido sustituidas gradualmente por molinos planetarios de bolas de alta energía, mezcladoras de doble cono de alta eficiencia o mezcladoras de vórtice tridimensionales. Estos dispositivos permiten lograr una uniformidad tanto macroscópica como microscópica, incluso sin medios de molienda o con medios de molienda blandos. El tiempo de mezclado y la velocidad de rotación deben ajustarse con precisión: un tiempo demasiado corto provoca un enriquecimiento localizado de la fase aglutinante, mientras que un tiempo demasiado largo introduce una deformación excesiva por trabajo en frío y contaminación por oxígeno. Algunas líneas de producción de alta gama también emplean la tecnología de granulación por secado por atomización para producir partículas compuestas casi esféricas con una excelente fluidez, lo que mejora aún más la uniformidad de densidad de la preforma prensada.

Para evitar la estratificación del polvo, se añaden trazas de parafina, polietilenglicol u otros agentes de moldeo inmediatamente después de la mezcla. A continuación, la mezcla se recubre en un horno de vacío a baja temperatura, lo que garantiza que cada partícula de polvo de tungsteno quede encapsulada por una fina película orgánica y el polvo de la fase aglutinante. El polvo compuesto final se tamiza a través de varias capas de tamices y se coloca en un recipiente sellado lleno de helio, a la espera del siguiente proceso de moldeo. En este punto, se dispone de un lote de esferas de aleación de tungsteno de alta calidad a escala atómica, lo que proporciona el punto de partida más fiable para alcanzar una tasa de conversión superior al 90 % del rendimiento teórico.

#### 4.2 Proceso de conformado de bolas de aleación de tungsteno

El proceso de conformado determina la densidad inicial, la uniformidad de la densidad y el estado de tensión interna de las palanquillas de aleación de tungsteno, lo que lo convierte en un eslabón crucial de toda la cadena de fabricación. Debido a su contenido extremadamente alto de tungsteno, su baja fluidez y su elevada dureza, el polvo de aleación de tungsteno es difícil de procesar mediante moldeo por inyección y moldeo por compresión tradicionales. Por lo tanto, los métodos de conformado más utilizados y consolidados se dividen actualmente en dos categorías principales: prensado en frío y prensado isostático. Cada método presenta particularidades en cuanto a la inversión en equipos, la calidad de la palanquilla y los escenarios de aplicación.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



#### 4.2.1 Prensado en frío y prensado isostático de esferas de aleación de tungsteno

El polvo de aleación de tungsteno mezclado se prensa directamente en piezas esféricas ligeramente mayores que el tamaño final. Los moldes suelen ser de carburo cementado de alta resistencia, con la cavidad interior pulida a espejo y recubierta con cromo duro o carbono tipo diamante para reducir la fricción durante el desmoldeo y evitar la adherencia. El proceso de prensado se realiza en prensas hidráulicas de polvo totalmente automáticas o en prensas mecánicas, con una fuerza de prensado que oscila entre cientos y miles de toneladas. El prensado logra una densificación inicial con una densidad relativamente uniforme mediante el movimiento sincrónico de los punzones superior e inferior. Para mejorar la eficiencia de carga del polvo y la uniformidad de las piezas, algunas líneas de producción han incorporado la carga de polvo asistida por vibración y prensas rotativas multiestación, lo que permite prensar docenas de piezas en un solo ciclo.

El prensado isostático supera por completo las limitaciones de la aplicación de fuerza unidireccional tradicional. El polvo mezclado se introduce primero en un molde de goma flexible o en una bolsa de plástico de alta elasticidad, se sella al vacío y se coloca en un recipiente de alta presión. La compresión isotrópica real se logra mediante un medio líquido que transmite una presión ultra alta desde todas las direcciones. La presión en los equipos de prensado isostático en frío suele ser mucho mayor que en el prensado en frío convencional, y el medio suele ser una emulsión de aceite o agua. El tiempo de mantenimiento de la presión se puede ajustar con flexibilidad. Tras el prensado, se retira la funda de goma, dejando al descubierto una pieza en bruto con forma casi final, superficie lisa y bordes redondeados. El prensado isostático en frío con bolsa seca y con bolsa húmeda coexisten; el primero es adecuado para la producción en grandes volúmenes de esferas de diámetro pequeño a mediano, mientras que el segundo es más apropiado para piezas en bruto de gran diámetro o con formas irregulares.

Ambos métodos de conformado requieren un desencerado inmediato a baja temperatura tras el prensado para evaporar o descomponer lentamente el agente conformador, evitando así la formación de burbujas y grietas durante la sinterización posterior. Si bien la resistencia del cuerpo en verde es aún relativamente baja, ya posee suficiente capacidad de manipulación y carga en el horno, preparándolo completamente para la siguiente etapa de sinterización en fase líquida.

#### 4.2.2 Comparación de las ventajas y desventajas de los procesos de conformado de bolas de aleación de tungsteno

El prensado en frío y el prensado isostático presentan características tecnoeconómicas distintas, formando una relación complementaria en lugar de sustitutiva. El equipo de prensado en frío requiere menor inversión, ocupa menos espacio, tiene un tiempo de ciclo más corto y permite un control preciso del desgaste del molde, lo que lo hace especialmente adecuado para la producción de bolas de contrapeso civiles de diámetro pequeño a mediano y precisión moderada, así como de esferas de grado industrial con una producción anual de millones a decenas de millones de unidades. Si bien la densidad aparente es ligeramente inferior a la del prensado isostático, mediante la optimización de la fluidez del polvo, el prensado bidireccional y el diseño del molde, se puede alcanzar una proporción relativamente alta de la

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

densidad teórica, cumpliendo plenamente los requisitos de la mayoría de las aplicaciones de contrapeso, blindaje y rodamientos. La línea de producción cuenta con un alto grado de automatización, permitiendo que una sola persona supervise varias prensas, lo que se traduce en el menor coste total de fabricación. Actualmente, es el método de conformado que más contribuye a la producción mundial de bolas de aleación de tungsteno.

El prensado isostático (PI) ofrece una ventaja significativa en cuanto a la uniformidad de la densidad de la preforma, los niveles de tensión interna y la adaptabilidad a formas complejas. Gracias a la presión completamente isotrópica, prácticamente no existen gradientes de densidad ni grietas por presión dentro de la preforma, lo que resulta en una excelente consistencia de la contracción tras la sinterización. Esto facilita la obtención de una esfericidad precisa y de ultraprecisión en el producto final. Las esferas de gran diámetro dependen especialmente del PI; de lo contrario, el prensado unidireccional produciría una delaminación apreciable y zonas de baja densidad en los extremos. El PI se utiliza casi exclusivamente para esferas en colimadores médicos, volantes de inercia de alta gama, rellenos para blindaje nuclear y todos los productos de alto valor añadido con estrictos requisitos de consistencia entre lotes. Entre sus desventajas se incluyen una elevada inversión en equipos, largos tiempos de ciclo y un alto consumo de moldes de caucho. Es adecuado para la producción especializada de esferas de precisión media a alta, de lotes pequeños a medianos o de gran tamaño.

En la práctica, muchas empresas líderes adoptan una estrategia híbrida: las esferas comunes y de contrapeso se fabrican mediante líneas de prensado en frío de alta velocidad, mientras que las esferas de precisión y especiales se producen mediante líneas de prensado isostático de alta calidad, logrando así el mejor equilibrio entre coste y rendimiento. La coexistencia y complementariedad de ambos procesos de conformado constituyen el sistema tecnológico de conformado flexible, eficiente y de amplio espectro que caracteriza a la industria actual de esferas de aleación de tungsteno.

#### **4.3 Proceso de sinterización de esferas de aleación de tungsteno**

La sinterización es la etapa clave de transformación de esferas de aleación de tungsteno, desde una pieza suelta hasta un cuerpo denso de alto rendimiento. Mediante un control preciso de la temperatura, el tiempo y la atmósfera, las partículas de tungsteno se reordenan, se unen mediante el cuello y se difunden en los límites de grano, mientras que la fase aglutinante logra una humectación en fase líquida y una distribución uniforme, formando finalmente una estructura compuesta bifásica con una densidad teórica extremadamente alta. Generalmente, las esferas de aleación de tungsteno se fabrican mediante un mecanismo de sinterización en fase líquida, que presenta un margen de proceso estrecho pero ofrece resultados significativos, convirtiéndolo en el paso crítico más exigente y arriesgado de todo el proceso.

##### **4.3.1 Control de temperatura y tiempo de mantenimiento de las bolas de aleación de tungsteno**

La coordinación precisa de la temperatura y el tiempo de mantenimiento determina la cantidad de fase líquida, el grado de disolución y reprecipitación de las partículas de tungsteno y la calidad de la microestructura final. El proceso de sinterización se divide generalmente en cuatro etapas: calentamiento

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

y eliminación de cera, presinterización en fase sólida, sinterización principal en fase líquida y enfriamiento controlado.

La etapa de calentamiento y eliminación de cera se lleva a cabo a una velocidad extremadamente lenta para asegurar la evaporación completa del agente formador sin burbujeo ni agrietamiento. En la etapa de presinterización en fase sólida, la temperatura se eleva por debajo del punto de fusión de la fase aglutinante, lo que permite que las partículas de tungsteno formen inicialmente conexiones de cuello mediante difusión en estado sólido, a la vez que se eliminan los gases residuales. Al entrar en la etapa principal de sinterización en fase líquida, la temperatura supera rápidamente el punto de fusión de la fase aglutinante, y el níquel-hierro, el níquel-cobre o el cobre se transforman inmediatamente en una fase líquida de baja viscosidad. Esta fase líquida llena rápidamente los espacios entre las partículas de tungsteno mediante capilaridad, impulsando la reorganización de las partículas y aumentando significativamente la densidad. En este punto, la temperatura debe estabilizarse con precisión dentro del rango óptimo de la fase líquida: una temperatura demasiado baja resulta en una fase líquida insuficiente, una reorganización inadecuada de las partículas y numerosos poros residuales; una temperatura demasiado alta conduce a una pérdida excesiva de fase líquida o a un crecimiento anormal de las partículas de tungsteno, causando la aglomeración de la fase aglutinante, una menor densidad o incluso el colapso y la deformación de la pieza.

El tiempo de mantenimiento es igualmente crucial. Un tiempo demasiado corto resulta en una disolución y reprecipitación insuficientes de las partículas de tungsteno, una esfericidad de grano deficiente y una unión interfacial débil; un tiempo demasiado largo conduce a un crecimiento excesivo de las partículas de tungsteno, una menor tenacidad y una posible filtración de fase líquida por la base del lingote, causando segregación composicional. Las líneas de producción de alta gama utilizan sistemas de mantenimiento multietapa y fibra óptica para la medición dinámica de la temperatura, con el fin de monitorizar la temperatura de cada zona del horno en tiempo real, asegurando que cientos de miles de lingotes alcancen historiales térmicos prácticamente idénticos dentro del mismo ciclo de horno. La etapa de enfriamiento emplea un enfriamiento controlado programado, inicialmente rápido y luego lento, para evitar microfisuras inducidas por tensión térmica, controlando simultáneamente el comportamiento de precipitación de la fase aglutinante para optimizar las propiedades mecánicas finales. El ciclo completo de sinterización suele durar decenas de horas, pero determina si las esferas pueden alcanzar sus límites de rendimiento teóricos.

#### 4.3.2 Ventajas de la sinterización al vacío de bolas de aleación de tungsteno

Las esferas de aleación de tungsteno actuales, en comparación con la sinterización tradicional con hidrógeno, presentan ventajas abrumadoras en cuanto a pureza, densidad, consistencia de rendimiento y compatibilidad con componentes especiales, y se han convertido en la configuración estándar para esferas de precisión, médicas y de alta temperatura.

El vacío elimina por completo los problemas de circulación de vapor de agua y reducción incompleta que puede causar el hidrógeno. La presión parcial de oxígeno dentro del horno se reduce a un nivel

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extremadamente bajo, y la última capa de película de óxido adsorbida en la superficie de las partículas de tungsteno y la fase aglutinante se descompone y volatiliza a alta temperatura, lo que garantiza una verdadera unión metálica en la interfase y evita inclusiones de óxido frágiles que comprometen la resistencia. El vacío también suprime la pérdida por volatilización de la fase aglutinante a alta temperatura, lo cual es especialmente importante para los sistemas a base de cobre y plata, mejorando notablemente la precisión del control de la composición y eliminando prácticamente las fluctuaciones de densidad y rendimiento entre lotes.

En condiciones de vacío, el gas residual en los poros cerrados del interior del lingote se difunde y escapa gradualmente a medida que aumenta la temperatura, y finalmente se elimina mediante la bomba de vacío. Esto reduce significativamente la porosidad residual de las esferas sinterizadas, facilitando que la densidad se aproxime al valor teórico. Los hornos de sinterización al vacío suelen estar equipados con control de temperatura independiente multizona y bombas de difusión de alta velocidad. La uniformidad de la temperatura y las velocidades de calentamiento/enfriamiento del horno superan con creces las de los hornos de alambre de hidrógeno-molibdeno, lo que permite procesos térmicos precisos incluso con grandes volúmenes de carga. Son especialmente adecuados para la producción de esferas de gran diámetro y alto valor añadido. Para esferas que contienen elementos de tierras raras, boro, gadolinio o renio y molibdeno, la sinterización al vacío es la única opción. Esto se debe a que el hidrógeno puede reaccionar negativamente con estos elementos activos, mientras que el vacío proporciona una inercia total, lo que garantiza que la función prevista de los aditivos se conserve por completo. El ambiente de vacío durante la etapa de enfriamiento también evita la reoxidación superficial, lo que da como resultado esferas con un brillo metálico limpio inmediatamente después de salir del horno, lo que permite que pasen directamente al proceso de molienda sin necesidad de un lavado ácido adicional. Si bien los costos de inversión y operación de los equipos de sinterización al vacío son superiores a los de la sinterización con hidrógeno, la pureza de la interfaz, la extrema densidad, la ultra alta consistencia y la versatilidad del proceso que ofrece lo convierten en una garantía de proceso insustituible para esferas de colimadores médicos, esferas de volantes aeroespaciales, esferas de blindaje nuclear y todos los campos que requieren una tolerancia cero en el rendimiento.

#### 4.4 Procesamiento posterior de bolas de aleación de tungsteno

El procesamiento posterior constituye la etapa final en la transformación de esferas de aleación de tungsteno, desde piezas sinterizadas densas hasta productos funcionales de alta precisión y excelente acabado superficial. Este proceso no solo determina la precisión geométrica y el acabado superficial, sino que también influye directamente en la vida útil a la fatiga, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la adaptabilidad a entornos especiales. El rectificado y el pulido, junto con el tratamiento anticorrosivo superficial, son los dos procesos más cruciales, a los que deben someterse prácticamente todas las esferas de alta gama.

##### 4.4.1 Rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno

La única manera de lograr niveles de precisión, o incluso de ultraprecisión, en esferas de aleación de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



tungsteno, y también un proceso esencial para obtener una superficie con las condiciones adecuadas para esferas comunes. Las esferas sinterizadas en bruto presentan superficies rugosas, un tamaño excesivo y una fina capa de óxido. Deben aproximarse gradualmente a la forma esférica ideal mediante un proceso de eliminación de material compuesto mecánico-químico en varias etapas.

Para procesar desde miles hasta cientos de miles de bolas en un fluido de molienda a base de agua, se elimina rápidamente la capa sinterizada y el exceso de tamaño, a la vez que se les da forma inicial. En la etapa de molienda intermedia, se utilizan abrasivos más finos de carburo de silicio o alúmina, y el equipo cambia a rectificado sin centros de alta precisión o rectificado de doble disco. Las bolas comienzan a presentar una superficie mate uniforme, y las tolerancias de esfericidad y diámetro se reducen significativamente.

Posteriormente, se realiza un pulido fino en un taller limpio con temperatura controlada, utilizando micropulver de diamante o una suspensión de óxido de cerio de tamaño nanométrico sobre discos de pulido de poliuretano o equipos de pulido magnetorreológico. El pulido magnetorreológico es especialmente adecuado para esferas de colimadores médicos de ultraprecisión y esferas de volantes aeroespaciales, ya que su fluido magnetorreológico flexible se adapta instantáneamente a la curvatura de la esfera, logrando un acabado tipo espejo sin rayaduras ni daños subsuperficiales. El proceso completo de pulido se divide generalmente en ocho a quince etapas, con una reducción estricta de la cantidad de material en cada una, llegando incluso a nivel nanométrico en la etapa final. Entre cada etapa, las esferas se someten a limpieza ultrasónica y clasificación óptica automática para eliminar cualquier producto defectuoso con rayaduras, picaduras o elipticidad. La fábrica líder ha logrado la automatización completa del proceso: la carga y descarga robótica automática, la medición láser en línea, el reconocimiento visual de defectos mediante IA y el control de retroalimentación de bucle cerrado permiten que la consistencia de los lotes alcance niveles sin precedentes. Las esferas pulidas tienen una superficie especular, un tacto suave y sedoso, y una reflectividad extremadamente alta. Esto no solo cumple con los requisitos de precisión geométrica, sino que también mejora varias veces la resistencia a la fatiga por contacto y la vida útil al eliminar las microfisuras superficiales y las capas de tensión residual.

#### 4.4.2 Tratamiento anticorrosivo superficial de esferas de aleación de tungsteno

Aunque las aleaciones de tungsteno poseen una buena resistencia a la corrosión atmosférica, en condiciones extremas como ambientes marinos, medios ácidos y alcalinos, almacenamiento prolongado en ambientes húmedos o desinfección médica, se requiere un tratamiento adicional de resistencia a la corrosión superficial para garantizar que las esferas mantengan su apariencia y rendimiento durante todo su ciclo de vida.

Los métodos más comunes son la pasivación química y la pasivación electroquímica. Al sumergir brevemente la esfera en un sistema de ácido nítrico-ácido fluorhídrico especialmente formulado o en una solución de pasivación específica, se forma una película protectora de óxido extremadamente fina y densa en su superficie, lo que mejora significativamente su resistencia a la corrosión por picaduras y grietas. La película presenta un color gris oscuro o negro azulado uniforme, lo que la hace estéticamente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

agradable y práctica. La pasivación electroquímica, bajo un potencial controlado, engrosa y densifica aún más esta película, mejorando así su resistencia a la corrosión.

En las esferas colimadoras y en aquellas utilizadas en equipos de aguas profundas con requisitos más exigentes, se suele emplear la deposición física de vapor (PVD) para recubrirlas con oro, titanio o cromo. El espesor del recubrimiento es de apenas unos micrómetros, pero aísla completamente las esferas de los medios corrosivos externos, a la vez que reduce la emisión secundaria de electrones y la dispersión de fotones. Las esferas recubiertas de oro son especialmente comunes en aceleradores médicos, ya que pueden soportar esterilizaciones repetidas con vapor a alta temperatura manteniendo la estabilidad de los cálculos del flujo de rayos X.

El recubrimiento DLC (carbono tipo diamante) depositado al vacío es una opción de alta gama que ha surgido recientemente. Su extrema dureza e inercia química hacen que las esferas sean prácticamente inmunes a la corrosión en agua de mar, ácidos y álcalis fuertes, o ambientes de alta temperatura y humedad, a la vez que reduce significativamente el coeficiente de fricción, lo que lo hace especialmente adecuado para bolas utilizadas en rodamientos de alta temperatura y bombas químicas. Se requiere limpieza iónica y deposición de una capa de transición antes del recubrimiento para garantizar una adhesión suficiente que permita soportar el rodamiento y el impacto a largo plazo. Tras un tratamiento anticorrosivo superficial, las esferas se someten a múltiples limpiezas ultrasónicas, secado al vacío y envasado con nitrógeno para eliminar cualquier resto de agentes corrosivos. Tras años de ensayos en cámaras de niebla salina o entornos marinos reales, las esferas tratadas conservan su superficie impecable, eliminando por completo la última debilidad de las esferas de aleación de tungsteno en entornos extremadamente corrosivos, lo que las convierte en materiales funcionales realmente fiables para todas las condiciones de funcionamiento y durante toda su vida útil.

#### 4.5 Puntos clave de control de calidad para bolas de aleación de tungsteno

de tungsteno, desde la materia prima hasta el producto final, implica numerosos pasos. Sin embargo, solo tres factores determinan realmente la tasa de aprobación de lotes, la consistencia del rendimiento y la confianza del cliente: el control de la pureza de la materia prima, el control de la uniformidad de la densidad de moldeo y las pruebas de estabilidad del rendimiento posteriores a la sinterización. Estos tres puntos de control están interconectados y se refuerzan mutuamente; ninguno puede omitirse y se han convertido en las tres debilidades críticas reconocidas por la industria.

##### 4.5.1 Control de la pureza de las materias primas para bolas de aleación de tungsteno

La pureza de las materias primas es el factor decisivo en el rendimiento máximo de las bolas de aleación de tungsteno. Una sola impureza dañina puede convertirse en un defecto fatal en el producto final. Por lo tanto, todas las empresas líderes consideran la aceptación de la materia prima como el primer límite infranqueable.

Al llegar a la fábrica, el polvo de tungsteno se somete a un muestreo por lotes y a un análisis

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

multielemental de alta precisión mediante espectrometría de masas con descarga luminiscente, espectroscopia ICP y un analizador de carbono, azufre, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno. Cualquier lote que supere los niveles aceptables se devuelve inmediatamente. El control del contenido de oxígeno es especialmente estricto, ya que este forma inclusiones de óxido frágiles durante la sinterización, lo que debilita considerablemente la resistencia interfacial. Los polvos aglutinantes de níquel, hierro y cobre también requieren informes de análisis de terceros y están sujetos a verificación mediante muestreo aleatorio. Los aditivos funcionales traza se añaden en forma de polvo prealeado para evitar la sobreconcentración o la subconcentración localizadas debidas al pesaje directo.

El tamaño y la morfología de las partículas de polvo se evalúan mediante una combinación de analizador de tamaño de partículas láser y microscopio electrónico de barrido. La distribución del tamaño de partícula debe estar dentro del rango especificado del proceso, y la morfología debe ser poliédrica o casi esférica, eliminando las partículas alargadas o escamosas. Todos los datos de las pruebas se cargan al sistema MES en tiempo real y se vinculan permanentemente al número de lote, lo que permite la trazabilidad completa del ciclo de vida. Solo las materias primas que superan todos los indicadores en el primer intento pueden ingresar al proceso de mezcla; de lo contrario, se aíslan directamente. Este control de "tolerancia cero" sobre la pureza de la materia prima garantiza que incluso los mejores procesos posteriores no resulten inútiles debido a deficiencias inherentes.

#### **4.5.2 Control de la uniformidad de la densidad de formación de las bolas de aleación de tungsteno**

La uniformidad de la densidad resultante determina directamente si se producirán segregación, deformación o fisuras internas en las esferas sinterizadas, y es fundamental para la calidad del cuerpo en verde. Las empresas emplean métodos multidimensionales para controlar las fluctuaciones de densidad dentro de un rango extremadamente estrecho.

Durante el prensado en frío, un sensor de presión de alta precisión monitoriza en tiempo real la curva de fuerza de prensado de cada molde. Las fluctuaciones anormales activan una alarma inmediata y retiran automáticamente la pieza correspondiente. Para el prensado isostático, se introduce un bloque de medición de densidad en una funda de goma. Tras el prensado en el mismo horno, se desmonta el bloque y se verifica que no haya puntos ciegos en la transmisión de presión. Una vez retiradas las piezas del molde, se inspeccionan individualmente mediante el método de desplazamiento de Arquímedes de alta precisión o mediante imágenes de densidad por rayos X. Aquellas con desviaciones de densidad que superen la tolerancia se devuelven directamente al horno para un nuevo prensado.

Para eliminar aún más las pequeñas irregularidades durante el proceso de prensado, algunas líneas de producción de alta gama incorporan finos hilos de termopar en la pieza en bruto, monitorizando en tiempo real las diferencias en las velocidades de calentamiento en diversos puntos durante la etapa de presinterización para determinar indirectamente la uniformidad de la densidad. Cualquier pieza en bruto anómala se marca y se trata individualmente. Este enfoque de control integral, que abarca la fuerza de prensado, la presión del fluido y la respuesta térmica indirecta, logra una uniformidad de densidad sin precedentes en la pieza en bruto conformada, sentando una base sólida para una contracción estable

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

durante la etapa de sinterización y un rendimiento final consistente.

#### 4.5.3 Ensayo de estabilidad del rendimiento post-sinterización de esferas de aleación de tungsteno

Las pruebas de estabilidad de rendimiento posteriores a la sinterización constituyen el último control antes de que las bolas de aleación de tungsteno salgan de fábrica. Su objetivo es garantizar que cada lote de bolas cumpla íntegramente con el acuerdo técnico en cuanto a densidad, dureza, magnetismo, tamaño y defectos internos, eliminando así cualquier riesgo potencial de fallo.

Las pruebas de densidad emplean un método de doble seguridad que combina el método de desplazamiento de Arquímedes con un densímetro ultrasónico; cualquier esfera con una densidad inferior al límite inferior se descarta inmediatamente. Las pruebas de dureza incluyen el muestreo por lotes para las pruebas Rockwell o Vickers, complementado con un sistema automatizado de imagen de dureza para el escaneo de toda la superficie; cualquier punto blando localizada conlleva una reinspección inmediata del lote. Las pruebas magnéticas son especialmente importantes para las esferas no magnéticas, y se utiliza un magnetómetro fluxgate de alta precisión para escanear cada una; las esferas que superan el estándar se clasifican automáticamente. El tamaño y la morfología se determinan mediante una máquina de medición de coordenadas combinada con un medidor de redondez óptica; las esferas de precisión requieren una inspección completa, mientras que las esferas de calidad ordinaria se someten a una inspección por muestreo de alto porcentaje.

La detección de defectos internos es de vital importancia. Todas las esferas de grado médico, aeroespacial y con blindaje nuclear deben someterse a ensayos no destructivos mediante tomografía computarizada industrial o rayos X de alta energía. Cualquier orificio, grieta o inclusión de dimensiones superiores a las permitidas conlleva el aislamiento de todo el lote. Las esferas de grado ordinario se inspeccionan mediante una combinación de ensayos de corrientes inducidas y resonancia ultrasónica, logrando una inspección eficiente a gran escala. Todos los datos de las pruebas se cargan a la nube en tiempo real, formando una cadena de trazabilidad completa y cerrada con los lotes de materia prima, los registros de prensado y los lotes del horno de sinterización.

Solo las esferas que superen todas las pruebas anteriores se envasarán al vacío, se etiquetarán con un certificado de conformidad y un código QR único, y entrarán oficialmente en el almacén de producto terminado. Este riguroso sistema de pruebas de estabilidad del rendimiento posterior a la sinterización garantiza que cada esfera de aleación de tungsteno que reciben los clientes pueda soportar las condiciones de trabajo reales más exigentes y las inspecciones de materiales de entrada más rigurosas, lo que contribuye a forjar una reputación sólida y a largo plazo, así como la confianza del mercado para las marcas líderes del sector.

#### 4.6 Inspección de calidad de las bolas de aleación de tungsteno

Se realiza un control de calidad durante todo el proceso de producción de las bolas de aleación de tungsteno, pero la inspección del producto final constituye la verificación definitiva de la estabilidad del

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



proceso y la fiabilidad del producto. Basándose en un sistema de indicadores objetivos y cuantificables, se utilizan métodos físicos, químicos, no destructivos y destructivos para garantizar que cada lote de bolas que sale de fábrica cumpla o supere los requisitos del acuerdo técnico.

#### 4.6.1 Ensayo de densidad de esferas de aleación de tungsteno

El indicador de rendimiento más crucial e intuitivo de las esferas de aleación de tungsteno es la densidad, y también el parámetro en el que los clientes se centran primero durante las pruebas de aceptación. Las pruebas deben realizarse en todo el lote, con todas las muestras analizadas y sin discrepancias, para evitar por completo que esferas de baja densidad se mezclen en aplicaciones de alta gama.

El método convencional se basa en el principio de Arquímedes. La esfera se seca y se pesa en una balanza analítica de alta precisión, y luego se sumerge en agua pura o etanol anhidro para medir su flotabilidad. El sistema calcula y elimina automáticamente los valores atípicos. Para eliminar los errores de medición causados por poros superficiales o defectos de apertura, las esferas de alta precisión también requieren impregnación al vacío con parafina o aleaciones de bajo punto de fusión para su sellado. Las fábricas líderes han implementado estaciones automatizadas de prueba de densidad en la línea de montaje. Un brazo robótico introduce secuencialmente las esferas en un baño de agua a temperatura constante, y las lecturas de la balanza se cargan en tiempo real. Las esferas que exceden los límites superior e inferior se clasifican neumáticamente en un contenedor de residuos, y todo el proceso se realiza de forma automática.

Como complemento, se utilizan densitómetros ultrasónicos y análisis de densidad estereoscópico mediante tomografía computarizada (TC) industrial para esferas de alta gama de grado médico y aeroespacial. El primero infiere la densidad a partir de la velocidad del sonido y la atenuación, mientras que el segundo reconstruye directamente la distribución interna de poros en tres dimensiones y calcula la densidad real. La combinación de estos tres métodos conforma un sistema de ensayo de densidad piramidal: el método de desplazamiento de agua abarca todas las muestras, el ensayo ultrasónico proporciona un muestreo rápido y la TC se utiliza para la resolución de discrepancias y la mejora de procesos. Es este sistema de ensayo de densidad multicapa y de tolerancia cero el que garantiza que las esferas de aleación de tungsteno ofrezcan de forma consistente el rendimiento de calidad más fiable y predecible en aplicaciones de contrapeso, blindaje e inercia.

#### 4.6.2 Inspección de la precisión dimensional de las bolas de aleación de tungsteno

La precisión dimensional y la morfología determinan directamente si las bolas de aleación de tungsteno pueden ensamblarse correctamente y cumplir su función prevista, sobre todo porque los colimadores médicos y los rodamientos de precisión tienen una tolerancia prácticamente nula a los errores geométricos. Los métodos de inspección han evolucionado desde los micrómetros tradicionales hasta las mediciones compuestas ópticas y de contacto totalmente automatizadas.

Las esferas de grado estándar se clasifican mediante una máquina automática de clasificación de rodillos de alto rendimiento. Las esferas ruedan a lo largo de una ranura en V de precisión, y sensores láser o

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inductivos capturan las desviaciones de diámetro y redondez en tiempo real. Las esferas que cumplen con los requisitos se colocan automáticamente en diferentes contenedores según su tamaño, lo que resulta en una eficiencia extremadamente alta. Las esferas de grado de precisión y de mayor calidad ingresan a una sala blanca con temperatura controlada, donde una máquina de medición de coordenadas de alta precisión o un medidor de redondez específico escanea cada esfera en su totalidad. El cabezal de medición se desplaza a lo largo de múltiples generatrices y una trayectoria de círculo máximo sobre la superficie de la esfera con una presión mínima, recopilando cientos de miles de puntos de datos de nube de puntos. Posteriormente, el software ajusta estos datos en tiempo real para determinar la esfericidad, la redondez y la ondulación de la superficie reales.

Las esferas colimadoras médicas más avanzadas emplean una técnica combinada de interferometría de luz blanca e inspección por microtomografía computarizada de rayos X (micro-CT). La primera captura la micromorfología superficial, mientras que la segunda revela el espesor de la capa dañada por el procesamiento subsuperficial, lo que garantiza que la esfera no presente fugas de dosis debido a mínimas desviaciones geométricas en el canal del haz de rayos X. Todos los equipos de medición se someten a trazabilidad periódica según los estándares nacionales, y los informes de ensayo incluyen códigos QR con cada lote, lo que permite un fácil acceso a la nube de puntos original y a las curvas ajustadas. Este completo sistema de inspección dimensional, desde la clasificación rápida de grandes lotes hasta la trazabilidad de alta precisión de esferas individuales, garantiza plenamente la intercambiabilidad y la fiabilidad de las esferas de aleación de tungsteno en los entornos de montaje más exigentes.

#### 4.6.3 Ensayo de resistencia de bolas de aleación de tungsteno

Las pruebas de resistencia no pueden inspeccionarse completamente debido a su naturaleza destructiva, pero mediante el muestreo científico y técnicas de correlación no destructivas, podemos controlar eficazmente las propiedades mecánicas generales del lote, asegurando que las esferas recibidas por los clientes tengan suficiente resistencia a la presión, el impacto y la fatiga.

El muestreo rutinario utiliza durómetros Rockwell o Vickers automatizados. El indentador deja una marca nítida en el ecuador de la esfera, y el sistema lee y calcula automáticamente el valor de dureza. Cualquier valor de dureza anormalmente bajo o alto activa inmediatamente una reinspección completa del lote. Las pruebas de resistencia a la compresión se realizan en una prensa servo dedicada. La esfera se coloca entre dos placas de carburo cementado y se carga gradualmente hasta su fractura, registrándose la carga máxima y el modo de fractura. Las pruebas de tenacidad al impacto utilizan un pequeño martillo de caída para registrar si la esfera desarrolla grietas o fragmentos al caer desde una altura específica.

Para reducir la proporción de ensayos destructivos, la industria ha adoptado ampliamente los métodos de resonancia ultrasónica y de corrientes de Foucault para establecer una base de datos correlativa de dureza, resistencia y defectos internos. Los nuevos lotes de esferas de aleación de tungsteno requieren solo ensayos destructivos mínimos para estimar su nivel de resistencia general mediante métodos no destructivos. Las esferas de grado médico y de alta gama para aplicaciones inerciales también requieren ensayos de fatiga por laminación, realizados en una máquina de fatiga por contacto rodante que simula

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

las condiciones reales de trabajo durante millones de revoluciones para verificar la ausencia de picaduras o desprendimientos. Todos los datos de resistencia se corresponden directamente con los lotes de materia prima, los ciclos del horno de sinterización y los lotes de molienda, formando una relación completa entre proceso y rendimiento. Si se detecta una baja resistencia, se puede identificar rápidamente el proceso específico para realizar mejoras concretas. Este sistema tridimensional de ensayo de resistencia —que combina ensayos destructivos por muestreo, correlación no destructiva y verificación de fatiga— maximiza el rendimiento y proporciona la garantía mecánica más sólida para el funcionamiento seguro de las esferas de aleación de tungsteno en escenarios de alta carga, alta velocidad y larga vida útil.

#### 4.6.4 Ensayo de dureza de bolas de aleación de tungsteno

La dureza es el indicador más directo de la resistencia al desgaste, la resistencia a la deformación y el nivel mecánico general de las bolas de aleación de tungsteno. El método de ensayo ha evolucionado desde la indentación manual tradicional hasta un sistema de precisión que combina la automatización completa del proceso con ensayos no destructivos.

Para esferas estándar y de contrapeso, se utiliza un durómetro Rockwell automatizado de alto rendimiento. Un brazo robótico introduce cada esfera en un dispositivo de posicionamiento, y el indentador aplica una carga fija para crear una indentación estándar en el plano ecuatorial. Una cámara identifica automáticamente el diámetro de la indentación y calcula el valor de dureza en tiempo real. El proceso completo puede procesar docenas de esferas por minuto. Para esferas de precisión y de grado médico, se utiliza un durómetro Vickers micrométrico, que aplica una carga menor y crea una indentación más pequeña, evitando daños visibles en la superficie de la esfera. Simultáneamente, se utiliza un sistema de medición de imágenes para lograr una precisión submicrónica.

Para eliminar por completo el impacto de la indentación en esferas de alta gama, las empresas líderes han adoptado ampliamente los métodos de impedancia de contacto ultrasónico y los durómetros acústicos inducidos por láser. Estos dispositivos no destructivos utilizan las características de reflexión de las ondas sonoras de alta frecuencia en la superficie de la esfera para inferir la distribución de la dureza, lo que permite una inspección del 100 % y genera un mapa de dureza de toda la esfera, detectando cualquier punto blando o gradiente de dureza anómalo. Todos los datos de dureza se cargan en el sistema de gestión de calidad en tiempo real y se vinculan automáticamente con los lotes de rectificado y los registros de tratamiento térmico. Cualquier desviación sistemática activa de inmediato ajustes en el proceso de control. Esta evolución en las pruebas de dureza, desde el muestreo destructivo hasta la inspección completa no destructiva, garantiza que las esferas de aleación de tungsteno alcancen la dureza más fiable y uniforme, incluso en aplicaciones con requisitos de integridad superficial extremadamente altos, como rodamientos, cribas vibratorias y colimadores médicos.

#### 4.6.5 Ensayos de rendimiento de blindaje de esferas de aleación de tungsteno

Las pruebas de rendimiento de blindaje constituyen un indicador único y definitivo para las esferas de aleación de tungsteno de grado médico y nuclear, directamente relacionado con la seguridad del paciente

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y el cumplimiento de las normas del equipo. Las pruebas se dividen en dos categorías principales: rendimiento de atenuación de rayos gamma y rendimiento de blindaje de neutrones, ambas realizadas en un laboratorio profesional de metrología de radiación.

El blindaje contra rayos gamma se logra generalmente mediante un método de haz estrecho y geometría precisa: se coloca una fuente puntual estándar de cobalto-60 o cesio-137 detrás del colimador, y una esfera de aleación de tungsteno se fija en un soporte especializado dentro de una cámara de plomo, según la configuración del colimador. Un detector de germanio de alta pureza se coloca detrás de la esfera para recibir los rayos transmitidos. El sistema registra automáticamente la tasa de conteo con y sin la esfera, calcula el coeficiente de atenuación lineal y el espesor de la capa hemirreductora, y compara estos valores con los cálculos teóricos. Las esferas colimadoras médicas también requieren verificación mediante imágenes reales. La esfera se instala en un módulo colimador real, y se obtienen imágenes del objetivo de resolución y la distribución de dosis bajo un acelerador lineal médico para garantizar que la nitidez del enfoque y la dosis de fuga cumplan con las normas IEC y nacionales.

Las pruebas de rendimiento del blindaje neutrónico se realizan en esferas dopadas con boro, dopadas con gadolinio y otras modificadas. Se utiliza un generador de neutrones o una fuente de neutrones de americio-berilio, junto con un contador proporcional de  $\text{BF}_3$  o un detector de helio-3, para medir la disminución de los flujos de neutrones rápidos y térmicos. Las esferas se introducen en un contenedor blindado estándar y el sistema registra las curvas de disminución de la tasa de flujo neutrónico a diferentes espesores para verificar si se ha alcanzado la eficiencia de blindaje prevista. Todas las pruebas se realizan en un laboratorio subterráneo con blindaje de alta calidad y un fondo extremadamente bajo, y la potencia de la fuente y del detector se calibran periódicamente para garantizar la trazabilidad de los resultados a los patrones nacionales.

Tras las pruebas, cada lote de esferas se acompaña de un informe de rendimiento de blindaje emitido por un tercero y acreditado por CNAS, e incluye un código QR para acceder al espectro original y al proceso de cálculo. Este riguroso sistema de pruebas de rendimiento de blindaje proporciona el respaldo científico más autorizado y fiable para la aplicación segura de esferas de aleación de tungsteno en radioterapia tumoral, detección de defectos industriales y contenedores de isótopos.

#### 4.7 Sistema estándar para bolas de aleación de tungsteno

Las bolas de aleación de tungsteno conforman una estructura piramidal con estándares internacionales como marco, estándares nacionales/industriales como cuerpo principal y estándares empresariales como complemento. Cubre toda la cadena de valor, incluyendo composición, rendimiento, métodos de ensayo, embalaje, transporte y requisitos de protección ambiental, garantizando la coherencia y la trazabilidad en el comercio y las aplicaciones globales.

A nivel internacional, la norma ASTM B777, «Especificación estándar para aleaciones de tungsteno de alta densidad», es la norma técnica más autorizada y universalmente aceptada. Esta clasifica las bolas de aleación de tungsteno en varios grados según su densidad, propiedades magnéticas y principales

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



aplicaciones, y se considera un anexo técnico a los contratos de casi todos los clientes europeos y americanos. Las normas ISO 9001 e ISO 13485 regulan, respectivamente, los sistemas de gestión de la calidad de la producción de bolas utilizadas en dispositivos industriales y médicos.

El sistema de normas de China es el más completo y el que se actualiza con mayor rapidez. La serie GB/T 34560 detalla el rango de composición, las propiedades mecánicas, las tolerancias dimensionales y los métodos de ensayo para esferas de aleación de tungsteno; la norma YY/T 1636, «Requisitos técnicos para colimadores de aleación de tungsteno para uso médico», se centra específicamente en el sector médico; y la norma HG/T 2077, «Condiciones técnicas para fregaderos de pesca de aleación de tungsteno», abarca la mayor cantidad de productos civiles. En cuanto a las normas ambientales y de seguridad, la norma GB/T 33357 (Migración de metales pesados en aleaciones de tungsteno), la directiva RoHS 2.0 y la lista REACH de sustancias extremadamente preocupantes (SVHC) regulan conjuntamente las sustancias tóxicas y peligrosas, garantizando la absoluta seguridad de las esferas en productos de consumo y entornos médicos.

Las empresas líderes suelen desarrollar estándares corporativos más estrictos basados en las normas nacionales y de la ASTM, como límites inferiores de densidad más elevados, una mayor proporción de ensayos no destructivos y una verificación más rigurosa del rendimiento del blindaje, que posteriormente se incluyen como anexos obligatorios en los acuerdos técnicos de suministro. Estos estándares corporativos impulsan con frecuencia la revisión y actualización de las normas nacionales y sectoriales.

Las normas de embalaje y transporte adoptan de forma uniforme los requisitos de exención para el transporte de mercancías peligrosas de GB/T 3873 y UN38.3. Las esferas se embalan en diferentes grados, como viales al vacío, cajas llenas de nitrógeno o bolsas selladas con desecante, y se etiquetan con la certificación de la ONU para garantizar la máxima seguridad durante el transporte marítimo y aéreo de larga distancia.

La mejora continua y la estricta aplicación de todo el sistema de estandarización garantizan que las bolas de aleación de tungsteno sigan una trayectoria estandarizada, controlable, verificable y fiable, desde las materias primas hasta los productos terminados, y desde los laboratorios hasta la cabecera del paciente. Esto ha sentado las bases institucionales más sólidas para que las bolas de aleación de tungsteno chinas gocen de reconocimiento y una alta confianza en el mercado global.

#### 4.7.1 Norma Nacional China (GB/T) para Bolas de Aleación de Tungsteno

China es el mayor productor y consumidor mundial de bolas de aleación de tungsteno y, en consecuencia, ha establecido el sistema de normas nacionales más completo y detallado del mundo, que abarca básicamente desde aplicaciones industriales generales hasta aplicaciones civiles especiales.

La norma GB/T 34560, «Aleaciones de tungsteno de alta densidad», es la base y el estándar fundamental, dividido en varias partes que especifican la composición química, el grado de densidad, las propiedades mecánicas, las tolerancias dimensionales, la calidad superficial, los métodos de ensayo y las reglas de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aceptación. Esta norma clasifica las esferas de aleación de tungsteno en múltiples grados según su densidad y magnetismo, abarcando los sistemas W-Ni-Fe y W-Ni-Cu más comunes, además de incluir aleaciones de W-Cu y aleaciones funcionales modificadas. Las normas GB/T 33357, «Determinación de la migración de metales pesados en productos de aleación de tungsteno», y GB/T 33358, «Requisitos técnicos de protección ambiental para productos de aleación de tungsteno», bloquean completamente las vías de migración de elementos nocivos como el plomo, el cadmio y el mercurio, garantizando así la seguridad de los productos de consumo.

En el sector civil, la norma más representativa es la HG/T 2077 «Condiciones técnicas para plomos de pesca de aleación de tungsteno», que especifica los requisitos de apariencia, densidad, dureza, resistencia a la corrosión y embalaje. Se ha convertido en la norma obligatoria para todos los plomos de pesca exportados a Europa y América. En el ámbito médico, existen las normas YY/T 1636 «Requisitos técnicos para colimadores médicos de aleación de tungsteno» y YY/T 1793 «Condiciones técnicas para componentes de blindaje médicos de aleación de tungsteno», que imponen requisitos extremadamente exigentes en cuanto a propiedades no magnéticas, atenuación de la radiación, biocompatibilidad y esterilizabilidad. Las características más significativas de las normas nacionales chinas son su rápida actualización, su exhaustividad y su estricta aplicabilidad; las revisiones se publican casi anualmente para garantizar que se mantengan al día con los últimos avances tecnológicos y la normativa medioambiental.

#### 4.7.2 Normas industriales internacionales para bolas de aleación de tungsteno

ASTM B777, "Especificación estándar para aleaciones de alta densidad a base de tungsteno", es actualmente la norma industrial internacional más citada y autorizada para esferas de aleación de tungsteno en todo el mundo, y es considerada la base técnica por defecto por los clientes en Europa, América, el sudeste asiático y Oriente Medio.

La norma clasifica las aleaciones de tungsteno en cuatro grados de densidad, de la Clase 1 a la 4, que corresponden a diferentes proporciones de níquel-hierro y níquel-cobre. También especifica la densidad mínima, la resistencia a la tracción, el alargamiento, la dureza y el límite superior de las propiedades magnéticas para cada clase. El apéndice proporciona métodos de ensayo recomendados y planes de muestreo de aceptación. La norma ASTM F3055, «Especificación técnica para la fabricación aditiva de aleaciones de tungsteno de alta densidad», es una incorporación reciente que proporciona un marco para la futura impresión 3D de esferas de aleación de tungsteno.

Las normas ISO 9001 e IATF 16949, como estándares de sistemas de gestión de la calidad, son obligatorias para todos los principales fabricantes de esferas de aleación de tungsteno; la ISO 13485 se utiliza específicamente para la producción de esferas de grado médico. La norma AMS 7725E, «Aleaciones de tungsteno de alta densidad», si bien originalmente era una especificación de materiales aeroespaciales, también es utilizada como referencia por muchos clientes industriales de alta gama debido a sus estrictos requisitos de consistencia en el rendimiento. Estas normas industriales internacionales, caracterizadas por su simplicidad, universalidad y facilidad de arbitraje, se han convertido en el lenguaje técnico más utilizado en la cadena de suministro global.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

#### 4.7.3 Patrones de fragmentos de aleación de tungsteno en Europa, América, Japón y Corea del Sur

Dado que las esferas de aleación de tungsteno no tienen una aplicación civil específica para la producción de fragmentos, países desarrollados como Estados Unidos, Europa, Japón y Corea del Sur no han desarrollado normas específicas para este fin. Todos los requisitos técnicos relativos a los fragmentos preformados de aleación de tungsteno se encuentran en sus respectivas especificaciones militares nacionales o en normas internas de las empresas, y son altamente confidenciales, no se divulgan al público ni están incluidos en el sistema de normas civiles.

La información disponible públicamente solo incluye algunas normativas ambientales y de seguridad, como el artículo 63 del anexo XVII del Reglamento REACH de la UE, que exige la sustitución del plomo y promueve indirectamente el uso de aleaciones de tungsteno en aplicaciones civiles de alta densidad. La guía de la EPA de EE. UU. sobre materiales alternativos para fregaderos de pesca de plomo fomenta explícitamente el uso de aleaciones de tungsteno. Si bien la norma japonesa JIS Z 2248 «Materiales metálicos: métodos de ensayo de impacto» puede utilizarse para evaluar la tenacidad de las aleaciones de tungsteno, no aborda específicamente el comportamiento ante la fragmentación. El mercado civil se basa exclusivamente en indicadores de densidad, dureza, resistencia a la corrosión y protección ambiental, y en las normas disponibles públicamente se evitan deliberadamente las descripciones relacionadas con la fragmentación.

#### 4.7.4 Normas específicas del sector para bolas de aleación de tungsteno

Además de las normas nacionales e internacionales, las industrias de aplicación clave también han desarrollado normas especializadas más detalladas y rigurosas, que constituyen un poderoso complemento a las normas nacionales y a las normas ASTM.

En la industria médica: la FDA de EE. UU. 21 CFR Parte 820 "Sistema de gestión de calidad de dispositivos médicos" y el MDR (UE) 2017/745 Anexo I imponen requisitos adicionales sobre la biocompatibilidad, la esterilidad y el rendimiento de radiación de los colimadores y componentes de blindaje de aleación de tungsteno; las "Directrices de revisión técnica para el registro de dispositivos médicos personalizados" de la CFDA de China enumeran las bolas de aleación de tungsteno como materia prima clave.

La industria de plomos de pesca ecológicos se caracteriza por el Programa de Certificación de Plomos de Pesca No Tóxicos del Servicio de Pesca y Vida Silvestre de EE. UU. (USFWS), las Directrices Técnicas de Plomos de Pesca Sin Plomo de Environment Canada y la Certificación Ambiental de Plomos de Pesca de Aleación de Tungsteno de la Unión Europea ECHA, que en conjunto constituyen los estándares ambientales civiles más estrictos del mundo.

En la industria relojera y de artículos de lujo, la norma suiza NIHS 93-10 "Especificación técnica para materiales de rotor de alta densidad" y la norma alemana DIN 8308 "Materiales de reemplazo para metales pesados en relojes" imponen requisitos casi estrictos en cuanto a consistencia de densidad,

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



magnetismo, tratamiento de superficie y estabilidad a largo plazo.

En la industria de rodamientos industriales y piezas resistentes al desgaste: las normas chinas JB/T 12778 "Condiciones técnicas para bolas de aleación de alta densidad resistentes al desgaste" e ISO 683-17 "Requisitos técnicos para bolas de aleación especiales para rodamientos" estipulan claramente la dureza, la vida a fatiga y la estabilidad dimensional.

Estas normas sectoriales suelen ser más detalladas, estrictas y se actualizan con mayor frecuencia que las normas nacionales, convirtiéndose en las cláusulas obligatorias más citadas en los pliegos de licitación y los acuerdos técnicos de los clientes de alto nivel. Este sistema de normas progresivo y complementario ha forjado conjuntamente el umbral de calidad global más alto y la garantía de reputación más fiable para las bolas de aleación de tungsteno, desde las materias primas hasta las aplicaciones.



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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



## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

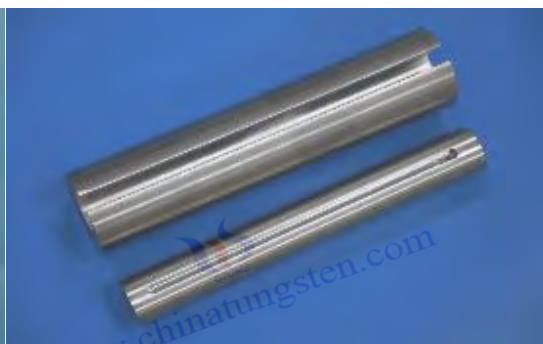
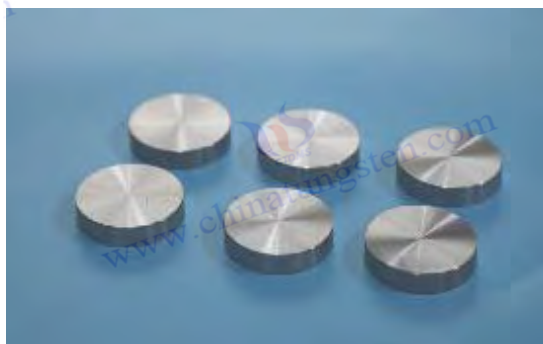
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

## Capítulo 5 Áreas de aplicación de las bolas de aleación de tungsteno

### 5.1 Aplicación de bolas de aleación de tungsteno en contrapesos generales

Bolas de aleación de tungsteno Han sustituido al plomo, el acero y el hormigón en el ámbito de los contrapesos, convirtiéndose en el material preferido para lograr la miniaturización, la precisión y el respeto al medio ambiente de los productos. Sus características combinadas de alta densidad, no toxicidad, estabilidad dimensional y excelente maquinabilidad les han permitido penetrar ampliamente en diversas aplicaciones civiles, como maquinaria de ingeniería, artículos deportivos y productos de consumo cotidiano, manteniendo su posición de liderazgo en el mercado de las bolas de aleación de tungsteno.

#### 5.1.1 Contrapesos de bolas de aleación de tungsteno para maquinaria de ingeniería

La maquinaria de construcción tiene requisitos extremadamente estrictos para los contrapesos: deben proporcionar un par de equilibrio suficientemente grande, lograr un diseño compacto en un espacio limitado y, al mismo tiempo, cumplir con los requisitos de fiabilidad frente a vibraciones, impactos y servicio prolongado a la intemperie. Las bolas de aleación de tungsteno cumplen a la perfección con estos requisitos, lo que las convierte en un componente de contrapeso indispensable para grúas torre, excavadoras, cargadoras, camiones bomba de hormigón, equipos de montaje de puentes y grúas portuarias.

En las grúas torre, las bolas de aleación de tungsteno se compactan en la caja o en los bloques de contrapeso fundidos en la parte trasera de la pluma, reduciendo significativamente su longitud sin afectar la capacidad de elevación. Esto disminuye la carga de viento y la cantidad de acero utilizado. En excavadoras y cargadoras, las bolas de aleación de tungsteno se instalan frecuentemente en la parte trasera del vehículo como bloques de contrapeso modulares, lo que permite ajustes rápidos del radio de trabajo y una mayor flexibilidad en la dirección y el transporte en espacios reducidos. Los camiones bomba de hormigón utilizan bolas de aleación de tungsteno para reducir la altura del contrapeso del chasis, lo que estabiliza el centro de gravedad del vehículo y mejora notablemente su capacidad antivuelco a altas velocidades y en terrenos complejos.

En comparación con los contrapesos tradicionales de hierro fundido o concreto, las bolas de aleación de tungsteno tienen aproximadamente un tercio del tamaño, pero proporcionan el mismo o incluso mayor torque de equilibrio, lo que supone un ahorro significativo en acero y costos de transporte. Sus características totalmente atóxicas y resistentes a la intemperie eliminan por completo la contaminación ambiental y los riesgos para la salud asociados con los contrapesos de plomo, y han sido incluidas como equipo estándar por los principales fabricantes mundiales de maquinaria de construcción.

#### 5.1.2 Contrapesos de bolas de aleación de tungsteno para equipos deportivos

En el ámbito del equipamiento deportivo, las bolas de aleación de tungsteno, gracias a su elevada relación volumen-peso y su precisa capacidad de ajuste, se han convertido en las aliadas clave para mejorar el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento competitivo y los resultados del entrenamiento. Equipamiento de alta gama como palos de golf, raquetas de tenis y bádminton, bates de béisbol y hockey, y cañas de pescar profesionales, incorporan casi siempre bolas de aleación de tungsteno en posiciones clave para optimizar el centro de gravedad y la distribución del peso en el swing.

Las cabezas de los palos de golf representan la aplicación más extendida y consolidada de las bolas de aleación de tungsteno en el deporte. Estas bolas se incrustan o atornillan con precisión en la parte inferior, trasera o punta de la cabeza del palo, aumentando el punto dulce, mejorando el torque y aumentando significativamente la tolerancia. Las marcas líderes incluso ofrecen palos con sistemas de peso ajustables, lo que permite a los usuarios personalizar sus golpes añadiendo o quitando bolas de aleación de tungsteno. Las raquetas de tenis y bádminton incorporan bolas de aleación de tungsteno en las posiciones de las 3 y las 9 en punto del marco, o las ocultan en la parte inferior del mango, para bajar la altura del punto dulce y aumentar la estabilidad del golpe y el control del efecto liftado.

Los bates de béisbol y hockey utilizan bolas de aleación de tungsteno para ajustar el peso en el extremo, lo que se traduce en mayor velocidad de swing y una potencia de golpeo más concentrada. Las cañas de pescar profesionales incorporan bolas de aleación de tungsteno en las anillas o el mango para ajustar con precisión el punto de equilibrio, reduciendo la fatiga durante largas sesiones de pesca. Todas estas aplicaciones se benefician de la capacidad de las bolas de aleación de tungsteno para ser mecanizadas con precisión en cualquier tamaño, su atoxicidad y su resistencia a la corrosión, lo que permite su perfecta integración en sistemas de materiales compuestos de alta gama, como la fibra de carbono y las aleaciones de titanio. Esto se ha convertido en uno de los principales argumentos de venta de las marcas deportivas internacionales líderes que hacen hincapié en la tecnología y el rendimiento.

### 5.1.3 Bolas de aleación de tungsteno para uso civil (plomos de pesca, contrapesos para maquetas)

Las aplicaciones más accesibles y representativas de las bolas de aleación de tungsteno en el ámbito civil cotidiano son los plomos de pesca y los contrapesos para maquetas. Estos permiten a los consumidores experimentar de forma intuitiva el encanto de la idea de que «la concentración es la clave».

El producto de consumo individual más vendido a nivel mundial, fabricado con bolas de aleación de tungsteno. En comparación con los plomos de plomo tradicionales, los plomos de pesca de aleación de tungsteno tienen solo entre un tercio y la mitad del tamaño de los plomos de plomo, pero pesan lo mismo o incluso más, lo que permite a los pescadores hundirse rápidamente hasta el fondo con menor resistencia al agua y reduce significativamente las pérdidas por enganches. Su mayor dureza los hace menos propensos a deformarse con rocas, conchas o algas, lo que prolonga considerablemente su vida útil. Con recubrimientos de resina de color o de aleación de titanio, son estéticamente atractivos y respetuosos con el medio ambiente, cumpliendo plenamente con las normativas más estrictas sobre plomo en Europa y América, lo que los convierte en la opción preferida de pescadores recreativos y de competición en todo el mundo.

El campo de los contrapesos para maquetas abarca coches teledirigidos, aviones, barcos, maquetas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

arquitectónicas y juguetes de alta gama. Las bolas de aleación de tungsteno se ocultan en chasis de coches, morros de aviones o quillas de barcos, lo que permite que las maquetas alcancen un centro de gravedad más bajo y una dinámica vehicular más realista, manteniendo la misma forma. Los juguetes magnéticos infantiles y los juegos de construcción con bloques también están empezando a utilizar bolas de aleación de tungsteno recubiertas como contrapesos invisibles, garantizando la seguridad y enriqueciendo la experiencia de juego. Los rotores automáticos de los relojes mecánicos de lujo representan la aplicación civil de más alta gama de las bolas de aleación de tungsteno. Los rotores de aleación de tungsteno con aros de oro de 22 quilates o platino generan una enorme inercia rotacional con una curvatura mínima, mejorando significativamente la eficiencia del mecanismo y convirtiéndose en equipamiento estándar para marcas de prestigio como Patek Philippe, Rolex y Omega. Desde plomos de pesca hasta relojes mecánicos, las bolas de aleación de tungsteno han transformado por completo la percepción del consumidor medio sobre los materiales de alta tecnología, convirtiéndose en la mayor y más accesible puerta de entrada al sector de las aleaciones de tungsteno.

#### 5.1.4 Válvulas de perforación petrolera y bolas de contrapeso para tuberías

Los requisitos para las bolas de contrapeso en válvulas de perforación petrolera y sistemas de tuberías son extremadamente específicos: deben funcionar de manera fiable durante largos periodos en entornos de fondo de pozo caracterizados por presión extrema, alta temperatura, fuerte corrosión y vibraciones intensas, manteniendo un tamaño mínimo para minimizar el impacto en los canales de flujo. Las bolas de aleación de tungsteno, con su densidad inigualable, resistencia superior a la corrosión y altísima resistencia mecánica, se han convertido en la solución óptima para el contrapeso de válvulas y tuberías en pozos profundos, pozos ultraprofundos y plataformas de perforación marina modernas.

En válvulas críticas como las de seguridad de fondo de pozo, las de retención, las de estrangulación y los generadores de pulsos de lodo, se utilizan bolas de aleación de tungsteno como contrapesos del núcleo o componentes de equilibrado del actuador. Su elevada densidad aparente permite que las válvulas alcancen un mayor par de cierre o una mayor velocidad de apertura con las mismas dimensiones externas. Especialmente en condiciones de alta presión diferencial, garantizan un cierre o estrangulamiento rápido de la válvula, evitando accidentes catastróficos como reventones o reflujos de lodo. Las bolas de aleación de tungsteno con base de cobre o níquel-cobre, gracias a su excelente resistencia a la corrosión por sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, ofrecen un rendimiento excepcional en entornos agresivos de yacimientos de petróleo y gas con gases ácidos, sin apenas picaduras ni fragilización por hidrógeno en su superficie, lo que garantiza un sellado fiable durante toda la vida útil de la válvula.

En los sistemas de tuberías submarinas y cabezales de pozo, las bolas de aleación de tungsteno se suelen integrar en los actuadores hidráulicos o cilindros de equilibrio como contrapesos de gran peso. Su alta densidad proporciona la fuerza descendente suficiente en un espacio reducido, lo que ayuda a las válvulas a superar la presión hidrostática del agua de mar y la flotabilidad de los fluidos dentro de la tubería, logrando un cierre rápido y un bloqueo fiable. En comparación con los contrapesos tradicionales de acero o plomo, las bolas de aleación de tungsteno tienen aproximadamente un tercio del tamaño, pero proporcionan el mismo o incluso mayor efecto de contrapeso, lo que hace que todo el sistema de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



producción submarina sea más compacto y ligero, reduciendo significativamente la dificultad de instalación desde el buque y los riesgos de las operaciones submarinas.

En los dispositivos de limpieza de tuberías, tanto los más potentes como los inteligentes, utilizados en oleoductos y gasoductos de larga distancia, las bolas de aleación de tungsteno se emplean como contrapesos para garantizar la estabilidad del dispositivo en fluidos de alta presión y velocidad, y para realizar con precisión las tareas de limpieza e inspección de las paredes internas de la tubería. Su resistencia al desgaste y a la corrosión permite reutilizar el dispositivo repetidamente en tuberías que contienen arena, cera o fluidos corrosivos sin que su rendimiento se vea afectado.

Las bolas de aleación de tungsteno en las válvulas de perforación petrolera y los contrapesos de las tuberías no solo han mejorado significativamente la seguridad y la confiabilidad de los equipos, sino que también han impulsado continuos avances en todo el sistema de extracción de petróleo y gas hacia aguas profundas, pozos ultraprofundos y alto contenido de azufre, convirtiéndolas en un material funcional indispensable de alto rendimiento en la ingeniería petrolera moderna.

## **5.2 Aplicaciones de las bolas de aleación de tungsteno en los campos de la maquinaria industrial y de precisión**

Las bolas de aleación de tungsteno, en los sectores de maquinaria industrial y de precisión, han evolucionado desde simples contrapesos hasta piezas móviles de precisión, componentes funcionales resistentes al desgaste y elementos clave de instrumentos de alta gama. Sus múltiples ventajas —alta dureza, excelente resistencia al desgaste, estabilidad dimensional y propiedades térmicas— las convierten en un elemento cada vez más importante en sistemas mecánicos que requieren larga vida útil, alta fiabilidad y capacidad para operar en condiciones extremas.

### **5.2.1 Bolas de aleación de tungsteno para componentes mecánicos inerciales de precisión**

Imponen exigencias extremadamente altas en cuanto a la uniformidad y estabilidad de la distribución de masa. Las esferas de aleación de tungsteno, con su densidad aparente extremadamente alta y su excelente estabilidad dimensional a largo plazo, se han convertido en el material preferido para sistemas de almacenamiento de energía mediante volantes de inercia, rotores de centrífugas de precisión, bloques de masa amortiguadores de vibraciones para plataformas ópticas y componentes de equilibrado para instrumentos analíticos de alta gama.

En las ultracentrífugas de laboratorio y los equipos de separación industrial, las bolas de aleación de tungsteno se insertan con precisión en el borde del rotor o en la cavidad interna. Su alta densidad proporciona un gran momento de inercia en un espacio reducido, lo que permite que el equipo alcance mayores factores de separación y eficiencias en un tamaño compacto. La superficie de las bolas se somete a un pulido espejo y a un equilibrado dinámico para garantizar la ausencia de vibraciones durante la rotación a alta velocidad, protegiendo así los rodamientos de precisión y la integridad de la muestra.

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

En los sistemas de aislamiento de vibraciones de plataformas de inspección óptica de alta gama e interferómetros láser, se instalan esferas de aleación de tungsteno como bloques de masa amortiguadora dentro de estructuras de soporte de resortes multietapa o cojinetes de aire. Su alta densidad reduce significativamente la frecuencia natural del sistema, mejorando drásticamente el aislamiento de las vibraciones externas. Esta capacidad de amortiguación determina directamente la precisión final del mecanizado y la repetibilidad de las mediciones, especialmente en equipos de procesamiento a nanoescala e instrumentos de medición de precisión. Las esferas de aleación de tungsteno para componentes mecánicos inerciales de precisión suelen utilizar un sistema no magnético de W-Ni-Cu o un sistema de W-Ni-Fe de alta pureza, con recubrimiento DLC o tratamiento de pasivación en la superficie para reducir aún más la fricción y las vibraciones secundarias. Las esferas alcanzan el máximo nivel de precisión, con desviaciones de calidad entre lotes controladas dentro de un rango extremadamente estrecho, lo que garantiza un único ajuste para el equilibrio dinámico tras el ensamblaje del sistema. Esta búsqueda extrema de inercia y estabilidad convierte a las esferas de aleación de tungsteno en los pilares invisibles para lograr un control de movimiento a nivel micrométrico e incluso nanométrico en la maquinaria de precisión moderna.

### 5.2.2 Bolas de aleación de tungsteno para rodamientos de alta precisión

Las bolas de aleación de tungsteno para rodamientos de alta precisión representan la cúspide de las aplicaciones de bolas de aleación de tungsteno en el campo de la tribología. Su dureza ultraelevada, excelente resistencia al desgaste y a la fatiga les permiten ofrecer una vida útil varias veces superior a la del acero para rodamientos en condiciones de trabajo extremas que las bolas de acero tradicionales no pueden soportar.

En bombas para fluidos altamente corrosivos, cojinetes de equipos submarinos, bombas de alta presión para la desalinización de agua de mar y sistemas de transmisión para recipientes de mezcla química, las bolas de aleación de tungsteno, con una dureza e inercia química muy superiores a las del acero para cojinetes, ofrecen tasas de desgaste y resistencia a la corrosión por picaduras extremadamente bajas. Mantienen una estabilidad dimensional a largo plazo y un funcionamiento con baja fricción incluso en medios arenosos, ácidos o a altas temperaturas. En comparación con las bolas de cerámica, su tenacidad moderada evita el riesgo de fractura frágil, lo que hace que los cojinetes sean más seguros y fiables ante cargas de impacto.

En el ámbito de los cojinetes de vacío y alta temperatura, las bolas de aleación de tungsteno presentan ventajas aún más destacadas. Los equipos de recubrimiento al vacío, los sistemas de transporte de obleas semiconductoras y los cojinetes de las pistas de rodadura de hornos de alta temperatura operan en un entorno de vacío a cientos de grados Celsius durante todo el año. Las bolas de acero convencionales se desgastan rápidamente debido a la evaporación de la grasa lubricante, mientras que las bolas de aleación de tungsteno, gracias a su dureza inherente a altas temperaturas y su baja presión de vapor, mantienen una tasa de desgaste extremadamente baja incluso en condiciones de lubricación insuficiente o fricción seca, lo que prolonga su vida útil considerablemente.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las piezas de mano dentales de ultra alta velocidad y los cojinetes de husillo de precisión utilizan superficies esféricas de aleación de tungsteno con acabado espejo y coeficientes de fricción extremadamente bajos para alcanzar velocidades que superan los límites tradicionales, manteniendo a la vez un nivel de ruido y vibración mínimo. Los recubrimientos superficiales de DLC o MoS<sub>2</sub> mejoran aún más sus capacidades de autolubricación, lo que se traduce en un aumento mínimo de temperatura y una vida útil extremadamente larga de los cojinetes durante el funcionamiento a alta velocidad.

El proceso de producción de bolas de aleación de tungsteno para rodamientos de alta precisión es extremadamente riguroso y requiere decenas de controles de calidad, desde las materias primas hasta los productos terminados. La esfericidad, la rugosidad superficial y la homogeneidad entre lotes alcanzan los niveles más altos del sector. Estas bolas no solo son los elementos rodantes del rodamiento, sino también la piedra angular de la fiabilidad de todo el sistema, desempeñando un papel cada vez más importante en la búsqueda de la larga vida útil y el mantenimiento nulo en la fabricación moderna de alta gama.

### 5.2.3 Bolas resistentes al desgaste para cribas vibratorias y equipos de separación

Las cribas vibratorias y los equipos de separación son equipos esenciales en industrias como la de procesamiento de minerales, la química, la alimentaria, la farmacéutica y la de materiales de construcción. Sus bolas internas soportan directamente los efectos combinados de vibraciones de alta frecuencia, fuertes impactos, erosión abrasiva y medios corrosivos, lo que resulta en condiciones de servicio extremadamente exigentes. Las bolas de aleación de tungsteno, con una dureza, resistencia al desgaste, tenacidad al impacto e inercia química significativamente superiores a las de las bolas tradicionales de acero, hierro fundido o circonio, se han convertido en la opción predominante para las bolas de cribas vibratorias y equipos de separación de alta gama, demostrando ventajas insustituibles, especialmente en el procesamiento de minerales de alta dureza, lodos altamente corrosivos o en situaciones de separación fina que requieren una contaminación mínima.

de tungsteno actúan como medio de molienda y separador: al impactar violentamente con los materiales bajo vibración de alta frecuencia en la caja de cribado, fragmentan las partículas grandes en otras más pequeñas, a la vez que clasifican y tamizan el material a través de los espacios entre las bolas. Su elevada dureza garantiza que la superficie de las bolas prácticamente no sufra deformación plástica ni picaduras; el esqueleto de partículas de tungsteno resiste eficazmente la acción microcortante del abrasivo, mientras que la tenacidad de la fase aglutinante impide que las bolas se agrieten o se desprendan durante los impactos repetidos. Incluso al procesar materiales ultraduros como el corindón, el carburo de silicio y la arena de cuarzo, el desgaste de las bolas de aleación de tungsteno se mantiene extremadamente bajo y su vida útil suele ser varias veces superior a la de las bolas de acero forjado de alta calidad.

En entornos de cribado húmedo y lodos corrosivos, las bolas de aleación de tungsteno presentan una estabilidad química excepcional. Las esferas del sistema W-Ni-Cu forman de forma natural una densa película de pasivación en su superficie, ofreciendo una gran resistencia a ácidos, álcalis, niebla salina e iones cloruro. Están prácticamente libres de corrosión y contaminación por lixiviación, lo que garantiza

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la pureza de los productos cribados. Esto las hace especialmente adecuadas para procesos con requisitos de limpieza extremadamente altos, como la separación de almidón de grado alimentario, el cribado de intermedios farmacéuticos y la clasificación húmeda de materiales para baterías de litio. En comparación con las bolas de cerámica, las bolas de aleación de tungsteno tienen una mayor densidad, lo que se traduce en una mayor energía cinética de cribado y una mayor eficiencia de clasificación; en comparación con las bolas de acero, evitan por completo la contaminación por hierro y los problemas de corrosión.

En aplicaciones prácticas, las bolas de los tamices vibratorios suelen contener partículas con diferentes proporciones granulométricas, y las bolas de aleación de tungsteno abarcan todo el rango, desde la molienda gruesa hasta la ultrafina. Las bolas de gran diámetro se encargan de la trituración inicial, las de diámetro medio mejoran la molienda y las de pequeño diámetro optimizan la precisión de la clasificación. Las empresas líderes incluso han lanzado bolas de aleación de tungsteno con superficies microtexturizadas o recubrimientos compuestos para reducir aún más el coeficiente de fricción entre las bolas y entre estas y la placa del tamiz, disminuyendo así el consumo energético y la generación de ruido.

La incorporación de bolas de aleación de tungsteno en cribas vibratorias y equipos de separación no solo ha prolongado significativamente la vida útil del medio filtrante y reducido los costos de mantenimiento por tiempo de inactividad, sino que también ha mejorado notablemente la precisión del cribado y la consistencia del producto. Además, ante las regulaciones ambientales cada vez más estrictas, ha permitido a numerosas empresas eliminar por completo los problemas de contaminación por hierro de las bolas de acero tradicionales y los problemas de fractura frágil de las bolas de cerámica, convirtiéndose en uno de los materiales emblemáticos de los procesos de separación modernos, eficientes y sostenibles.

#### 5.2.4 Granallado de aleación de tungsteno para pulverización y tratamiento superficial

El granallado con aleación de tungsteno para pulverización y tratamiento superficial es la aplicación más singular y tecnológicamente avanzada de las bolas de aleación de tungsteno en el campo de la ingeniería de superficies. Gracias a su elevada dureza, alta densidad y excelente resistencia a la fatiga, logra limpieza, fortalecimiento, deformación e introducción de tensiones residuales de compresión mediante el impacto a alta velocidad sobre la superficie del sustrato. Se le conoce como el método definitivo para el endurecimiento por deformación en frío.

En los procesos de granallado superficial para álabes de motores aeronáuticos, cigüeñales de automóviles, implantes médicos, cavidades de moldes y herramientas de corte de alta gama, el granallado de aleación de tungsteno, con su energía cinética y dureza significativamente superiores a las del granallado de acero o cerámica, genera zonas de deformación plástica más profundas y mayores amplitudes de tensión residual de compresión en la superficie del sustrato. Esto se traduce en un aumento sustancial de la resistencia a la fatiga y a la corrosión bajo tensión de las piezas. El granallado de aleación de tungsteno es menos propenso a la fragmentación o deformación tras el impacto y puede reutilizarse muchas más veces que los medios tradicionales, lo que reduce considerablemente su consumo.

En aplicaciones de granallado que requieren una limpieza extremadamente rigurosa, como el

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



adelgazamiento de la parte posterior de obleas de silicio semiconductoras, la nano-reducción de implantes médicos de aleación de titanio o la limpieza de sustratos de lentes ópticas, las propiedades no magnéticas y libres de contaminación por hierro del granallado con aleación de tungsteno resultan especialmente valiosas. Este método permite eliminar capas de óxido superficiales y contaminantes sin introducir residuos magnéticos ni de iones metálicos, garantizando la seguridad de los posteriores tratamientos de recubrimiento o implantación. El granallado con aleación de tungsteno, con superficies especialmente pulidas y pasivadas, puede incluso utilizarse en salas blancas, convirtiéndose en una herramienta indispensable para el tratamiento de superficies de alta gama.

En la etapa de pretratamiento de la proyección térmica, el granallado con aleación de tungsteno se utiliza para rugosizar la superficie del sustrato y mejorar la adherencia del recubrimiento. Su elevada dureza proporciona una textura rugosa más uniforme y profunda, sin contaminantes incrustados, lo que lo hace idóneo para el pretratamiento de aleaciones de titanio, superaleaciones de níquel y recubrimientos cerámicos. En comparación con el granallado con alúmina o acero, el granallado con aleación de tungsteno prácticamente no genera polvo ni partículas incrustadas, lo que simplifica considerablemente los procesos de limpieza posteriores.

Ante las crecientes exigencias en la vida útil de las palas de los motores aeronáuticos, la tendencia hacia las superficies nanocristalinas en implantes médicos y la necesidad de componentes de comunicación 5G más delgados y ligeros, el granallado con aleaciones de tungsteno está evolucionando hacia un menor tamaño de partícula, una distribución granulométrica más estrecha y una mayor multifuncionalidad. Algunos productos de alta gama ya incorporan tratamientos de cromado o nitruración superficial, lo que mejora aún más su resistencia al desgaste y sus propiedades antiadherentes. Gracias a su inigualable eficacia de refuerzo, limpieza y larga vida útil, el granallado con aleaciones de tungsteno se ha consolidado como uno de los materiales abrasivos más fiables y avanzados en el campo de la ingeniería de superficies moderna.

### 5.2.5 Bola de aleación de tungsteno para calibración de instrumentos de medición y balanzas

Las bolas de aleación de tungsteno utilizadas para la calibración de instrumentos de medición y balanzas representan la aplicación más precisa y exigente de estas bolas en el campo de la metrología. Sus requisitos de consistencia de densidad, estabilidad a largo plazo y adaptabilidad ambiental han alcanzado el nivel más alto, y se consideran un referente de calidad indispensable para los patrones metrológicos nacionales y los instrumentos analíticos de alta gama.

En los laboratorios nacionales de referencia de calidad, balanzas analíticas de alta precisión y equipos de ensayo mecánico de precisión, las esferas de aleación de tungsteno, utilizadas como pesas patrón o bloques de calibración, deben poseer una uniformidad de densidad, estabilidad dimensional y resistencia a la oxidación extremadamente altas. Las esferas del sistema no magnético W-Ni-Cu se someten a un proceso de rectificado de precisión en varias etapas y a un tratamiento térmico al vacío, lo que permite controlar la desviación de densidad dentro de un rango extremadamente estrecho. La capa de pasivación superficial garantiza una variación de masa insignificante tras años de almacenamiento. Estas

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

características permiten que las esferas de aleación de tungsteno se utilicen como pesas patrón de grado E1 o incluso superior, participando directamente en la cadena internacional de trazabilidad de prototipos del kilogramo y proporcionando el referente de calidad más fiable para el comercio mundial, la investigación científica y la metrología industrial. En los mecanismos de calibración interna de balanzas analíticas y microbalanzas de alta precisión, se utilizan esferas de aleación de tungsteno como masas patrón integradas. Su tamaño extremadamente pequeño y su masa extremadamente elevada permiten que la balanza logre una combinación perfecta de amplio rango y alta resolución en un espacio reducido. La superficie pulida a espejo y chapada en oro de las esferas no solo previene la oxidación y el deterioro, sino que también reduce los efectos de la adsorción electrostática y la flotabilidad del aire, lo que garantiza resultados de calibración altamente reproducibles en cada calibración.

En sensores de fuerza, máquinas de ensayo de materiales y dispositivos de calibración de llaves dinamométricas, las bolas de aleación de tungsteno se utilizan frecuentemente como bolas de carga o de equilibrio estándar. Gracias a su masa conocida con precisión y su esfericidad perfecta, proporcionan cargas gravitatorias puras, evitando los errores de excentricidad y la deformación por contacto que provoca el apilamiento de pesas tradicional. El coeficiente de dilatación extremadamente bajo y la ausencia de magnetismo de las bolas de aleación de tungsteno en un amplio rango de humedad y temperatura garantizan aún más la estabilidad a largo plazo del proceso de calibración y su inmunidad a las interferencias electromagnéticas. Laboratorios de vanguardia han desarrollado esferas de aleación de tungsteno recubiertas con platino o paladio para experimentos de adsorción de gases y ciencia de superficies. Su superficie limpia y masa conocida las convierten en soportes ideales para estudiar el comportamiento de adsorción molecular. Gracias a su inigualable precisión en densidad y dimensiones, así como a su estabilidad ambiental, las esferas de aleación de tungsteno se han consolidado como el patrón físico más fiable en la metrología moderna, abarcando desde valores de fuerza macroscópicos hasta masas microscópicas, impulsando la continua evolución de los instrumentos analíticos hacia una mayor resolución y estabilidad.

### 5.3 Aplicación de bolas de aleación de tungsteno en campos especiales de alta gama

Las esferas de aleación de tungsteno en campos especializados de alta gama representan la máxima expresión de su potencial de rendimiento. Estos escenarios suelen imponer requisitos multidimensionales y extremos a los materiales: densidad y eficiencia de blindaje extremadamente altas, magnetismo no magnético o controlable, ultraprecisión, estabilidad radiológica a largo plazo y biocompatibilidad o pureza. Mediante la optimización de la composición y el perfeccionamiento del proceso, las esferas de aleación de tungsteno cumplen a la perfección estas rigurosas condiciones, convirtiéndose en un componente funcional esencial en las instalaciones de radioterapia médica y tecnología nuclear.

#### Bolas de aleación de tungsteno para colimadores en radioterapia médica

En radioterapia médica, el colimador es el componente central de los modernos equipos de radioterapia de precisión para tumores. Su función es moldear el haz de alta energía para lograr una distribución de dosis altamente adaptada al contorno tridimensional de la lesión, minimizando la dosis de radiación en

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

los tejidos sanos circundantes. Las esferas de aleación de tungsteno, como elemento de relleno y modelado más preciso y crucial del colimador, han revolucionado la precisión y la seguridad de la radioterapia gracias a su incomparable capacidad de atenuación de la radiación, su precisión geométrica y sus propiedades no magnéticas.

En los sistemas de colimadores multiláminas de Gamma Knife, CyberKnife y aceleradores lineales médicos, decenas de miles de esferas de aleación de tungsteno se disponen con precisión entre las láminas o en la matriz de aperturas de enfoque, formando una trayectoria del haz dinámicamente variable. La naturaleza completamente no magnética de las esferas garantiza que no se generen artefactos de interferencia en entornos de campos magnéticos intensos (como la radioterapia guiada por resonancia magnética con MR-Linac), mientras que su altísima densidad permite que el colimador logre una capacidad de bloqueo de rayos gamma extremadamente alta con un espesor mínimo, confinando con precisión la zona de alta dosis al volumen tumoral, mientras que el tejido sano permanece prácticamente intacto. Este gradiente de dosis extremadamente preciso permite a los médicos realizar irradiación radical en tumores ubicados en zonas complejas como el tronco encefálico, la médula espinal o la próstata sin temor a complicaciones graves.

Las esferas de aleación de tungsteno en los colimadores constituyen su estructura de enfoque de tipo relleno. Los colimadores tradicionales de aleación de platino o de plomo son voluminosos y extremadamente pesados, mientras que las esferas de aleación de tungsteno pueden apilarse con precisión para formar una matriz de aperturas de enfoque de curvatura arbitraria, lo que hace que el equipo en su conjunto sea más ligero y compacto, facilitando la rotación a alta velocidad del gantry y la guía de imagen en tiempo real. La superficie de las esferas se somete a un pulido espejo y a un tratamiento especial de pasivación, lo que no solo reduce la emisión de electrones secundarios, sino que también disminuye considerablemente la dispersión de rayos X, garantizando la precisión y la repetibilidad de los cálculos de dosis.

En los sistemas de dispersión pasiva y escaneo de haz puntual para terapia con protones e iones pesados, también se utilizan esferas de aleación de tungsteno para rellenar filtros de cresta o compensadores, modulando así la distribución de energía del haz de partículas y logrando una superposición precisa de los picos de Bragg de dosis profundas. Su alta densidad e inercia química garantizan que no se generen productos de activación ni degradación del material bajo irradiación de partículas de alto flujo, lo que asegura la limpieza de la sala de tratamiento y la seguridad del paciente.

Las propiedades no tóxicas, esterilizables y de estabilidad dimensional a largo plazo de las esferas de aleación de tungsteno garantizan que cumplan plenamente con los requisitos más estrictos de biocompatibilidad y radiocompatibilidad para dispositivos médicos. Cada lote de esferas debe superar el bioensayo ISO 10993 y la verificación de registro de la FDA antes de su uso clínico. Este control de calidad integral, desde las materias primas hasta el producto final, convierte a las esferas de aleación de tungsteno en la piedra angular de los modernos equipos de radioterapia, logrando una precisión milimétrica y una seguridad micrométrica, y ofreciendo mayores tasas de curación y menores efectos secundarios a innumerables pacientes con cáncer. Su amplia aplicación en colimadores médicos no solo

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

demuestra la excelencia de la tecnología de esferas de aleación de tungsteno, sino que también destaca la profunda contribución de la ciencia de los materiales a la salud humana.

### 5.3.2 Esferas de aleación de tungsteno para blindaje contra la radiación y absorción de neutrones en la industria nuclear

Las esferas de aleación de tungsteno para blindaje contra la radiación y absorción de neutrones en la industria nuclear representan la aplicación más exigente y fundamental de estas esferas en las instalaciones de tecnología nuclear. Deben lograr una atenuación de la radiación y captura de neutrones eficientes y estables en campos de radiación mixta de alto flujo de neutrones y rayos gamma, refrigerantes altamente corrosivos y entornos de irradiación a alta temperatura durante largos periodos, manteniendo al mismo tiempo la integridad estructural y la estabilidad dimensional.

En las estructuras de blindaje de reactores de investigación, reactores de producción de isótopos médicos e instalaciones de reprocesamiento de combustible nuclear, se suelen utilizar esferas de aleación de tungsteno para rellenar paredes de blindaje multicapa, huecos en contenedores o módulos de blindaje móviles, formando una capa protectora de alta densidad y gran flexibilidad. Su elevada capacidad de atenuación de rayos gamma permite una reducción significativa del espesor del blindaje, logrando un mayor nivel de protección en un espacio limitado. Al incorporar elementos con alta capacidad de absorción de neutrones, como boro, gadolinio y samario, las esferas adquieren además excelentes secciones eficaces de captura de neutrones térmicos y rápidos, logrando un control integral de los campos de radiación mixtos. Esta característica de blindaje de doble efecto resulta especialmente valiosa en el diseño de cámaras calientes, cajas de guantes y contenedores de transporte con limitaciones de espacio.

En los mecanismos de accionamiento de las barras de control de reactores y en las líneas experimentales de haces de neutrones, se utilizan esferas de aleación de tungsteno dopadas con absorbente en los anillos de absorción o en los componentes de relleno de colimación para regular la distribución del flujo de neutrones y bloquear los rayos gamma asociados, garantizando así la seguridad del personal y los equipos experimentales. Su geometría esférica proporciona unas características de empaquetamiento óptimas, lo que hace que la estructura de blindaje sea densa y fácil de montar y desmontar, facilitando el mantenimiento periódico y minimizando la generación de residuos. Las esferas de aleación de tungsteno les permiten operar durante largos periodos en entornos de agua pesada o sales fundidas a alta temperatura sin cambios dimensionales significativos ni degradación del rendimiento. Los tratamientos especiales de pasivación o recubrimiento de la superficie mejoran aún más la resistencia a la corrosión del refrigerante y la adhesión del producto de activación, lo que garantiza que la instalación mantenga su eficacia de protección durante su vida útil prevista de décadas. En comparación con el acero boronizado tradicional, el polietileno de plomo-boro o las placas de cadmio, las esferas de aleación de tungsteno ofrecen ventajas integrales en densidad, resistencia, resistencia a la temperatura y maquinabilidad, lo que las convierte en un material clave para la compacidad, la durabilidad y la sostenibilidad de las instalaciones nucleares de próxima generación. Su aplicación generalizada no solo mejora significativamente la seguridad y la eficiencia operativa de las instalaciones de tecnología nuclear, sino que también proporciona la garantía material más fiable para el desarrollo sostenible de la producción de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



radioisótopos, la terapia de captura de neutrones con boro y los sistemas avanzados de energía nuclear.

### 5.3.3 Bolas de aleación de tungsteno para aplicaciones aeroespaciales de navegación inercial y volantes de inercia

Los exigentes requisitos de distribución de masa en los sistemas de navegación inercial aeroespacial y de volantes de inercia convierten a las esferas de aleación de tungsteno en los componentes inerciales clave de los rotores de volantes de inercia para almacenamiento de energía y de los giroscopios de precisión. Su alta densidad y excelentes características de equilibrio dinámico proporcionan un gran momento de inercia en un volumen muy reducido, lo que permite un control de actitud de alta precisión y el almacenamiento de energía para satélites, sondas y estaciones espaciales.

En los volantes de inercia para el almacenamiento de energía en satélites, esferas de aleación de tungsteno se integran o unen con precisión al interior de aros de fibra de carbono o aleación de titanio, formando anillos de alta densidad. Su elevada densidad aparente incrementa significativamente el momento de inercia del volante para un mismo diámetro exterior, lo que resulta en una densidad de almacenamiento de energía muy superior a la de los materiales tradicionales. Esto permite una rápida liberación de energía durante los picos de demanda o el mantenimiento del funcionamiento normal del satélite durante los periodos de sombra. La superficie de las esferas se somete a un pulido de alta precisión y a un equilibrado dinámico en varias etapas para garantizar vibraciones y ruido extremadamente bajos durante la rotación a alta velocidad, evitando interferencias con cargas útiles ópticas sensibles o sistemas de comunicación. El uso de esferas de aleación de tungsteno no magnéticas o micromagnéticas elimina aún más las pérdidas por histéresis y las interferencias del campo magnético, lo que se traduce en una mayor eficiencia del sistema del volante y una vida útil más prolongada.

En los conjuntos de volantes de inercia para el control de actitud de las sondas espaciales y estaciones espaciales, las esferas de aleación de tungsteno también desempeñan un papel crucial. Durante viajes que duran años o incluso décadas, las sondas dependen de estos conjuntos de volantes para ajustar con precisión su actitud y mantener la comunicación entre la antena y la Tierra o la orientación de los paneles solares hacia el Sol. La alta densidad de las esferas de aleación de tungsteno permite que los volantes proporcionen suficientes reservas de momento angular dentro de un presupuesto de masa limitado, satisfaciendo las exigencias de las complejas maniobras orbitales y los ajustes de actitud. Su excelente resistencia a la radiación y su estabilidad dimensional a largo plazo garantizan que no se produzca degradación del rendimiento ni deformación geométrica ante la acción de los rayos cósmicos y las drásticas variaciones de temperatura.

Las constelaciones de satélites comerciales de alta gama y las plataformas de satélites pequeños son sensibles al coste y al tamaño. El uso de esferas de aleación de tungsteno permite que los sistemas de volantes de inercia sean más ligeros, pequeños y eficientes, impulsando el rápido desarrollo de la miniaturización de satélites y las redes de bajo coste. En el equilibrado de los brazos robóticos de las estaciones espaciales y los sistemas de reducción de vibraciones para plataformas experimentales, las esferas de aleación de tungsteno también se utilizan como bloques de masa ajustables, logrando un ajuste

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

preciso del centro de gravedad y la supresión de vibraciones mediante adiciones y sustracciones exactas. La amplia aplicación de las esferas de aleación de tungsteno en la navegación inercial aeroespacial y los volantes de inercia no solo ha mejorado significativamente la maniobrabilidad, la vida útil y la fiabilidad de las naves espaciales, sino que también ha proporcionado la garantía de energía más robusta para la exploración del espacio profundo, el internet satelital y las estancias prolongadas en estaciones espaciales. En forma de diminutas esferas, encarnan el gran sueño de la humanidad de explorar el universo y se han convertido en un elemento indispensable, aunque poco reconocido, de la tecnología aeroespacial moderna.

#### **5.3.4 Esferas de aleación de tungsteno para blindaje contra la radiación y absorción de neutrones en la industria nuclear**

Las esferas de aleación de tungsteno para blindaje contra la radiación y absorción de neutrones en la industria nuclear representan la aplicación más exigente y crítica de estas esferas en las instalaciones de tecnología nuclear. Deben lograr una atenuación de la radiación y captura de neutrones eficientes y estables en campos de radiación mixta de alto flujo de neutrones y rayos gamma, refrigerantes altamente corrosivos y entornos de irradiación a alta temperatura durante largos periodos, manteniendo al mismo tiempo la integridad estructural y la estabilidad dimensional.

En las estructuras de blindaje de reactores de investigación, reactores de producción de isótopos médicos e instalaciones de reprocesamiento de combustible nuclear, se suelen utilizar esferas de aleación de tungsteno para rellenar paredes de blindaje multicapa, huecos en contenedores o módulos de blindaje móviles, formando una capa protectora de alta densidad y gran flexibilidad. Su elevada capacidad de atenuación de rayos gamma permite una reducción significativa del espesor del blindaje, logrando un mayor nivel de protección en un espacio limitado. Al incorporar elementos con altas secciones eficaces de captura, como boro, gadolinio y samario, las esferas adquieren además excelentes secciones eficaces de captura de neutrones térmicos y rápidos, logrando un control integral de los campos de radiación mixtos. Esta característica de blindaje de doble efecto resulta especialmente valiosa en el diseño de cámaras calientes, cajas de guantes y contenedores de transporte con limitaciones de espacio.

En los mecanismos de accionamiento de las barras de control de reactores y en las líneas experimentales de haces de neutrones, se utilizan esferas de aleación de tungsteno dopadas con absorbente en los anillos de absorción o en los componentes de relleno de colimación para regular la distribución del flujo de neutrones y bloquear los rayos gamma asociados, garantizando así la seguridad del personal y los equipos experimentales. Su geometría esférica proporciona unas características de empaquetamiento óptimas, lo que hace que la estructura de blindaje sea densa y fácil de montar y desmontar, facilitando el mantenimiento periódico y minimizando la generación de residuos.

Las esferas de aleación de tungsteno les permiten operar durante largos periodos en entornos de agua pesada o sales fundidas a alta temperatura sin cambios dimensionales significativos ni degradación del rendimiento. Los tratamientos especiales de pasivación o recubrimiento de la superficie mejoran aún más la resistencia a la corrosión del refrigerante y la adhesión del producto de activación, lo que garantiza

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

que la instalación mantenga su eficacia de protección durante su vida útil prevista de décadas.

En comparación con el acero tradicional recubierto de boro, el polietileno de plomo-boro o las placas de cadmio, las esferas de aleación de tungsteno ofrecen ventajas integrales en densidad, resistencia, resistencia a la temperatura y maquinabilidad, convirtiéndose en un material clave para la compacidad, la durabilidad y el respeto al medio ambiente de las instalaciones nucleares de próxima generación. Su aplicación generalizada no solo mejora significativamente la seguridad y la eficiencia operativa de las instalaciones de tecnología nuclear, sino que también proporciona la garantía material más fiable para el desarrollo sostenible de la producción de radioisótopos, la terapia de captura neutrónica con boro y los sistemas avanzados de energía nuclear. En su forma esférica, las esferas de aleación de tungsteno protegen silenciosamente la vanguardia de la industria nuclear, convirtiéndose en un blindaje indispensable para el uso pacífico de la energía nuclear.

### 5.3.5 Bolas de aleación de tungsteno para volante y giroscopio de control de actitud de satélite

Los sistemas de control de actitud mediante volantes y giroscopios son los actuadores principales que permiten a las naves espaciales lograr un apuntamiento preciso y un vuelo estable. Las esferas de aleación de tungsteno, como elementos de masa inercial, proporcionan una inercia rotacional máxima en un espacio limitado gracias a su altísima densidad y excelentes características de equilibrio dinámico, lo que las convierte en un componente indispensable de alto rendimiento para el almacenamiento y control de energía en las plataformas satelitales modernas.

Los factores decisivos para la vida útil y la maniobrabilidad en órbita.

En el giroscopio de control de momento y el volante de reacción, esferas de aleación de tungsteno se integran con precisión en el borde del rotor de alta velocidad, formando un anillo de masa de alta densidad. Su elevada densidad aparente permite que el rotor alcance un momento de inercia muy superior al de los materiales tradicionales con el mismo diámetro exterior, logrando así una mayor capacidad de almacenamiento de momento angular y una rápida descarga con un volumen y una masa reducidos. Esto resulta crucial para aplicaciones como satélites de observación terrestre que requieren ajustes de apuntamiento frecuentes, satélites de comunicación que necesitan una orientación precisa hacia la Tierra y satélites científicos que requieren entornos con niveles extremadamente bajos de microvibración. La superficie de las esferas de aleación de tungsteno se somete a un pulido espejo y a un tratamiento de equilibrado dinámico en varias etapas para garantizar niveles extremadamente bajos de vibración y ruido durante la rotación del rotor a alta velocidad, evitando interferencias con cargas útiles sensibles a bordo, como cámaras de alta resolución o terminales de comunicación láser.

Las esferas de aleación de tungsteno no magnéticas o micromagnéticas permiten que el sistema de volante funcione de forma segura cerca del magnetómetro o convertidor de par integrado, sin pérdidas por histéresis ni interferencias con la precisión de las mediciones magnéticas. Su excelente resistencia a la radiación y su estabilidad dimensional a largo plazo garantizan que la esfera mantenga su distribución de masa y geometría iniciales incluso después de varios años en órbita, sin hincharse, agrietarse ni perder

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

masa, lo que garantiza la fiabilidad del control de actitud durante toda la vida útil del satélite.

Con el rápido desarrollo de los pequeños satélites y CubeSats, las ventajas de alta densidad de las esferas de aleación de tungsteno se han vuelto aún más evidentes: para los mismos requisitos de momento angular, el volumen y la masa del volante de inercia pueden reducirse significativamente, liberando valioso espacio a bordo y margen de peso para el lanzamiento, lo que permite aumentar la carga útil o extender la vida útil. Las principales constelaciones de satélites comerciales han adoptado las esferas de volante de inercia de aleación de tungsteno como equipo estándar, dando paso a una era de redes satelitales de bajo costo y alta maniobrabilidad. Las esferas de aleación de tungsteno desempeñan un papel crucial en el equilibrio del brazo robótico de las estaciones espaciales, el ajuste de la orientación de los módulos de aterrizaje lunares y marcianos, y el sistema de almacenamiento de energía de los volantes de inercia de las sondas espaciales de espacio profundo. Su capacidad de servicio fiable a largo plazo en condiciones de vacío, amplias variaciones de temperatura y entornos de alta radiación ha sido confirmada mediante múltiples verificaciones en órbita. Gracias a su diminuta pero precisa forma esférica, las esferas de aleación de tungsteno proporcionan el «sentido de dirección» y el «centro energético» más importantes de las naves espaciales, convirtiéndose en uno de los pilares inerciales más fiables para las actividades espaciales humanas, desde la órbita terrestre baja hasta el espacio profundo.

#### **5.4 Aplicaciones de las bolas de aleación de tungsteno en campos de aplicación emergentes y de vanguardia**

Las esferas de aleación de tungsteno están penetrando rápidamente en los campos emergentes más vanguardistas y exigentes. Su extrema densidad, excelente rendimiento a altas temperaturas, estabilidad a la radiación y maquinabilidad de precisión las convierten en un material ideal para superar las limitaciones tecnológicas actuales y abrir nuevas posibilidades futuras. En campos punteros como los sistemas láser de alta energía, los vehículos hipersónicos, los dispositivos de fusión nuclear, los cabezales fríos para computación cuántica y la exploración de entornos extremos en el espacio profundo, las esferas de aleación de tungsteno ya no son meros contrapesos o componentes de blindaje tradicionales, sino que se han convertido en componentes funcionales clave que permiten alcanzar el máximo rendimiento de los sistemas, ampliando continuamente las fronteras de la tecnología humana.

#### **Esferas de aleación de tungsteno para armas láser y sistemas de energía dirigida**

Los láseres de alta potencia y los sistemas de energía dirigida imponen exigencias sin precedentes a la estabilidad de las plataformas ópticas, los platos giratorios de espejos y los enlaces de transmisión de energía. Cualquier vibración, deriva térmica o desplazamiento del centro de gravedad, por mínimo que sea, puede provocar inestabilidad en el eje óptico, reduciendo significativamente la precisión de apuntamiento del haz o incluso causando un fallo total. Las esferas de aleación de tungsteno, como elemento de masa óptimo para el equilibrio y la amortiguación de vibraciones, gracias a su altísima densidad y su perfecta estabilidad dimensional a largo plazo, se han convertido en el componente central más discreto e indispensable de dichos sistemas.

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



En las plataformas ópticas láser de alta energía, las esferas de aleación de tungsteno se integran con precisión en el bloque de masa de los mecanismos de ajuste de múltiples grados de libertad o en los sistemas de aislamiento activo de vibraciones. Su altísima densidad permite que el sistema alcance un par de inercia extremadamente grande en un volumen muy reducido, lo que proporciona una fuerte supresión de las vibraciones externas y garantiza una estabilidad subarcosegundo de la trayectoria del haz láser incluso ante fuertes impactos, vibraciones de banda ancha o maniobras rápidas. El uso de esferas de aleación de tungsteno no magnéticas evita por completo el impacto de las pérdidas por histéresis y el calor generado por corrientes parásitas en los espejos de precisión, mientras que el pulido de la superficie de los espejos y los tratamientos de recubrimiento especiales reducen aún más la dispersión y la radiación térmica secundaria, lo que garantiza que la calidad del haz se mantenga siempre al máximo nivel. En plataformas de energía dirigida montadas en vehículos, aeronaves o buques, las esferas de aleación de tungsteno se utilizan comúnmente como anillos de equilibrado dinámico y contrapesos de espejos en torretas de alta velocidad. Su alta densidad permite que la torreta alcance una aceleración angular y una velocidad de apuntamiento extremadamente altas con un menor momento de inercia, a la vez que absorbe rápidamente la energía vibracional durante el retroceso del lanzamiento o las maniobras bruscas de la plataforma, evitando la desalineación del eje óptico. La estabilidad a altas temperaturas de las esferas de aleación de tungsteno también les permite operar durante períodos prolongados bajo las altas cargas térmicas de los láseres sin cambios dimensionales ni degradación del rendimiento.

Una aplicación aún más vanguardista se observa en las plataformas de prueba de energía dirigida en el espacio, donde esferas de aleación de tungsteno se diseñan como esferas de volante de inercia de masa variable. Mediante métodos electromagnéticos o mecánicos, la distribución de la masa se ajusta en tiempo real para lograr una calibración ultraprecisa de la dirección del haz. Su excepcional rendimiento en entornos de vacío, temperaturas extremadamente bajas y alta radiación permite que el sistema mantenga su rendimiento óptimo en órbita durante largos periodos sin necesidad de mantenimiento. Estas diminutas esferas de aleación de tungsteno sustentan silenciosamente la estabilidad y precisión de los sistemas optoelectrónicos más avanzados de la humanidad, convirtiéndose en uno de los materiales clave para la aplicación práctica de las tecnologías láser y de energía dirigida, sacándolas del laboratorio. Acercan el sueño del control preciso a la realidad y proporcionan la base de equilibrio más fiable para la futura era de las armas fotónicas de alta energía.

### **Bolas de aleación de tungsteno para equilibrar y contrapesar vehículos hipersónicos**

Las aeronaves hipersónicas se enfrentan a los requisitos más exigentes en cuanto al control del centro de gravedad y el equilibrio térmico en entornos de calentamiento aerodinámico extremo, vibraciones severas y sobrecargas complejas. Las esferas de aleación de tungsteno, gracias a su densidad inigualable, su resistencia a altas temperaturas, al choque térmico y a la oxidación, se han convertido en el elemento óptimo de control de masa para solucionar este problema.

Esferas de aleación de tungsteno se integran con precisión en compartimentos de contrapeso, fijos o móviles, ubicados en el morro, las puntas de las alas o la cola de la aeronave. Su elevada densidad volumétrica permite un ajuste preciso del centro de gravedad en un amplio rango dentro de un espacio

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muy reducido, lo que posibilita que la aeronave mantenga una configuración aerodinámica y una estabilidad óptimas en un amplio rango de números de Mach. Tras recubrir la superficie de la esfera con una capa especial resistente a altas temperaturas o con una aleación de renio, esta conserva su integridad estructural y su masa inalteradas durante largos periodos bajo condiciones de calentamiento aerodinámico de miles de grados Celsius, lo que garantiza que el centro de gravedad no se desplace debido a la ablación o la deformación térmica.

En los colectores de admisión del motor, los anillos de soporte de la cámara de combustión y los mecanismos de ajuste de las toberas de escape, se utilizan bolas de aleación de tungsteno como bolas de equilibrado para altas temperaturas y amortiguadoras de vibraciones. Su alta resistencia a la temperatura y su bajo coeficiente de dilatación térmica permiten que el sistema mantenga la precisión geométrica y el equilibrio dinámico ante fuertes choques térmicos, evitando la fatiga estructural o fallos de control causados por el acoplamiento de vibraciones. La elevada dureza de las bolas de aleación de tungsteno también les permite resistir el desgaste durante largos periodos de tiempo bajo la acción abrasiva del flujo de aire a alta velocidad que contiene partículas, manteniendo una superficie lisa y una calidad estable.

Un enfoque más avanzado consiste en diseñar las esferas de aleación de tungsteno como un conjunto de contrapeso variable. Mediante accionamiento electromagnético o mecanismos de aleación con memoria de forma, las esferas ajustan su posición en tiempo real durante el vuelo, logrando una correspondencia dinámica y óptima entre el centro de gravedad y el vector de empuje. Esto garantiza que la aeronave mantenga una actitud óptima durante fases extremas como el encendido del motor scramjet, las maniobras de trayectoria o la reentrada atmosférica. Esta tecnología de contrapeso activo de esferas de aleación de tungsteno se ha convertido en una de las tecnologías clave para las plataformas hipersónicas de sexta generación.

Las esferas de aleación de tungsteno en vehículos hipersónicos no solo han mejorado significativamente su maniobrabilidad, estabilidad y capacidad de supervivencia, sino que también han proporcionado el soporte material más sólido para que la humanidad supere la barrera del sonido y logre viajes rápidos a nivel global y en el espacio. En su diminuta forma esférica, encarna el gran sueño de la humanidad de conquistar la era hipersónica y se ha convertido en una de las estrellas ocultas más brillantes de la revolución de la tecnología hipersónica.

### **Bolas de aleación de tungsteno para vehículos de exploración submarina y submarinos**

Los requisitos para los sistemas de lastre en vehículos de exploración de aguas profundas y sumergibles tripulados y no tripulados han alcanzado la cima de la ciencia de los materiales: deben proporcionar una enorme masa en un volumen muy reducido para soportar la inmensa flotabilidad de la presión del agua a profundidades de decenas de miles de metros, mientras que los materiales deben poseer una resistencia superior a la corrosión del agua de mar, una resistencia a la compresión extremadamente alta, estabilidad dimensional a largo plazo y ser completamente atóxicos y libres de contaminación. Las esferas de aleación de tungsteno, con su densidad aparente sin parangón, excelente resistencia a la corrosión y

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fiables propiedades mecánicas, se han convertido en el material preferido para los sistemas de lastre en todos los equipos de aguas profundas actuales, y están profundamente integradas en todo el espectro de plataformas de aguas profundas, desde expediciones científicas hasta exploración de recursos, desde la construcción submarina hasta la exploración de aguas ultraprofundas.

En el diseño de sumergibles tripulados de profundidad oceánica completa, como el "Striver", vehículos operados remotamente (ROV) y vehículos submarinos autónomos (AUV), se utilizan esferas de aleación de tungsteno densamente empaquetadas en tanques de lastre específicos, ubicados dentro o fuera del casco de presión, formando un lastre desechable o fijo. Las esferas desechables de aleación de tungsteno se suelen disponer en bolsas o cajas modulares, proporcionando la flotabilidad negativa necesaria para contrarrestar la flotabilidad del equipo durante el descenso. Tras alcanzar la profundidad objetivo, se desechan algunas esferas según sea necesario para lograr flotabilidad neutra durante la fase de flotación o el ascenso para el regreso. En comparación con los bloques tradicionales de hierro fundido o plomo, este método utiliza solo un tercio del volumen, proporcionando la misma o incluso mayor masa de lastre, lo que permite que el sumergible transporte más instrumentos científicos, brazos robóticos o equipos de muestreo dentro del mismo tamaño de casco de presión, mejorando considerablemente la eficiencia operativa y la producción de investigación científica.

Esferas de lastre fijo de aleación de tungsteno se instalan permanentemente en el fondo o los laterales del sumergible para desplazar permanentemente el centro de gravedad hacia abajo y mantener el equilibrio de actitud. Su altísima resistencia a la compresión garantiza que no se produzcan deformaciones por compresión bajo la presión del agua a decenas de miles de metros, con una mínima variación dimensional, lo que asegura la estabilidad de actitud del sumergible en corrientes oceánicas complejas y con una topografía submarina variada. La naturaleza no tóxica de las esferas de aleación de tungsteno elimina por completo el riesgo de contaminación ecológica marina que puede suponer el lastre de plomo. Un tratamiento especial de pasivación superficial o un recubrimiento de titanio les confiere una resistencia casi permanente a la corrosión del agua de mar. Incluso durante largos periodos de servicio en zonas de ventilación hidrotermal de aguas profundas que contienen sulfuro de hidrógeno, la superficie permanece intacta, sin productos de corrosión ni pérdida de peso.

En equipos submarinos de larga duración, como nodos de redes de observación del lecho marino, plataformas de perforación y máquinas de minería submarina, se utilizan esferas de aleación de tungsteno como lastre de cimentación y elementos de anclaje antiflotabilidad. Su alta densidad permite que el equipo se asiente firmemente sobre lodo o pendientes blandas del lecho marino sin necesidad de una gran base de hormigón, mientras que su forma esférica facilita el despliegue y la recuperación precisos mediante robots submarinos. La fiabilidad a largo plazo de las esferas de aleación de tungsteno en el complejo entorno de alta presión, baja temperatura y alta salinidad de las profundidades marinas ha sido verificada mediante múltiples ensayos en el mar a profundidades de decenas de miles de metros, lo que las convierte en la garantía de lastre más fiable para la exploración humana de la Fosa de las Marianas, la Fosa de Kermadec y otras zonas oceánicas extremadamente profundas.

Con el desarrollo de baterías de estado sólido para aguas profundas, materiales de flotabilidad de ultra

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

alta presión y sistemas de lastre inteligentes, las esferas de aleación de tungsteno evolucionan hacia la densidad variable y la liberación inteligente de lastre. Mediante recubrimientos funcionales en la superficie o el diseño de la microestructura interna, las esferas pueden disolverse y liberar lastre gradualmente, o modificar su masa efectiva bajo condiciones específicas, mejorando aún más la eficiencia energética y la flexibilidad operativa de los sumergibles. Gracias a su rendimiento excepcional en los entornos más hostiles de las profundidades marinas, las esferas de aleación de tungsteno acompañan a la humanidad en la continua superación de récords en la exploración submarina, convirtiéndose en uno de los materiales más valiosos para conquistar la última frontera de la Tierra.

#### 5.4.5 Bola de aleación de tungsteno para oscilador de filtro de estación base de comunicación 5G

Los filtros de las estaciones base de comunicación 5G han establecido estándares sin precedentes en cuanto a la distribución de masa, la estabilidad dimensional, el rendimiento térmico y la fiabilidad a largo plazo de los osciladores. Las esferas de aleación de tungsteno, gracias a su altísima densidad, excelente adaptación de la expansión térmica, excepcional resistencia a la fatiga y maquinabilidad de precisión, se han convertido en el elemento de sintonización y equilibrado idóneo para los osciladores en antenas MIMO de gran escala y filtros de cavidad de alta potencia, impulsando la continua evolución de las redes 5G hacia frecuencias más altas, mayor ancho de banda y menor latencia.

En las antenas MIMO masivas 5G y los filtros frontales de RF, la optimización de la frecuencia de resonancia y el ancho de banda del vibrador requiere una carga de masa precisa. Esferas de aleación de tungsteno se incrustan o adhieren con precisión a los extremos, el centro o la punta del brazo del vibrador. Su altísima densidad volumétrica permite que el vibrador reduzca significativamente la frecuencia de resonancia sin modificar sus dimensiones externas, o que reduzca drásticamente su volumen a la misma frecuencia, lo que proporciona una mayor separación entre elementos y una menor interferencia por acoplamiento mutuo para la matriz de antenas. La superficie de la esfera está pulida a espejo y tratada con un recubrimiento especial que no solo garantiza una uniformidad absoluta en la distribución de la masa, sino que también reduce considerablemente la pérdida por efecto pelicular causada por la corriente superficial de alta frecuencia, manteniendo la pérdida de inserción del filtro al mínimo.

En los filtros de estaciones base de alta potencia, las esferas de aleación de tungsteno desempeñan un papel crucial en el equilibrio térmico y la resistencia a la deformación térmica. Sus coeficientes de expansión térmica coinciden en gran medida con los del sustrato del oscilador, ya sea de cobre o aluminio. En entornos con fuertes aumentos de temperatura provocados por la transmisión de alta potencia, las esferas se expanden y contraen de forma sincronizada con el oscilador, evitando la deriva de frecuencia o el agrietamiento estructural causado por la concentración de tensiones térmicas. Simultáneamente, la excelente conductividad térmica de las esferas de aleación de tungsteno permite una rápida conducción del calor al sustrato del oscilador. En combinación con sistemas de refrigeración por aire o por líquido, esto mantiene la temperatura del oscilador dentro de un rango seguro, garantizando que la estación base mantenga la estabilidad de frecuencia y la capacidad de potencia incluso a plena carga.

El uso de esferas de aleación de tungsteno no magnéticas elimina por completo el impacto negativo de

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



las pérdidas por histéresis y el calor generado por corrientes parásitas en el factor Q del filtro. Esta característica, especialmente en filtros de modo dual que combinan tecnologías de sub-6 GHz y ondas milimétricas, permite que el sistema mantenga una selectividad y un aislamiento extremadamente altos en una amplia banda de frecuencias. La elevada dureza y resistencia a la fatiga de las esferas también les permiten mantener su posición y estabilidad de calidad bajo condiciones prolongadas de vibración y ciclos de temperatura en estaciones base, evitando los problemas de aflojamiento, desgaste o rotura que suelen presentar las esferas tradicionales de acero o cerámica.

En la fase de preinvestigación del 6G y la exploración de la comunicación en terahercios, se utilizan esferas de aleación de tungsteno para el ajuste preciso de cavidades resonantes ultracompactas y unidades de metamateriales. Su alta densidad y baja expansión térmica permiten que el oscilador mantenga la precisión de la resonancia incluso a frecuencias más altas y cargas térmicas extremas, proporcionando un soporte material crucial para los futuros avances en la comunicación inalámbrica hacia bandas de frecuencia más elevadas. Estas diminutas esferas de aleación de tungsteno regulan silenciosamente el flujo preciso de enormes cantidades de señales de radiofrecuencia, convirtiéndose en "guardianes de frecuencia" invisibles pero indispensables para las redes 5G e incluso las futuras redes 6G que cubren el planeta y hacen posible el Internet de las Cosas. Convierten cada estación base en un nodo fiable en la autopista de la información, permitiendo que las capacidades de comunicación humana alcancen un nuevo salto cualitativo.

#### 5.4.6 Rotor de reloj de alta gama y bola de aleación de tungsteno para cuerda automática

A ojos de los maestros relojeros suizos y alemanes, las esferas de aleación de tungsteno hace tiempo que trascendieron los metales comunes, convirtiéndose en el material esencial para el rotor automático y el sistema de cuerda de los relojes mecánicos de alta gama. Gracias a su extrema densidad, perfecta estabilidad dimensional, cautivador brillo metálico y excelente compatibilidad con metales preciosos, ha elevado la estética mecánica y el rendimiento físico de estos relojes a nuevas cotas, convirtiéndose en un sello distintivo de marcas prestigiosas como Patek Philippe, Vacheron Constantin, A. Lange & Söhne, Rolex y Omega.

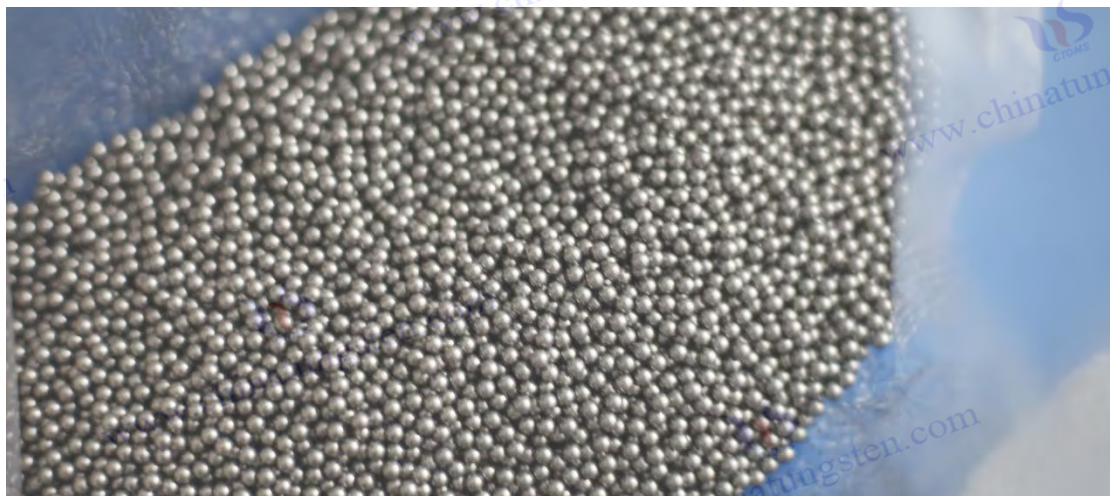
El rotor automático es el componente esencial de un reloj mecánico que permite su cuerda automática. Su masa y la distribución de su centro de gravedad determinan directamente la eficiencia de la cuerda, la suavidad de la sensación al usarlo y el equilibrio dinámico. Bolas de aleación de tungsteno se colocan o atomillan con precisión en el borde o el interior de un rotor de oro de 18 quilates, platino o aleación de titanio, formando diversas figuras como media luna, círculo completo o microrrotor. La altísima densidad de la aleación de tungsteno permite que el rotor genere un momento de inercia muy superior al del oro o el platino en un radio muy pequeño. Basta con que el usuario mueva ligeramente la muñeca para que el rotor transfiera eficientemente la energía cinética al muelle real, logrando una cuerda completa más rápida y fluida. En comparación con el diseño tosco de los rotores de latón tradicionales con tornillos de contrapeso, las bolas de aleación de tungsteno permiten que el diseño del rotor recupere una estética geométrica pura: líneas más elegantes, menor grosor y mayor transparencia visual, sin sacrificar una mayor capacidad de cuerda.

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El tratamiento superficial es la parte más meticulosa del uso de esferas de aleación de tungsteno en la relojería. Tras decenas de procesos de pulido espejo, la esfera exhibe un profundo brillo metálico, creando un elegante contraste con el rotor de oro rosa, platino o fibra de carbono. Algunas piezas de alta gama incluso aplican una finísima capa de PVD en oro negro o azul a la superficie de la esfera de aleación de tungsteno, lo que le permite refractar una misteriosa textura espacial bajo diferentes condiciones de luz. La esfera se fija al cuerpo del rotor mediante microtornillos, incrustaciones o soldadura láser, lo que garantiza que nunca se aflojará ni se desplazará durante décadas o incluso siglos de uso.

En los relojes ultrafinos y complejos, las ventajas de las bolas de aleación de tungsteno son aún más evidentes. Los sistemas de cuerda automática en miniatura suelen tener un espacio extremadamente limitado, y los metales preciosos tradicionales ya no proporcionan la inercia suficiente. Sin embargo, las bolas de aleación de tungsteno pueden alcanzar una gran masa en un volumen muy reducido, lo que permite a los relojeros integrar rotores bidireccionales o externos en miniatura en cajas de menos de diez milímetros de grosor. Esto posibilita que complicaciones de alta gama, como repetidores de minutos ultrafinos, calendarios perpetuos y cronógrafos de ratrapante, cuenten con sistemas de cuerda automática fiables. Algunas marcas pioneras incluso han introducido el concepto de "rotor totalmente de tungsteno", que combina una bola de aleación de tungsteno con una placa de la misma aleación, convirtiendo el rotor en sí mismo en una obra de arte industrial fría y austera.

La bola de aleación de tungsteno elimina por completo el riesgo de magnetización en el espiral y el sistema de escape, mientras que su resistencia a la corrosión y a la oxidación garantiza que se mantenga como nueva durante décadas, incluso con la exposición diaria al sudor, perfumes y agua de mar. Es esta capacidad de integrar el máximo rendimiento físico con la máxima estética lo que eleva la bola de aleación de tungsteno de un material secundario al símbolo más representativo de un reloj de alta gama. Cuando los aficionados a la relojería hablan de "acero de tungsteno", "tungsteno al carbono" o "tungsteno negro", no se refieren solo a la dureza; expresan una admiración compartida por la artesanía y los materiales de la más alta calidad. Esto permite que cada reloj mecánico de alta gama no solo marque el tiempo, sino que también encarne la máxima búsqueda de la humanidad por la precisión y la belleza.



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## Capítulo 6 : Problemas comunes de calidad y soluciones para bolas de aleación de tungsteno

### 6.1 Causas y métodos de eliminación de grietas superficiales en esferas de aleación de tungsteno

Las grietas superficiales son el defecto de calidad más común y fácil de detectar en [las bolas de aleación de tungsteno](#). Las grietas menores pueden afectar la apariencia y la resistencia a la corrosión, mientras que las grietas mayores pueden provocar fatiga o el inicio de fallas por laminación. Su mecanismo de formación es complejo e involucra casi todos los procesos clave, como las materias primas, el conformado, la sinterización, el tratamiento térmico y el rectificado. Solo mediante la combinación de un rastreo sistemático del origen con una prevención multidimensional se puede reducir su tasa de aparición prácticamente a cero.

La principal causa de agrietamiento radica en el desequilibrio de tensiones residuales durante las etapas de sinterización y enfriamiento. Durante la sinterización en fase líquida, la fase aglutinante se solidifica y contrae rápidamente, mientras que el esqueleto de partículas de tungsteno apenas se contrae. La diferencia en sus coeficientes de expansión térmica genera una tensión de tracción significativa durante el enfriamiento. Cuando esta tensión supera la resistencia local de la fase aglutinante, se forman microfisuras en la superficie o cerca de ella. Velocidades de enfriamiento excesivas, campos de temperatura desiguales dentro del horno, una densidad de carga de la palanquilla excesivamente alta o la presencia de un gradiente de densidad dentro de la propia palanquilla pueden amplificar significativamente esta concentración de tensiones. Las fisuras producidas por el prensado en frío durante la etapa de conformado o los pliegues residuales de los moldes de caucho prensados isostáticamente también pueden magnificarse y convertirse en fisuras visibles durante la sinterización.

La etapa de rectificado es otra fuente importante de fisuras. En el rectificado multietapa, la eliminación inadecuada de material, el uso de abrasivos excesivamente gruesos, la refrigeración insuficiente o la presión de rectificado excesiva pueden generar microfisuras en la capa de partículas de tungsteno, dura y quebradiza. La típica estructura bifásica de las esferas de aleación de tungsteno —con su prominente esqueleto de partículas de tungsteno y su fase aglutinante empotrada— las hace excepcionalmente sensibles a los procesos de rectificado. Una vez que los parámetros del proceso se desequilibran, las microfisuras se propagan rápidamente a lo largo de los límites de las partículas de tungsteno, formando finalmente fisuras radiales o reticulares visibles. Un tratamiento térmico inadecuado (como una temperatura de recocido al vacío insuficiente o velocidades de calentamiento y enfriamiento excesivamente rápidas) también puede mantener o reintroducir tensiones superficiales, creando un entorno propicio para la aparición de fisuras en etapas posteriores.

La eliminación de grietas superficiales requiere un control de lazo cerrado durante todo el proceso, de principio a fin. En primer lugar, se optimiza el proceso de sinterización: se emplean curvas de enfriamiento controladas de baja velocidad y múltiples segmentos, se ajusta con precisión el punto de transformación de fase en estado sólido de la fase aglutinante a la plataforma de sujeción y se garantiza una separación adecuada entre las piezas y esferas dentro del horno para asegurar la uniformidad del campo de temperatura. Para esferas de gran diámetro o con alto contenido de tungsteno, se añade un

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proceso intermedio de revenido isotérmico para liberar completamente la tensión de la fase líquida. En segundo lugar, se refuerza la uniformidad de la densidad durante la etapa de conformado. Se prefiere el prensado isostático en frío al moldeo unidireccional, y todas las piezas se someten a pruebas de densidad por rayos X o ultrasonidos después del prensado. Cualquier pieza con un gradiente de densidad superior al estándar se vuelve a forjar directamente en el homo.

La etapa de rectificado emplea una filosofía progresiva de "lotes pequeños, múltiples pasadas, rectificado suave y pulido duro": el rectificado grueso utiliza medios cerámicos de alta tenacidad y refrigerante suficiente; el rectificado medio y fino reduce gradualmente la tasa de eliminación de material; y las tres a cinco etapas finales de pulido utilizan suspensión de nanodiamante y equipos magnetorreológicos o asistidos por ultrasonidos para eliminar por completo las capas dañadas por el procesamiento. Tras cada etapa de rectificado, todas las esferas deben someterse a una limpieza ultrasónica de alta presión y a una inspección del 100 % con un detector óptico automático de grietas; cualquier grieta sospechosa se vuelve a pulir inmediatamente o se descarta.

En el proceso de tratamiento térmico, se introduce un recocido de alivio de tensiones al vacío, a baja temperatura y durante un tiempo prolongado, como postratamiento estándar. Para esferas de precisión y de grado médico, se añaden recocidos secundarios y ciclos criogénicos profundos con nitrógeno líquido para neutralizar aún más la tensión residual. La pasivación química superficial o el recubrimiento PVD de capa fina también pueden sellar eficazmente los posibles puntos de inicio de microfisuras y mejorar la resistencia a la corrosión. Mediante esta ingeniería sistemática multifactorial, las empresas líderes del sector han reducido la incidencia de fisuras superficiales a menos de una por cada diez mil unidades por lote, e incluso han logrado cero reclamaciones de clientes durante varios años consecutivos. Las fisuras superficiales se han transformado por completo, pasando de ser un problema persistente a un indicador rutinario prevenible y controlable, lo que proporciona la garantía de calidad más sólida para que las esferas de aleación de tungsteno gocen de una confianza absoluta en los escenarios de aplicación más exigentes.

## **6.2 Ajuste y prevención de desviaciones dimensionales fuera de tolerancia de las bolas de aleación de tungsteno**

Las desviaciones dimensionales fuera de tolerancia son el problema de calidad más directo que afecta la intercambiabilidad y la fiabilidad del ensamblaje de las bolas de aleación de tungsteno. Esto es especialmente cierto en aplicaciones con tolerancia cero para la precisión geométrica, como colimadores médicos, rodamientos de precisión, pesas metrológicas y rotores de relojes de alta gama. Una sola bola fuera de tolerancia puede provocar la devolución de un lote completo o incluso el fallo del sistema. Las causas de estas desviaciones están interrelacionadas a lo largo de todo el proceso de moldeo, sinterización y rectificado. Solo estableciendo un ciclo cerrado completo, desde la prevención en origen hasta la compensación precisa al final, se puede mantener la consistencia dimensional al más alto nivel a largo plazo. La etapa de moldeo es la fuente inicial de desviaciones dimensionales. Si bien el prensado isostático en frío es superior al moldeo por compresión, si el molde de caucho envejece, la ventilación es incompleta o la transmisión de presión es irregular, se formarán protuberancias o depresiones locales en

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



la superficie de la pieza en bruto, lo que afectará directamente a las esferas sinterizadas. El prensado en frío es más propenso a las diferencias de densidad entre las caras superior e inferior, lo que genera una contracción de sinterización inconsistente y, en última instancia, una elipticidad excesiva en el diámetro. La solución radica en un mantenimiento riguroso de los moldes y equipos: reemplazo periódico de los moldes de caucho, ventilación al vacío estricta antes del prensado, calibración sincronizada en tiempo real de la prensa y escaneo láser de tamaño completo de cada pieza en bruto. Cualquier pieza en bruto que exceda la tolerancia se vuelve a forjar directamente en el horno, eliminando así los posibles problemas dimensionales desde su origen.

La contracción por sinterización es la principal variable en la desviación dimensional. Durante la sinterización en fase líquida, la humectación y la reorganización de la fase aglutinante, así como la disolución y reprecipitación de las partículas de tungsteno, contribuyen a la contracción total. La velocidad de contracción se ve influenciada por una combinación de factores, como la temperatura, el tiempo de mantenimiento, la atmósfera del horno y el método de carga de las piezas. Las piezas esféricas ubicadas en diferentes puntos del mismo horno pueden contraerse de forma inconsistente debido a ligeras diferencias en el campo térmico, lo que genera una mayor dispersión del diámetro. La medida preventiva más eficaz en la industria consiste en establecer un sistema de "sinterización con gemelo digital": antes de cada ciclo de horno, se mide con precisión la velocidad de contracción real utilizando piezas de prueba, y el diámetro objetivo de la pieza se corrige en tiempo real; se utiliza un control de temperatura independiente multizona y bandejas giratorias de muestra en el horno para garantizar un campo térmico uniforme en todas las direcciones; las esferas de precisión se cargan en el horno en una sola capa para eliminar por completo los gradientes de contracción causados por la obstrucción del apilamiento. Las líneas de producción de alta gama incluso incorporan sistemas de medición óptica del diámetro in situ para monitorizar la curva de contracción en tiempo real durante la etapa de sinterización a alta temperatura, logrando una regulación por retroalimentación de bucle cerrado.

La etapa de rectificado es la etapa final para la formación y compensación de desviaciones dimensionales. El rectificado tradicional por lotes es propenso a la dispersión dimensional debido al desgaste del medio, la variación en la concentración del fluido de rectificado o las colisiones entre esferas. Las esferas de alta precisión difícilmente toleran esta aleatoriedad. La solución moderna consiste en adoptar un proceso que combina el rectificado de precisión de esferas individuales con el rectificado de compensación gradual: el rectificado grueso y medio aún utiliza equipos planetarios o verticales de alta precisión, pero después de cada etapa, se realiza una clasificación láser 100% automática para dividir las esferas en docenas de intervalos estrechos según su tamaño real; las etapas de rectificado fino y pulido utilizan fórmulas, equipos y parámetros individuales para la compensación y eliminación específicas, y finalmente todas las esferas se normalizan con precisión dentro de la zona de tolerancia dimensional objetivo. Las esferas de ultraprecisión para uso médico y metrológico van un paso más allá, utilizando alimentación robótica de esferas individuales y acabado de precisión magnetorreológico o por haz de iones de esferas individuales para garantizar que el diámetro y la esfericidad de cada esfera sean controlables de forma independiente.

El objetivo final para prevenir desviaciones dimensionales es una cadena de datos de circuito cerrado a

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo largo de todo el proceso. Las fábricas modernas han implementado un sistema único de vinculación mediante códigos QR, desde lotes de mezcla de polvo, registros de prensado, ciclos de sinterización y lotes de molienda hasta las dimensiones finales. Cualquier lote con anomalías dimensionales puede rastrearse hasta el proceso de origen en cuestión de segundos, y los parámetros del proceso pueden ajustarse rápidamente. Combinado con modelos predictivos de IA, el sistema puede incluso predecir la distribución de tamaño final durante la etapa de conformado, ajustando los parámetros de prensado y sinterización con antelación para eliminar las desviaciones desde su origen.

Mediante el enfoque de ingeniería sistemática mencionado, que incluye una estricta prevención en origen, un control preciso del proceso, compensación al final del proceso y gestión de datos en circuito cerrado, las empresas líderes del sector han estabilizado la desviación del diámetro de lote de bolas de aleación de tungsteno de precisión dentro del nivel micrométrico, y han logrado fácilmente una consistencia de diez micrómetros para las bolas de grado estándar. Esto satisface plenamente la exigencia de los clientes más exigentes: «miles de bolas exactamente iguales».

### 6.3 Tratamiento del problema de la densidad desigual y la segregación de esferas de aleación de tungsteno

La densidad no uniforme y la segregación composicional son los defectos más insidiosos y destructivos en la calidad intrínseca de las esferas de aleación de tungsteno. Una vez que se presentan, pueden provocar discrepancias en el rendimiento de lotes, fallas en los contrapesos, fugas en el blindaje, desequilibrios inerciales e incluso una crisis de confiabilidad en todo el equipo. La causa principal radica en la diferencia de densidad y de comportamiento de humectación entre el tungsteno y la fase aglutinante a microescala. Solo mediante un control sistemático a lo largo de toda la cadena, desde la mezcla del polvo hasta la densificación por sinterización, el enfriamiento y la solidificación, se puede reducir su impacto a un nivel insignificante.

La etapa de mezclado de polvos es el principal foco de segregación. El polvo de tungsteno difiere significativamente en densidad de los polvos de níquel, hierro y cobre. Incluso pequeñas zonas muertas o un tiempo de mezclado insuficiente en mezcladoras convencionales de tipo V o de doble cono pueden provocar un enriquecimiento o agotamiento localizado de la fase aglutinante. La solución industrial más consolidada consiste en utilizar un molino planetario de bolas de alta energía o una mezcladora de vórtice tridimensional, combinados con tecnología de granulación por secado por atomización, para garantizar que cada partícula de polvo de tungsteno esté recubierta uniformemente con la fase aglutinante y el agente de recubrimiento orgánico, formando partículas compuestas casi esféricas y eliminando así la estratificación por gravedad y la segregación por vibración en origen. Inmediatamente después del mezclado, se toman muestras para realizar análisis metalográficos de sección transversal y espectroscopia de dispersión de energía (EDS). Cualquier indicio de segregación conlleva la remezcla de todo el lote para asegurar que el polvo que entra en la etapa de moldeo alcance una uniformidad ideal a nivel microscópico.

La transmisión desigual de presión durante el moldeo es otro factor importante. Una sincronización

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

deficiente de los punzones o una fricción excesiva en las paredes del molde durante el prensado en frío pueden crear zonas con gradiente de densidad dentro de la pieza. Si bien el prensado isostático es superior al prensado en frío, el envejecimiento del molde de caucho o una ventilación deficiente aún pueden generar zonas localizadas de baja densidad. La solución radica en la monitorización de la presión durante todo el proceso y el mapeo de la densidad de la pieza: las prensas en frío están equipadas con sensores de presión multipunto para la corrección en tiempo real; bloques de medición de densidad se insertan previamente en la carcasa de la prensa isostática para su análisis y verificación tras el prensado en el mismo lote; y todas las piezas deben someterse a un análisis de densidad mediante rayos X o ultrasonidos tras el desmoldeo, descartándose inmediatamente cualquier zona anómala o devolviéndola al horno.

La etapa de sinterización representa un periodo de alto riesgo para la inhomogeneidad de la densidad y la segregación. Durante la sinterización en fase líquida, si la temperatura aumenta demasiado rápido o el tiempo de mantenimiento es insuficiente, la fase aglutinante puede no mojar completamente las partículas de tungsteno antes de que se produzca un flujo localizado, lo que da lugar a zonas de baja densidad o zonas ricas en fase aglutinante. Si la velocidad de enfriamiento se descontrola durante esta etapa, la solidificación y contracción desiguales de la fase aglutinante pueden ejercer tracción sobre la estructura de tungsteno, formando huecos internos o zonas de segregación. La medida de prevención y control más eficaz consiste en establecer un proceso térmico segmentado y preciso: durante la etapa de calentamiento, se utiliza un aumento gradual de la temperatura en varias etapas para garantizar la fusión uniforme de la fase aglutinante; durante la etapa de mantenimiento en fase líquida, se ajusta con precisión el intervalo de humectación óptimo para permitir que las partículas de tungsteno se reorganicen, disuelvan y precipiten completamente; durante la etapa de enfriamiento, se implementa un enfriamiento programado, comenzando rápido y luego disminuyendo la velocidad, combinado con una plataforma giratoria en el horno y calentamiento independiente en múltiples zonas para eliminar por completo los gradientes térmicos. Las líneas de producción de alta gama incluso introducen imágenes de rayos X in situ para controlar la consistencia de la contracción por sinterización, y los parámetros se ajustan inmediatamente al detectar cualquier anomalía.

El tratamiento térmico y el pulido posteriores también pueden corregir la segregación existente. El recocido al vacío a baja temperatura y durante un tiempo prolongado favorece la difusión y homogeneización de la fase aglutinante residual, mientras que el pulido asistido por vibración ultrasónica mejora la uniformidad general al eliminar una pequeña cantidad de la capa superficial segregada. Sin embargo, lo más fundamental sigue siendo la extrema estabilidad de los procesos previos. Solo cuando se optimiza la uniformidad de las tres etapas principales de mezclado, conformado y sinterización, se evita tener que intervenir a posteriori en las etapas posteriores.

Mediante un enfoque de ingeniería sistemático que abarca la granulación compuesta de la materia prima, el mapeo de la presión de moldeo, el control térmico segmentado de la sinterización, la optimización del gradiente de enfriamiento y el seguimiento no destructivo de la densidad de extremo a extremo, las empresas líderes del sector han controlado la desviación de densidad interna de las esferas de aleación de tungsteno hasta un nivel prácticamente indetectable. Esto les permite lograr una uniformidad absoluta en miles de esferas para las aplicaciones más exigentes, como colimadores médicos, volantes de inercia

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de precisión y relleno de blindaje nuclear. La inhomogeneidad y la segregación de la densidad, antes consideradas «problemas inherentes al proceso», se han transformado en indicadores rutinarios prevenibles, medibles y controlables, lo que proporciona la garantía de calidad intrínseca fundamental para que las esferas de aleación de tungsteno gocen de una absoluta confianza en las aplicaciones de gama alta.

#### **6.4 Mejora de los defectos de porosidad y holgura en la superficie de esferas de aleación de tungsteno**

La porosidad y la falta de adherencia superficial son los obstáculos más persistentes en el proceso de densificación de las bolas de aleación de tungsteno. No solo perjudican la suavidad de la superficie y la resistencia a la corrosión, sino que también se convierten en focos de grietas y puntos débiles en la resistencia durante las etapas posteriores de rectificado y pulido, llegando incluso a provocar el desecho de lotes enteros de bolas de colimación médica de alta gama o bolas de rodamientos de precisión. El mecanismo de formación se debe fundamentalmente a la evacuación incompleta de gases o al llenado insuficiente de la fase líquida durante la sinterización. Solo mediante mejoras sistemáticas en toda la cadena, desde las materias primas hasta el enfriamiento, pasando por el conformado y la sinterización, se puede reducir la incidencia de estos defectos prácticamente a cero, permitiendo que las bolas de aleación de tungsteno alcancen una densidad teórica uniforme y una microestructura perfecta.

Las causas principales de la porosidad y la falta de consistencia se remontan a la etapa de la materia prima. El oxígeno y el vapor de agua adsorbidos en la superficie del polvo de tungsteno y del aglutinante, así como el aire introducido durante la mezcla, si no se eliminan por completo, precipitan como gas durante la sinterización a alta temperatura. Sin embargo, debido a una viscosidad insuficiente de la fase líquida o a una compactación insuficiente, estos gases quedan atrapados internamente, formando finalmente poros superficiales o subsuperficiales tras el enfriamiento. Las zonas de baja densidad o las grietas de prensado en la etapa de conformado proporcionan espacio para la retención de gas. Durante la sinterización, el llenado de la fase líquida en estas zonas se retrasa, lo que provoca una contracción desigual y la formación de zonas sueltas. Los parámetros incontrolados del proceso de sinterización son un factor clave en la amplificación de defectos: un calentamiento excesivamente rápido impide la liberación de impurezas volátiles, una conservación insuficiente del calor conlleva una reorganización inadecuada de las partículas de tungsteno y velocidades de enfriamiento inadecuadas provocan que la fase aglutinante se solidifique y contraiga, ejerciendo presión sobre la estructura de tungsteno y creando huecos internos que se extienden hasta la superficie.

Las estrategias de mejora deben priorizar la prevención y abordar las causas raíz. En primer lugar, en la etapa de pretratamiento de la materia prima, se debe reforzar la combinación de desgasificación al vacío y reducción con hidrógeno para minimizar el contenido de oxígeno del polvo. La mezcla debe realizarse al vacío o en atmósfera inerte para evitar la contaminación secundaria del aire. Durante el moldeo, se debe priorizar el prensado isostático en frío con un tiempo de mantenimiento prolongado para garantizar que la densidad inicial del cuerpo en verde sea lo más alta y uniforme posible, libre de fisuras. En la etapa de sinterización, se debe implementar un proceso térmico refinado de calentamiento a baja

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



velocidad, desgasificación en varias etapas y control preciso de la fase líquida: se deben establecer varias plataformas de mantenimiento a baja temperatura en la etapa de calentamiento inicial para permitir que los gases y volátiles adsorbidos escapen lentamente; una vez que aparece la fase líquida, se debe prolongar el tiempo de mantenimiento y vibrar ligeramente el horno para favorecer el ascenso y la evacuación de los gases; en la etapa de enfriamiento, se debe utilizar un enfriamiento controlado extremadamente lento para evitar la presión negativa que se ejerce sobre los poros internos cuando la fase líquida se solidifica.

Para tochos con porosidad y falta de consistencia, el prensado isostático en caliente secundario es actualmente la solución más eficaz. El tocho defectuoso se coloca en una atmósfera de argón a alta temperatura y presión. La diferencia de presión entre el exterior y el gas residual interno provoca el cierre de los poros, mientras que la alta temperatura favorece la fluidez del aglutinante para rellenar las zonas sueltas, logrando así la autorreparación de los defectos. Las líneas de producción de alta gama incluso transfieren directamente el tocho a un horno de prensado isostático en caliente tras la sinterización al vacío, realizando un doble proceso en un solo horno y eliminando por completo el riesgo de oxidación durante la exposición intermedia.

Las etapas posteriores de rectificado y pulido también requieren una optimización específica. Para la porosidad superficial, el polvo de diamante micronizado combinado con el rectificado asistido por ultrasonidos permite eliminar los defectos evitando la aparición de nuevas grietas. Para la porosidad subsuperficial, la eliminación se realiza por etapas, controlando la cantidad de material eliminado: primero, un rectificado grueso para exponer la capa defectuosa, y luego un rectificado fino y pulido para restaurar la integridad de la superficie. Finalmente, todas las esferas deben someterse a una inspección completa mediante tomografía computarizada industrial de alta resolución o microscopía ultrasónica, y cualquier esfera con porosidad residual excesiva se rechaza directamente o se refunda.

Mediante un enfoque de ingeniería sistemático que abarca la purificación extrema de la materia prima, el moldeo altamente uniforme, el control térmico preciso durante la sinterización, el prensado isostático en caliente secundario para la corrección de defectos y un sistema de ensayos no destructivos de circuito cerrado, los líderes de la industria han reducido la porosidad superficial y los defectos de holgura a niveles prácticamente indetectables, logrando una calidad interna verdaderamente impecable en las esferas de aleación de tungsteno. Esta búsqueda intensiva de la perfección no solo mejora significativamente las tasas de homologación del producto y la satisfacción del cliente, sino que también consolida una posición insustituible para las esferas de aleación de tungsteno en sectores con estrictos requisitos de integridad interna, como colimadores médicos, rodamientos de precisión y contrapesos de alta gama. Garantiza que cada esfera de aleación de tungsteno que sale de fábrica sea un cristal microscópicamente perfecto y, además, representa la búsqueda constante del ideal de "cero defectos" en la ciencia de los materiales.

## 6.5 Técnicas de corrección de esfericidad y redondez en aleaciones de tungsteno

Las desviaciones de esfericidad y redondez son los defectos más críticos en la precisión geométrica de

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

las bolas de aleación de tungsteno. Pueden provocar directamente un rodamiento deficiente, mayor vibración, atascos en el montaje e incluso fallos funcionales. Esto es especialmente cierto en aplicaciones que requieren una geometría esférica casi perfecta, como los orificios de enfoque de colimadores médicos, las bolas de rodamientos de precisión y los rotores de relojes de alta gama. Incluso la más mínima desviación es intolerable. Las causas principales de estas desviaciones suelen residir en los efectos acumulativos de múltiples factores, como un conformado irregular, una contracción de sinterización incontrolada, parámetros de rectificado desequilibrados y una liberación inadecuada de la tensión térmica. Solo mediante el establecimiento de una cadena completa de tecnología de calibración, desde la prevención hasta la compensación y la inspección final, se puede controlar la esfericidad y la redondez de forma estable con la máxima precisión, haciendo que las bolas de aleación de tungsteno sean verdaderamente sinónimo de "esferas perfectas".

La presión desigual durante el moldeo es la principal causa de defectos de esfericidad. Durante el prensado en frío, si los punzones no están sincronizados o las paredes del molde experimentan una fricción excesiva, aparecerán zonas localizadas de alta y baja densidad en la pieza. Durante la contracción por sinterización, estas zonas se contraen a ritmos diferentes, adquiriendo finalmente formas elípticas o poliédricas. Aunque el prensado isostático tiene una presión isotrópica, el envejecimiento del molde de caucho o una ventilación deficiente pueden producir microarrugas o gradientes de densidad. La clave para prevenir estos defectos reside en el mantenimiento meticuloso y la optimización del proceso del equipo de moldeo: las prensas en frío están equipadas con sensores multipunto sincrónicos para la corrección en tiempo real; las camisas de prensado isostático utilizan materiales nuevos de alta elasticidad y se someten a una estricta ventilación al vacío; simultáneamente, tras el prensado, se escanea con láser toda la superficie de la pieza para crear un modelo de mapeo de densidad-geométrico; cualquier forma anómala se corrige de inmediato, eliminando así el potencial de defectos desde su origen.

La contracción incontrolada durante la sinterización es el principal factor que amplifica las desviaciones de redondez. El flujo no homogéneo de la fase aglutinante y la reorganización de las partículas de tungsteno durante la sinterización en fase líquida generan diferencias en las tasas de contracción en distintas partes de la esfera. Durante el enfriamiento, la tensión térmica estira aún más la superficie, formando pequeñas áreas aplanadas o protuberantes. Las técnicas de corrección en esta etapa se manifiestan en un diseño preciso del proceso térmico: las curvas de calentamiento lentas y multisegmento garantizan la fusión uniforme de la fase aglutinante; el tiempo de mantenimiento se ajusta con precisión al rango óptimo de reorganización, combinado con una ligera vibración o bandejas giratorias dentro del horno para promover un movimiento simétrico de las partículas; y el enfriamiento controlado programado, que comienza rápido y luego se ralentiza, evita el sobreenfriamiento localizado que genera tensión. Las líneas de producción de alta gama incorporan sistemas de monitorización óptica in situ para capturar los cambios en tiempo real del contorno de la esfera durante la etapa de sinterización a alta temperatura. Una vez detectada la contracción asimétrica, la distribución de potencia del horno se ajusta inmediatamente para lograr una sinterización adaptativa en circuito cerrado, asegurando que la pieza salga del horno prácticamente esférica. La etapa de rectificado y pulido es la fase final para corregir las desviaciones de esfericidad y redondez. El rectificado tradicional por lotes produce fácilmente aplanamientos aleatorios o formas multifacéticas debido al impacto entre las esferas. La tecnología

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

moderna de corrección de precisión se basa completamente en una combinación de "control de precisión de esfera individual" y "compensación gradual". Tras el rectificado grueso y medio, las esferas se someten a una clasificación automática de alta precisión, entrando en diferentes canales de compensación según sus desviaciones de redondez reales. En la etapa de rectificado fino, se utiliza equipo de pulido magnetorreológico o de acabado por haz de iones. Las esferas se adsorben al vacío en estaciones de trabajo individuales, y el medio de pulido se adapta flexiblemente a la superficie de la esfera, logrando una eliminación isotrópica real y eliminando por completo el rectificado excesivo o insuficiente local. La asistencia ultrasónica y la retroalimentación en tiempo real de la medición láser en línea garantizan que la cantidad de material eliminado de cada esfera sea precisa a nivel submicrónico.

Para las esferas terminadas que exceden las tolerancias, la industria ha desarrollado diversas técnicas de corrección: el pulido químico-mecánico combinado con el grabado selectivo permite eliminar específicamente las áreas sobresalientes; el prensado isostático en caliente seguido de un pulido fino secundario cierra los microporos internos y redondea la forma; el tratamiento superficial más avanzado, la refusión láser, incluso repara pequeñas áreas aplanadas mediante fusión y resolidificación localizadas sin alterar las dimensiones generales. Todas las esferas corregidas deben verificarse con un medidor de redondez multiestación y una máquina de medición por coordenadas. Los datos de esfericidad y redondez se introducen en la base de datos en tiempo real y se vinculan a los registros de conformado y sinterización para conformar un proceso cerrado.

Gracias a la tecnología de calibración sistemática mencionada, que prioriza la prevención, complementa con compensación y establece un sistema de detección de bucle cerrado, la esfericidad y redondez de las esferas de aleación de tungsteno han evolucionado, pasando de ser un cuello de botella inicial difícil de controlar a lograrse de forma consistente con la máxima precisión. Esto garantiza que cada esfera que sale de fábrica se aproxime infinitamente a una esfera matemáticamente perfecta, cumpliendo no solo los requisitos de laminado y ensamblaje más exigentes, sino también proporcionando la garantía geométrica más fiable para un enfoque nítido en imágenes médicas, una estabilidad extrema en instrumentos de precisión y un funcionamiento fiable de equipos de alta gama. La búsqueda de la máxima esfericidad y redondez ha sido durante mucho tiempo la máxima expresión de la tecnología de fabricación de esferas de aleación de tungsteno, consolidando su posición inamovible en el campo de la fabricación de precisión.

## **6.6 Métodos para controlar la dureza de las bolas de aleación de tungsteno cuando es demasiado baja o demasiado alta**

La dureza excesiva o insuficiente es el problema de calidad más típico y controlable en la fluctuación de las propiedades mecánicas de las bolas de aleación de tungsteno. La primera conlleva una resistencia al desgaste insuficiente y fallos prematuros, mientras que la segunda puede provocar fisuras frágiles o dificultades de procesamiento. El control de la dureza no es una solución a posteriori, sino un proyecto sistemático que abarca todo el proceso: diseño de la composición, sinterización, tratamiento térmico y rectificado. Solo comprendiendo sus leyes inherentes e implementando una intervención sinérgica multidimensional se puede mantener la dureza estable dentro del rango objetivo, logrando un equilibrio

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

óptimo en el rendimiento y una alta consistencia entre lotes.

La causa principal de la baja dureza suele ser una unión insuficiente del esqueleto de partículas de tungsteno o una fase aglutinante demasiado blanda. Un bajo contenido de tungsteno, una temperatura de sinterización insuficiente o un tiempo de mantenimiento demasiado corto provocan un crecimiento insuficiente del cuello de las partículas de tungsteno, lo que resulta en una unión débil entre partículas y una disminución macroscópica de la dureza general. Una proporción excesivamente alta de fase aglutinante o el uso de un sistema a base de cobre con una ductilidad excesiva también diluyen la contribución de la dureza del tungsteno, lo que provoca un desgaste rápido de las esferas por fricción o impacto. La falta de aditivos traza también es un factor determinante; sin elementos de refuerzo como el cobalto y el molibdeno, la fase aglutinante no puede solidificarse ni fortalecerse eficazmente, lo que naturalmente resulta en una menor dureza.

El primer paso para controlar la baja dureza consiste en optimizar la composición. Incrementar adecuadamente el contenido de tungsteno o introducir elementos refractarios como cobalto, molibdeno y renio puede fortalecer significativamente la interfaz entre las partículas de tungsteno y la fase aglutinante, además de aumentar la resistencia de esta última. Prolongar el tiempo de mantenimiento a alta temperatura o utilizar calentamiento por etapas durante la sinterización favorece la disolución y reprecipitación completas de las partículas de tungsteno, formando cuellos de unión más grandes y redondeados. La sinterización secundaria al vacío o con hidrógeno puede eliminar aún más las inclusiones residuales de oxígeno, purificar la interfaz y mejorar la resistencia de la unión. El tratamiento térmico es el último recurso para esferas de baja dureza. El recocido prolongado a baja temperatura favorece la difusión de la fase aglutinante hacia las partículas de tungsteno, formando una capa de refuerzo transitoria. El envejecimiento en atmósfera controlada precipita fases dispersas finas, incrementando aún más la dureza general. El uso de abrasivos de diamante más duros y una mayor presión durante el rectificado también genera una capa endurecida por deformación en la superficie, compensando eficazmente la baja dureza del material base.

La dureza excesiva suele estar relacionada con un endurecimiento excesivo o la acumulación de tensiones. Un contenido excesivo de tungsteno, una temperatura de sinterización demasiado alta o un enfriamiento excesivamente rápido pueden provocar un crecimiento anormal de las partículas de tungsteno y la aparición de una zona con menor concentración de fase aglutinante, lo que resulta en un aumento repentino de la dureza macroscópica y un marcado incremento de la fragilidad. Un exceso de aditivos traza o un tratamiento térmico inadecuado también pueden generar demasiadas fases frágiles, lo que hace que las esferas sean propensas a romperse por impacto.

La clave para reducir la dureza excesiva reside en el ablandamiento y la relajación. A nivel de composición, se puede aumentar adecuadamente la proporción de la fase aglutinante o bien seleccionar un sistema de níquel-cobre con mayor ductilidad para diluir el efecto endurecedor del tungsteno. Durante la sinterización, se debe disminuir la temperatura máxima o prolongar el tiempo de mantenimiento de la fase líquida, seguido de un enfriamiento lento, para mantener las partículas de tungsteno con un tamaño adecuado y evitar tensiones internas excesivas. En la etapa de tratamiento térmico, se debe emplear

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



recocido al vacío a alta temperatura o recocido cíclico múltiple para favorecer la liberación de tensiones residuales y la homogeneización de la fase aglutinante, inhibiendo a la vez la precipitación de fases frágiles. Durante el rectificado y el pulido, se debe minimizar la cantidad de material eliminado y la presión aplicada para evitar la formación de una capa superficial excesivamente endurecida.

Para esferas acabadas con una dureza excesivamente alta, el ablandamiento químico superficial o la modificación por implantación iónica son métodos eficaces. El primero disuelve selectivamente las partículas de tungsteno que sobresalen de la superficie controlando la composición de la solución de grabado, mientras que el segundo ajusta la estructura cristalina superficial mediante la inyección de elementos inertes para lograr un gradiente de dureza gradual. Una vez completadas todas las medidas de control, se debe realizar un mapeo de dureza Vickers multipunto y una verificación de la tenacidad al impacto para asegurar que la dureza vuelva al rango objetivo y que no exista riesgo de fragilidad.

El control preciso de la dureza, ya sea demasiado baja o demasiado alta, demuestra la sofisticación y flexibilidad de la fabricación de bolas de aleación de tungsteno. No se trata simplemente de "endurecer" o "reducir" la dureza, sino de encontrar el punto de equilibrio óptimo entre múltiples dimensiones de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste mediante una sinergia sistemática de composición, proceso y tratamiento. Esta capacidad de control permite que las bolas de aleación de tungsteno cumplan simultáneamente múltiples requisitos, como la extrema resistencia al desgaste de las cribas vibratorias, la resistencia al rayado superficial de los colimadores médicos, la resistencia a la fatiga de los rodamientos de precisión y la resistencia a la deformación de los contrapesos de alta gama. También permite un cambio eficiente entre productos de diferentes niveles de dureza en la misma línea de producción, lo que mejora enormemente la flexibilidad de la producción y la capacidad de respuesta al mercado. No solo resuelve los problemas de calidad, sino que también es un potente motor para lograr un rendimiento personalizado y diversas funciones en las bolas de aleación de tungsteno.

## 6.7 Investigación y mejora de defectos de inclusión interna en esferas de aleación de tungsteno

### Análisis de las causas de los defectos de inclusión en esferas de aleación de tungsteno

La fabricación de esferas de aleación de tungsteno implica un proceso complejo con múltiples factores, como las materias primas, los procesos de producción y las condiciones ambientales. En primer lugar, la pureza y la calidad de las materias primas son fundamentales para el rendimiento del producto final. Si el polvo de tungsteno u otros elementos de aleación contienen impurezas traza o se contaminan durante el almacenamiento y el transporte, estas sustancias extrañas pueden incrustarse en la matriz durante el procesamiento posterior, formando inclusiones. Por ejemplo, las impurezas no metálicas, como óxidos o silicatos, pueden permanecer debido a reacciones químicas durante el proceso de fundición; mientras que las impurezas metálicas pueden originarse por el desgaste del equipo o la contaminación cruzada. Además, una distribución irregular del tamaño de las partículas o la aglomeración del polvo pueden exacerbar la segregación local de componentes, creando un entorno propicio para la aparición de defectos.

En segundo lugar, un control inadecuado de los parámetros en el proceso de producción es otro factor

#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

importante que conduce a defectos de inclusión. Durante las etapas de mezclado y prensado, si el polvo no se mezcla de forma suficiente y uniforme, o si la presión y la velocidad de prensado no coinciden, pueden producirse diferencias locales de densidad, formando poros microscópicos o zonas de acumulación de materia extraña. Durante la etapa de sinterización, el control de la temperatura, el tiempo y la atmósfera es especialmente crítico. Las temperaturas de sinterización excesivamente altas pueden provocar la volatilización de elementos o transformaciones de fase anómalas, mientras que las temperaturas excesivamente bajas pueden no eliminar completamente la porosidad. Asimismo, trazas de oxígeno o humedad en la atmósfera protectora pueden reaccionar con los elementos de aleación para formar inclusiones de óxido. Además, las velocidades de enfriamiento desiguales también pueden inducir tensiones internas, favoreciendo la acumulación de impurezas en los límites de grano.

Los factores ambientales son igualmente importantes. Si la limpieza de la planta de producción no cumple con los estándares, el polvo, el aceite u otras partículas suspendidas en el aire pueden adherirse a la superficie de las materias primas o los productos semielaborados y, eventualmente, quedar atrapadas en el interior del producto. Un mantenimiento inadecuado de los equipos, como el desgaste de los moldes o los residuos de lubricante, también puede introducir impurezas externas. Más específicamente, la negligencia humana, como el incumplimiento de las especificaciones del proceso o los procedimientos de limpieza, puede conducir indirectamente a la acumulación de contaminantes. En conclusión, las causas de los defectos de inclusión incluyen tanto las características inherentes de los materiales como las influencias externas del proceso y el entorno; es necesario un análisis sistemático para determinar con precisión el origen del problema.

### **Métodos y técnicas para detectar defectos de inclusión**

Para la detección de defectos de inclusión en esferas de aleación de tungsteno, la industria moderna ha desarrollado diversas tecnologías destructivas y no destructivas, cada una con sus propios escenarios de aplicación y limitaciones. Los ensayos no destructivos, gracias a su alta eficiencia y carácter no destructivo, se han convertido en el método predominante, destacando especialmente los ensayos ultrasónicos y radiográficos. Los ensayos ultrasónicos aprovechan las características de propagación de las ondas sonoras de alta frecuencia en los materiales. Cuando las ondas sonoras encuentran interfaces como las inclusiones, se reflejan o dispersan, y el tamaño y la ubicación de los defectos se pueden determinar analizando las señales de eco. Este método es sensible a poros microscópicos y a la incrustación de objetos extraños, y permite el escaneo automatizado; sin embargo, es necesario asegurar un buen acoplamiento entre la sonda y la superficie de la esfera para evitar errores de lectura. Los ensayos radiográficos, por otro lado, se basan en las diferencias en la absorción de rayos X o rayos gamma por distintos materiales para generar imágenes bidimensionales o tridimensionales de la estructura interna, lo que permite visualizar de forma intuitiva la morfología y la distribución de las inclusiones. Sin embargo, este método requiere una alta precisión del equipo y puede verse afectado por el grosor y la densidad de la muestra, lo que requiere la optimización del algoritmo para mejorar la resolución.

Además de los métodos mencionados, las pruebas de corrientes inducidas y de partículas magnéticas también se utilizan comúnmente para detectar defectos superficiales o subsuperficiales. La prueba de

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

corrientes inducidas se basa en el principio de inducción electromagnética y es sensible a las discontinuidades en materiales conductores, lo que la hace idónea para una detección rápida. La prueba de partículas magnéticas revela defectos en materiales ferromagnéticos mediante la distribución del campo magnético, pero está limitada a composiciones de aleación específicas. Asimismo, las tecnologías emergentes, como la tomografía computarizada (TC), permiten una reconstrucción tridimensional de alta precisión, proporcionando una visión tridimensional de la estructura espacial de las inclusiones y datos que respaldan el análisis cuantitativo. Sin embargo, su alto costo y su baja velocidad de análisis limitan su uso al trabajo de laboratorio o al muestreo aleatorio de componentes críticos.

Si bien las pruebas destructivas dañan las muestras, proporcionan información microscópica más detallada. El análisis metalográfico prepara las muestras mediante corte, pulido y ataque químico, lo que permite la observación microscópica de la morfología, la composición y el estado de unión de las inclusiones con la matriz, ayudando a rastrear el origen de los defectos. La microscopía electrónica de barrido combinada con espectroscopía de energía dispersiva puede determinar con mayor precisión la composición elemental de las inclusiones, distinguiendo entre fuentes endógenas y exógenas. Simultáneamente, las pruebas de propiedades mecánicas, como las de dureza o tracción, pueden evaluar indirectamente el impacto de los defectos en el rendimiento general, proporcionando una base para la mejora de procesos. En resumen, la selección de los métodos de ensayo requiere un equilibrio entre eficiencia, precisión y coste, así como el desarrollo de una estrategia de cribado multinivel basada en las condiciones reales de producción para garantizar la exhaustividad y la fiabilidad de la identificación de defectos.

### **medidas de mejora del proceso de producción**

Para reducir eficazmente los defectos de inclusión en las esferas de aleación de tungsteno, es necesario un control meticuloso e innovación tecnológica en cada etapa del proceso de producción. En primer lugar, durante el procesamiento de la materia prima, se debe controlar estrictamente la calidad del polvo, utilizando polvo de tungsteno y elementos de aleación de alta pureza, y eliminar la distribución del tamaño de partícula mediante tamizado y clasificación por flujo de aire. La introducción de procesos de pretratamiento, como la desgasificación al vacío o la purificación química, puede reducir aún más el contenido de impurezas. Asimismo, los entornos de almacenamiento y transporte deben mantenerse secos y limpios para evitar la contaminación cruzada; el uso de contenedores sellados y sistemas de transporte automatizados minimiza los riesgos asociados a la manipulación humana.

La optimización de los procesos de mezclado y prensado es crucial. El uso de molienda de bolas de alta energía o técnicas de aleación mecánica favorece la mezcla uniforme del polvo y disuelve los posibles aglomerados. Durante el prensado, se determinan la presión y el tiempo de mantenimiento óptimos mediante análisis de simulación para garantizar una densidad constante del compacto en verde. El uso del prensado isostático en lugar del prensado unidireccional reduce eficazmente los gradientes de densidad y los defectos en los bordes. El diseño de la matriz también debe considerar las propiedades reológicas para evitar la formación de microfisuras en las zonas de concentración de tensiones. Además, la introducción de un sistema de monitorización en línea proporciona información en tiempo real sobre

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

la presión y el desplazamiento, lo que facilita el ajuste oportuno de los parámetros y previene problemas relacionados con los lotes.

Como paso fundamental, la mejora de la sinterización se centra en el control del perfil de temperatura y la atmósfera. Se emplea una estrategia de sinterización segmentada: primero, se utiliza una temperatura baja para eliminar el aglutinante y, a continuación, se aumenta gradualmente hasta la temperatura máxima para permitir la difusión completa de los elementos de aleación sin una volatilización excesiva. La atmósfera de sinterización debe ser de hidrógeno de alta pureza o estar al vacío, con dispositivos de purificación de gases instalados para eliminar trazas de oxígeno y vapor de agua. Durante la etapa de enfriamiento, es necesario un enfriamiento controlado, como el enfriamiento gradual o la protección con gas inerte, para prevenir inclusiones secundarias inducidas por estrés térmico. Las técnicas de postprocesamiento, como el prensado isostático en caliente (HIP), reducen aún más la porosidad residual y mejoran la densificación; mientras que el pulido y la limpieza de la superficie eliminan los contaminantes adheridos, garantizando que el producto final esté libre de impurezas externas. Mediante estas medidas integrales, no solo se puede reducir significativamente la tasa de defectos, sino que también se puede mejorar la consistencia del producto y su rendimiento en servicio.

### **Mejora del sistema de gestión de la calidad**

El establecimiento de un sistema integral de gestión de la calidad es un mecanismo a largo plazo para prevenir y controlar los defectos de inclusión interna en esferas de aleación de tungsteno. Este sistema debe abarcar todo el ciclo de vida, desde el diseño hasta la entrega, priorizando la prevención y la mejora continua. En primer lugar, durante la fase de diseño y desarrollo, deben definirse claramente los objetivos de calidad y los puntos de riesgo. Las posibles fuentes de defectos deben identificarse mediante el Análisis de Modos y Efectos de Fallas (AMEF), y deben desarrollarse los planes de control correspondientes. Por ejemplo, deben establecerse estándares de entrada estrictos y auditorías periódicas para los proveedores de materias primas, con el fin de garantizar que los polvos que suministran cumplan con los requisitos de composición química y propiedades físicas. Simultáneamente, deben introducirse métodos de Control Estadístico de Procesos (CEP) para monitorizar en tiempo real parámetros clave del proceso, como la temperatura y la presión de sinterización, identificando y corrigiendo rápidamente las tendencias anómalas.

El control durante el proceso de producción se basa en procedimientos operativos estándar (POE) y tecnología de automatización. Los operarios deben recibir capacitación sistemática y dominar los procedimientos de operación y limpieza de los equipos para minimizar el error humano. Se deben establecer puntos de inspección en cada etapa del proceso, utilizando una combinación de muestreo e inspección completa para garantizar que los productos semielaborados cumplan con los estándares de calidad. Los datos de inspección deben recopilarse y analizarse mediante un sistema de información para generar informes de calidad y rastrear el origen de los defectos. Por ejemplo, si se detecta una tasa de inclusión anormal en un lote de productos, el análisis retrospectivo de los datos puede identificar el equipo o turno específico, lo que permite realizar mejoras focalizadas.

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



Además, un mecanismo de mejora continua es fundamental para un sistema de gestión de la calidad. Deben realizarse auditorías internas y revisiones de la dirección periódicas para evaluar la eficacia del sistema y actualizar los estándares según las mejores prácticas del sector. La retroalimentación de los clientes y las quejas del mercado también deben incluirse en el análisis, utilizando el análisis de causa raíz (ACR) para identificar problemas sistémicos e impulsar la innovación tecnológica. La colaboración y el intercambio son igualmente importantes; compartir experiencias con instituciones de investigación o asociaciones del sector puede acelerar la aplicación de nuevos métodos. En definitiva, al integrar la gestión de la calidad en la cultura corporativa y fomentar una mentalidad de cero defectos en cada empleado, se puede mejorar sustancialmente la fiabilidad y la competitividad de los productos.

## **6.8 Tratamiento del astillamiento y desprendimiento durante la etapa de rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno**

### **Naturaleza e impacto del astillamiento y desprendimiento de los bordes durante la etapa de rectificado y pulido.**

En el mecanizado de precisión de esferas de aleación de tungsteno, el rectificado y el pulido, como proceso crítico final, determinan directamente la integridad superficial y el rendimiento del producto. El astillamiento y el desprendimiento son, esencialmente, fracturas frágiles del material bajo tensión mecánica, que se manifiestan principalmente como desprendimiento y pérdida de material en los bordes o áreas localizadas de la superficie de la esfera. Este defecto no solo afecta la apariencia del producto, sino que también perjudica gravemente sus propiedades funcionales. Desde una perspectiva microscópica, el astillamiento y el desprendimiento son el resultado de la concentración de tensiones dentro del material, combinada con cargas externas. Cuando la tensión local supera la resistencia a la fractura del material, las microfisuras se propagan y penetran, lo que finalmente conduce a la falla macroscópica del material.

Estos defectos tienen múltiples repercusiones en el rendimiento del producto. En primer lugar, el astillamiento y el desprendimiento comprometen la precisión geométrica y la consistencia dimensional de la esfera, lo que genera holguras de ajuste irregulares y desviaciones en las trayectorias de movimiento durante el ensamblaje de precisión. En segundo lugar, las zonas defectuosas se convierten en puntos de concentración de tensiones, lo que acelera la aparición y propagación de grietas por fatiga bajo cargas cíclicas, reduciendo significativamente la vida útil del producto. Además, en escenarios de movimiento a alta velocidad, las discontinuidades superficiales pueden generar vibraciones y ruido, afectando la estabilidad operativa general del sistema. Desde una perspectiva más amplia, el astillamiento y el desprendimiento también incrementan los costes de reparación posteriores, el desperdicio de materias primas y energía, y repercuten negativamente en la eficiencia de la producción y el desarrollo sostenible.

Cabe destacar que las aleaciones de tungsteno, al ser materiales de alta densidad y dureza, presentan una mayor tendencia a la fractura frágil durante su procesamiento. Esto exige un conocimiento profundo del comportamiento mecánico del material y de los mecanismos de daño durante el rectificado y el pulido para comprender la raíz del problema. Además, el astillamiento y el desprendimiento de material en los

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

bordes no suelen ser fenómenos aislados; pueden estar estrechamente relacionados con defectos residuales de procesos anteriores, como la porosidad interna causada por una sinterización insuficiente o la tensión residual resultante de un tratamiento térmico inadecuado. Por lo tanto, la solución de este problema requiere un enfoque sistemático que considere el proceso de rectificado y pulido dentro de toda la cadena de fabricación.

### **Análisis de las causas fundamentales de los defectos de astillamiento y desconchado de bordes**

Los defectos de astillamiento y desprendimiento se originan en la compleja interacción de múltiples factores, lo que requiere un análisis exhaustivo desde diversas perspectivas, como las propiedades del material, los parámetros del proceso y el estado del equipo. Las propiedades inherentes del material son los factores fundamentales que determinan su resistencia al astillamiento. La microestructura de las aleaciones de tungsteno, incluyendo el tamaño de grano, la distribución de fases y la resistencia de la unión interfacial, afecta directamente su tenacidad a la fractura. Cuando los granos son gruesos o existe segregación composicional, los límites de grano se convierten fácilmente en el punto de inicio de la propagación de grietas. Asimismo, el estado de tensión residual dentro del material es crucial. Si un pretratamiento inadecuado genera una tensión superficial excesiva, la superposición de la carga externa y la tensión interna durante el rectificado y el pulido puede provocar fácilmente una fractura frágil.

Una configuración incorrecta de los parámetros del proceso es una causa directa de defectos. La presión de rectificado es uno de los factores más críticos; una presión excesiva provoca que los granos abrasivos penetren demasiado, lo que resulta en una deformación plástica significativa y la propagación de grietas; mientras que una presión insuficiente puede provocar que los granos abrasivos se deslicen sobre la superficie en lugar de cortarla, generando tensión térmica adicional y daños superficiales. La velocidad de rectificado también requiere un control preciso. La fuerza centrífuga generada por la rotación a alta velocidad puede exacerbar la rotura de los bordes en materiales frágiles, mientras que una velocidad demasiado baja afectará la eficiencia del proceso y la uniformidad de la superficie. Las condiciones de refrigeración y lubricación tienen un impacto significativo en la formación de defectos. Una refrigeración insuficiente puede provocar temperaturas locales excesivamente altas, alterando las propiedades mecánicas del material, mientras que una lubricación inadecuada aumenta el coeficiente de fricción entre los granos abrasivos y la pieza de trabajo, exacerbando la concentración de tensiones.

Los factores relacionados con el equipo y la muela abrasiva son igualmente importantes. La planitud y la precisión del equilibrio dinámico del disco de rectificado afectan directamente la uniformidad de la distribución de tensiones; incluso la más mínima vibración genera cargas de impacto en la superficie de la esfera. Las características de la muela, incluyendo el tipo de abrasivo, el tamaño del grano, la resistencia de la unión y la estructura de poros, determinan la intensidad del proceso de corte. Las muelas demasiado duras o demasiado blandas pueden causar problemas: las muelas excesivamente duras carecen de la amortiguación elástica necesaria, lo que provoca fácilmente impactos en los bordes; las muelas demasiado blandas pueden perder su capacidad de corte debido al desprendimiento prematuro del grano abrasivo, lo que genera inestabilidad en el proceso. Además, la tensión de sujeción causada por un diseño inadecuado de la fijación y las partículas duras introducidas por una limpieza ambiental insuficiente

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

pueden contribuir al astillamiento y desprendimiento de material en los bordes.

En un nivel más profundo, estos problemas suelen estar relacionados con deficiencias sistémicas en el control de procesos. La falta de un conocimiento exhaustivo de los mecanismos de remoción de material conlleva que la selección de parámetros se mantenga a nivel empírico; la ausencia de métodos de monitoreo de procesos impide la detección y corrección oportuna de los problemas; la coordinación insuficiente entre procesos, como el tratamiento ineficaz de daños superficiales o rebabas en los bordes, producto de procesos anteriores, agrava el riesgo de astillamiento de bordes durante el pulido posterior. Por lo tanto, la solución a los problemas de astillamiento y desprendimiento de bordes debe basarse en una comprensión integral de las relaciones intrínsecas entre los diversos factores y en la adopción de estrategias de mejora sistemáticas.

### **Estrategias de optimización y control de parámetros del proceso de rectificado y pulido**

Para abordar los problemas de astillamiento y desprendimiento durante el rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno, la optimización de los parámetros del proceso debe basarse en análisis científicos y experimentación sistemática. En primer lugar, el control de la presión de rectificado debe seguir un principio gradual, logrando una eliminación uniforme del material mediante ajustes de presión en varias etapas. La etapa inicial utiliza una presión baja para el desbaste, centrándose en eliminar las inhomogeneidades macroscópicas dejadas por procesos anteriores; la etapa intermedia aumenta gradualmente la presión para lograr una eliminación eficaz del material y la corrección de la forma; la etapa final utiliza una presión fina para completar el acabado superficial. Esta estrategia por etapas evita cambios bruscos de tensión y reduce las cargas de impacto en las zonas de los bordes. Simultáneamente, la regulación de la presión requiere un sistema de servocontrol avanzado para lograr una retroalimentación en tiempo real y un ajuste adaptativo, garantizando la estabilidad del proceso.

La optimización de la velocidad de rectificado requiere considerar el equilibrio entre la fuerza centrífuga y el calor de corte. El uso de estrategias de mecanizado a velocidad variable permite controlar eficazmente la acumulación de calor y el impacto mecánico; por ejemplo, reduciendo la velocidad de rotación en zonas sensibles al filo y manteniendo una alta eficiencia en zonas planas. La relación entre velocidad y presión es fundamental, lo que exige el establecimiento de rangos de parámetros mediante experimentos sistemáticos para garantizar el equilibrio óptimo entre la tasa de remoción de material y la calidad superficial. Los sistemas CNC modernos permiten programar trayectorias de movimiento y curvas de velocidad complejas, proporcionando una base tecnológica para optimizar la dinámica del mecanizado.

Mejorar el sistema de refrigeración y lubricación es crucial para prevenir el astillamiento de los filos. Es esencial no solo garantizar un flujo y una presión suficientes, sino también prestar atención a la permeabilidad y la eficiencia del intercambio de calor del refrigerante. El uso de un fluido de corte especializado en lugar de un refrigerante común puede mejorar significativamente las condiciones de lubricación y reducir el coeficiente de fricción entre los granos abrasivos y la pieza de trabajo. La posición y el ángulo de las boquillas del refrigerante deben diseñarse cuidadosamente para asegurar la

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

formación de una película fluida estable en el punto de contacto entre los granos abrasivos y la pieza de trabajo. Además, el control de la temperatura del refrigerante es fundamental; mantener una temperatura estable mediante un sistema termostático evita las fluctuaciones dimensionales y los cambios de tensión causados por la dilatación y contracción térmica. El establecimiento de mecanismos de monitorización y retroalimentación del proceso es crucial para lograr un control preciso de los parámetros. Los sistemas de monitorización en línea pueden recopilar señales como vibración, temperatura y emisión acústica en tiempo real, identificando anomalías en el proceso mediante el análisis de características. Por ejemplo, cuando se detecta un aumento en un componente de vibración de frecuencia específica, el sistema puede ajustar automáticamente la velocidad de rotación o la presión para prevenir defectos. Se utilizan dispositivos de inspección visual para monitorizar el estado de los bordes de las esferas, detectando rápidamente los primeros signos de astillamiento. El análisis de correlación entre estos datos de monitorización y los parámetros del proceso proporciona una base científica para la optimización continua. Al establecer una base de datos de parámetros del proceso y un sistema experto, el conocimiento empírico se puede transformar en activos digitales reutilizables, mejorando el nivel general de inteligencia del sistema de producción.

### **Investigación aplicada de tecnología y equipos avanzados de rectificado y pulido.**

Con el continuo desarrollo de la tecnología de fabricación, han surgido diversas tecnologías avanzadas de rectificado y pulido que ofrecen nuevas soluciones a los problemas de astillamiento y desprendimiento de bordes en esferas de aleación de tungsteno. La tecnología de pulido magnetorreológico logra una eliminación de material flexible mediante el ajuste de la viscosidad del reotipo a través del control de la intensidad del campo magnético. La ventaja de este método radica en el contacto suave entre la herramienta y la pieza de trabajo, lo que resulta en una distribución uniforme de la tensión, haciéndolo especialmente adecuado para el mecanizado de precisión de áreas sensibles a los bordes. La distribución del campo magnético controlada por ordenador permite un control preciso de la eliminación de material en diferentes áreas, evitando eficazmente los riesgos de impacto asociados a los abrasivos rígidos tradicionales. Además, esta tecnología posee una gran adaptabilidad, ajustando automáticamente la dirección de la fuerza de pulido según la curvatura de la esfera para garantizar un acabado uniforme en toda la superficie.

El pulido químico-mecánico (CMP), una técnica de procesamiento híbrida, combina los efectos sinérgicos del grabado químico y el rectificado mecánico. En el mecanizado de bolas de aleación de tungsteno, mediante la selección de oxidantes y agentes complejantes adecuados, se puede formar una capa reblandecida fácilmente removible en la superficie de la bola, seguida de la eliminación de material mediante una ligera acción mecánica. Este método reduce significativamente la tensión mecánica necesaria para el procesamiento, minimizando fundamentalmente el riesgo de astillamiento y desprendimiento de material en los bordes. Las tecnologías clave radican en la proporción precisa de reactivos químicos y granos abrasivos, así como en la sincronización y el control de las velocidades de reacción y eliminación de material. La monitorización en línea del pH y el potencial permite el ajuste en tiempo real del entorno químico, manteniendo la estabilidad del proceso.

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



La tecnología de rectificado asistido por ultrasonidos introduce vibraciones de alta frecuencia en el proceso de mecanizado tradicional, reduciendo la fuerza de rectificado efectiva mediante la vibración axial de la muela. La introducción de la vibración ultrasónica modifica la interacción entre los granos abrasivos y la pieza de trabajo, transformando el corte continuo en un mecanizado pulsado. Esto no solo reduce la fuerza de corte promedio, sino que también favorece la evacuación oportuna de la viruta. Para materiales difíciles de mecanizar, como las aleaciones de tungsteno, la asistencia ultrasónica puede suprimir eficazmente la propagación de grietas y mejorar la integridad de la superficie mecanizada. El núcleo del sistema reside en el diseño del generador ultrasónico y el cabezal de la herramienta, lo que exige un control preciso de la frecuencia y la amplitud de la vibración, así como una buena sincronización con el movimiento principal.

En cuanto a equipos, las modernas máquinas de rectificado y pulido evolucionan hacia la inteligencia y la integración. Los sistemas CNC multieje permiten una planificación compleja de la trayectoria del movimiento, evitando la concentración de tensiones localizadas causada por el rectificado repetido en una sola dirección. La aplicación de la tecnología de equilibrado activo suprime eficazmente la vibración desequilibrada de las piezas giratorias, proporcionando un entorno dinámico estable para el mecanizado de precisión. Cabe destacar también los diseños innovadores de los sistemas de sujeción; por ejemplo, el uso de soportes elásticos o sujeción neumática uniforme reduce significativamente el impacto de la tensión de sujeción en el borde de la esfera. La aplicación integral de estas tecnologías y equipos avanzados no solo resuelve los problemas específicos de astillamiento y rotura de bordes, sino que también impulsa la mejora general de la tecnología de mecanizado.

### **Construcción de un sistema integral de monitoreo de calidad y prevención de defectos**

Establecer un sistema integral de control y prevención de la calidad es fundamental para garantizar la calidad constante del rectificado y pulido de bolas de aleación de tungsteno. Este sistema debe abarcar todas las etapas, desde las materias primas hasta los productos terminados, conformando un sistema de gestión de ciclo cerrado. Durante la inspección de la materia prima, se debe prestar especial atención al estado de calidad de las bolas procedentes del proceso anterior, incluyendo la integridad superficial, el estado de los bordes y la distribución de defectos internos. Se debe utilizar un equipo de inspección óptica automatizado para inspeccionar todas las bolas, creando archivos de calidad individuales que sirvan como base de datos para el procesamiento posterior. Para las bolas con riesgos potenciales detectados durante la inspección, como microfisuras o bordes irregulares, se debe aplicar un tratamiento de aislamiento o parámetros de proceso especiales.

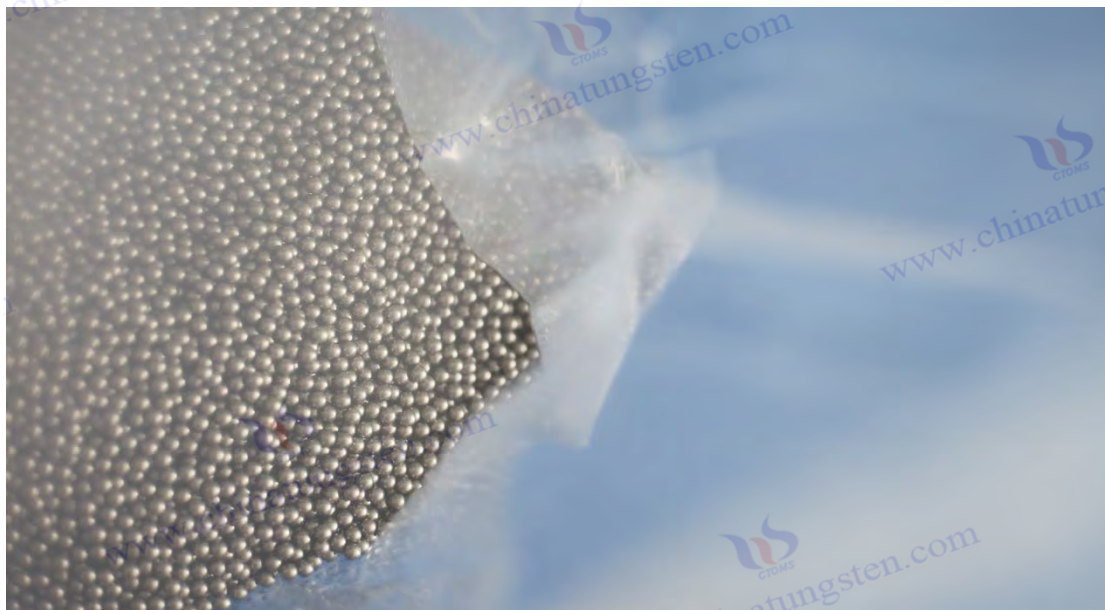
La monitorización en tiempo real durante el proceso de mecanizado es crucial para prevenir defectos. Gracias a la tecnología de sensores multiparamétricos, se pueden adquirir simultáneamente señales mecánicas, térmicas y acústicas durante el rectificado y el pulido. Los sensores de fuerza monitorizan las fuerzas de interacción entre la muela y la pieza de trabajo, los sensores de temperatura registran los cambios térmicos en la zona de mecanizado y los sensores de emisión acústica capturan señales de daños microscópicos en el material. Estos datos se analizan en tiempo real mediante computación perimetral y se comparan con las especificaciones del proceso preestablecidas. Cualquier anomalía activa

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

inmediatamente los mecanismos de ajuste. Por ejemplo, si se detecta un patrón específico de fluctuación en la fuerza de corte, el sistema puede reducir automáticamente la velocidad de avance o aumentar el caudal de refrigerante para evitar la formación de defectos.

Establecer un sistema de mantenimiento preventivo es crucial para la estabilidad de los equipos. A partir de los datos operativos y el historial de mantenimiento, se crean modelos predictivos para determinar con precisión la vida útil restante de los componentes críticos y el momento óptimo para el mantenimiento. La redondez y la planitud de los discos de rectificado deben calibrarse periódicamente para garantizar que se encuentren dentro de las tolerancias permitidas. El desgaste de las herramientas de rectificado se evalúa mediante una combinación de monitorización en línea y análisis fuera de línea para establecer un ciclo de reemplazo científico. Asimismo, es esencial monitorizar los parámetros ambientales, como la concentración de partículas en salas blancas, la estabilidad de la temperatura y la humedad, etc. Si bien estos factores son indirectos, tienen un impacto significativo en la calidad del proceso.

El análisis sistemático y la gestión del conocimiento de los datos de calidad constituyen la base de la mejora continua. Mediante la creación de una plataforma unificada de datos de calidad, la integración de los resultados de inspección y los parámetros de proceso de diversas etapas, y el uso de tecnología de macrodatos para descubrir patrones potenciales, se establece una biblioteca de patrones de defectos. Los diferentes tipos de desprendimiento de material en los bordes se correlacionan con sus posibles causas, lo que proporciona una referencia para el diagnóstico de problemas. Se celebran reuniones periódicas de revisión de calidad, en las que expertos de los departamentos de proceso, equipo y calidad realizan análisis conjuntos para optimizar los flujos de proceso desde una perspectiva sistémica. Además, la experiencia adquirida se consolida en procedimientos operativos estándar, y la formación garantiza que todos los operarios los dominen, fomentando una cultura de calidad de participación total.



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

**COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT**

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

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

## CTIA GROUP LTD

### High-Density Tungsten Alloy Customization Service

CTIA GROUP LTD, a customization expert in high-density tungsten alloy design and production with 30 years of experience.

**Core advantages:** 30 years of experience: deeply familiar with tungsten alloy production, mature technology.

**Precision customization:** support high density (17-19 g/cm<sup>3</sup>), special performance, complex structure, super large and very small parts design and production.

**Quality cost:** optimized design, optimal mold and processing mode, excellent cost performance.

**Advanced capabilities:** advanced production equipment, RMI, ISO 9001 certification.

#### 100,000+ customers

Widely involved, covering aerospace, military industry, medical equipment, energy industry, sports and entertainment and other fields.

#### Service commitment

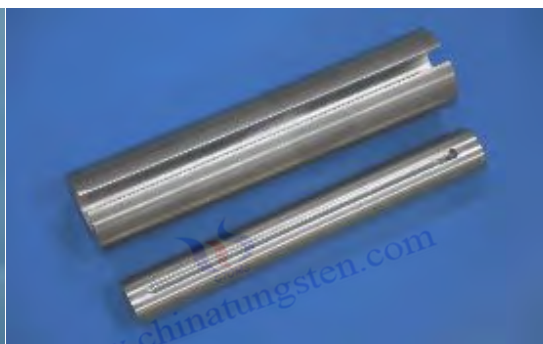
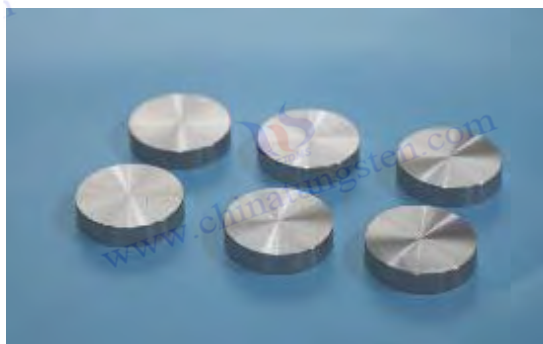
1 billion+ visits to the official website, 1 million+ web pages, 100,000+ customers, 0 complaints in 30 years!

Contact us

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

Tel: +86 592 5129696

Official website: [www.tungsten-alloy.com](http://www.tungsten-alloy.com)



#### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Apéndice:

Terminología de bolas de aleación de tungsteno

categorí a	Nombre del término	Explicación de la terminología
Ciencias de los material es	límite de grano	Las características estructurales de las regiones de interfaz entre granos con diferentes orientaciones en materiales policristalinos tienen un impacto significativo en las propiedades mecánicas del material y en su comportamiento ante la corrosión.
	Distribución de fase	La disposición espacial de las diferentes fases en la microestructura de una aleación afecta directamente a la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste del material.
	tensión residual	Las tensiones internas residuales debidas a la deformación plástica desigual o a los ciclos térmicos durante el procesamiento del material pueden provocar deformación del producto o cambios en su rendimiento.
	tenacidad a la fractura	Un parámetro que mide la resistencia de un material a la propagación de grietas, reflejando la capacidad del material para prevenir la propagación inestable de grietas macroscópicas bajo tensión.
Proceso de fabricaci ón	presión isostática	Un proceso de conformado que aplica presión uniforme a una pieza de trabajo en todas las direcciones utilizando un medio líquido o gaseoso ayuda a obtener una preforma de alta densidad.
	sinterización	El proceso mediante el cual los polvos o los compactos prensados logran la unión entre partículas a través de la migración de masa a alta temperatura es un paso clave para obtener las propiedades finales.
	prensado isostático en caliente	Los métodos de procesamiento que tratan los materiales a alta temperatura y alta presión pueden eliminar eficazmente los defectos internos y mejorar la densidad del material.
	Estrategia de presión escalonada	Durante el proceso de rectificado se emplea un método de control de presión por fases para equilibrar la eficiencia del proceso y la integridad de la superficie.
Análisis de defectos	rotura de bordes	Los daños localizados en el borde de una pieza de trabajo suelen estar causados por una tensión mecánica que supera el límite de resistencia local del material.
	Bloques caídos	El desprendimiento de material en la superficie o los bordes de una pieza de trabajo suele estar estrechamente relacionado con defectos internos o concentración de tensiones durante el procesamiento.
	Concentración de estrés	El fenómeno del aumento significativo de la tensión local debido a cambios abruptos en la geometría o a la presencia de defectos es un factor inductor importante para la iniciación de grietas.
	Microfisuras	Las fisuras del material observadas a escala microscópica pueden propagarse hasta convertirse en fisuras macroscópicas durante su uso.
Control	Integridad	Una caracterización exhaustiva de la morfología superficial, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



de calidad	superficial	microestructura y las propiedades físicas y mecánicas de la pieza de trabajo refleja la influencia de la tecnología de procesamiento en la calidad de la superficie.
	Precisión geométrica	El grado de conformidad entre los parámetros geométricos reales de la pieza de trabajo y los valores de diseño ideales, incluyendo indicadores como la redondez y la consistencia dimensional.
	Ensayos no destructivos	Técnicas de inspección para examinar defectos internos y superficiales en materiales sin comprometer su rendimiento.
	Ventana de proceso	El rango de parámetros de proceso que pueden producir de forma estable productos cualificados refleja la robustez y la controlabilidad del proceso de fabricación.
Tecnología de procesamiento	Pulido magnetorreológico	Un método de procesamiento avanzado para el pulido de precisión que utiliza el principio de cambios en las propiedades reológicas de los fluidos magnetorreológicos en un campo magnético.
	pulido químico-mecánico	La tecnología de planarización, que combina los efectos sinérgicos del grabado químico y el pulido mecánico, puede lograr superficies con daños extremadamente bajos.
	Pulido asistido por ultrasonidos	La tecnología de mecanizado compuesto, que incorpora vibraciones mecánicas de alta frecuencia al proceso de rectificado tradicional, puede reducir eficazmente las fuerzas de corte y mejorar la calidad del mecanizado.
	procesamiento adaptativo	Los métodos de fabricación inteligentes que ajustan automáticamente los parámetros del proceso basándose en la monitorización en tiempo real del estado del procesamiento pueden mejorar significativamente la estabilidad del proceso.
Métodos de detección	detección de emisiones acústicas	Tecnología de detección dinámica que evalúa el estado de daño interno mediante la recopilación de señales de ondas elásticas generadas durante la tensión del material.
	Monitoreo en línea	Un método de monitorización continua para la adquisición y el análisis en tiempo real de los parámetros del proceso y los datos de calidad del producto durante el proceso de producción.
	mantenimiento predictivo	Estrategias avanzadas de mantenimiento de equipos basadas en el análisis de datos sobre el estado operativo de los equipos y la predicción del tiempo de fallo.
	gemelo digital	Mediante el uso de medios digitales para construir representaciones virtuales de entidades físicas, podemos simular, analizar y optimizar procesos de producción reales.

Referencias

Referencias chinas

- [1] Wang Yuhua, Fan Jinglian, Liu Tao, et al. Estado actual de la investigación y tendencias de desarrollo de aleaciones de alta densidad y alto rendimiento basadas en tungsteno[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(8): 2987-3002.
- [2] Qu Xuanhui, Qin Mingli, Wu Botao. Tecnología de preparación y aplicaciones de aleaciones pesadas de tungsteno[M]. Pekín: Editorial de la Industria Metalúrgica, 2020.
- [3] Zhang Lide, Mu Qiming. Avances en la investigación sobre la aplicación de nanomateriales y nanoestructuras en aleaciones de tungsteno[J]. Powder Metallurgy Technology, 2023, 41(2): 97-108.
- [4] Liu Wensheng, Ma Yunzhu. Avances en la investigación sobre la teoría de la sinterización en fase líquida y el comportamiento de densificación de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Industria del Tungsteno de China, 2021, 36(5): 1-9.
- [5] Cheng Xingwang, Yi Danqing, Wu Botao. Estado actual y tendencias de desarrollo de los materiales de blindaje de aleación de tungsteno para uso médico[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2024, 53(3): 601-612.
- [6] Fan Jinglian, Liu Tao, Cheng Huichao. Avances en la investigación sobre tecnologías de fortalecimiento y tenacidad de aleaciones de tungsteno de alto rendimiento[J]. Industria de la Metalurgia de Polvos, 2022, 32(4): 1-12.
- [7] Yang Xiaohong, Xiao Zhiyu, Luo Laima. Aplicación y requisitos de rendimiento de los colimadores de aleación de tungsteno en aceleradores lineales médicos[J]. Dispositivos Médicos de China, 2023, 38(7): 145-150.
- [8] Administración Estatal para la Regulación del Mercado. GB/T 34560.1-2017 Aleaciones de alta densidad a base de tungsteno—Parte 1: Condiciones técnicas generales[S]. Pekín: Editorial de Normas de China, 2017.
- [9] Administración Nacional de Productos Médicos. YY/T 1636-2019 Requisitos técnicos para colimadores médicos de aleación de tungsteno[S]. Pekín: Editorial de Normas de China, 2019.
- [10] Wu Yiping, Yang Fan. Avances en la investigación sobre la tecnología de protección superficial de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 78-89.

### Referencias en inglés

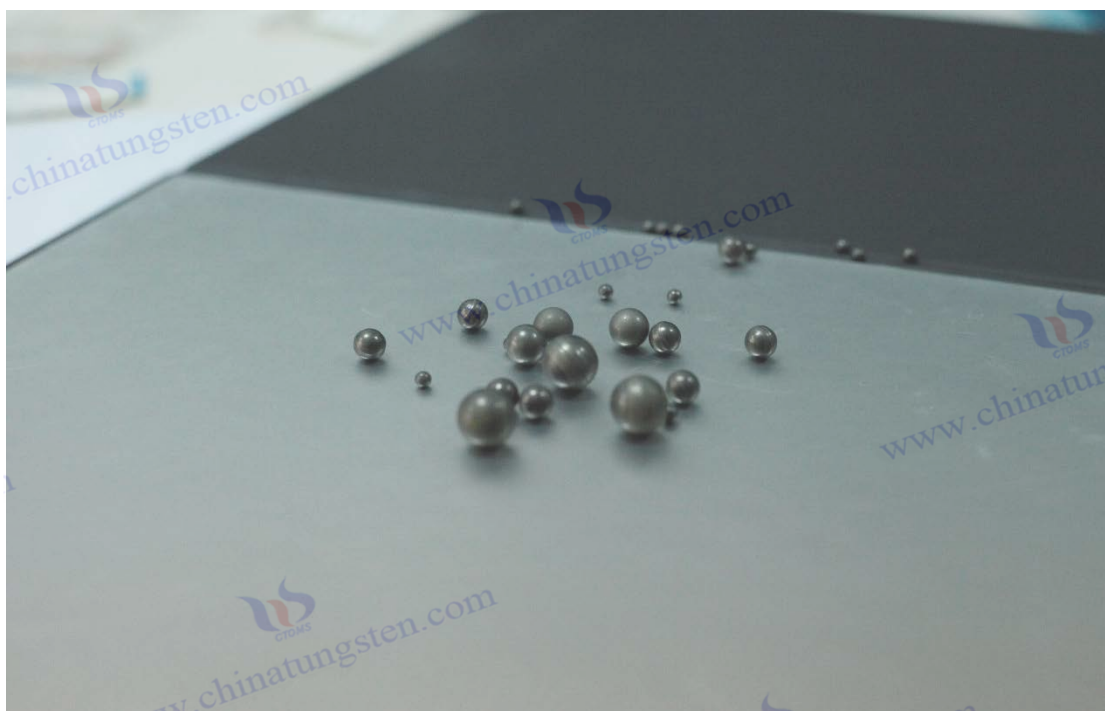
- [1] German RM, Suri P, Park S J. Revisión: sinterización en fase líquida[J]. Journal of Materials Science, 2020, 55(1): 1-35.
- [2] Bose A, Eisen W B. Aleaciones de tungsteno de alta densidad: desarrollo y aplicaciones[J]. Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros, 2021, 98: 105547.
- [3] Upadhyaya G S. Ciencia de los materiales de las aleaciones pesadas de tungsteno: procesamiento y propiedades[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57(12): 6789-6825.
- [4] Zhang ZH, Wang FC, Li S K. Avances recientes en aleaciones de alta densidad basadas en tungsteno[J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales: A, 2023, 865: 144612.
- [5] Luo LM, Lin J, Luo GN, et al. Aleaciones pesadas de tungsteno para aplicaciones de colimadores médicos: microestructura y propiedades mecánicas[J]. Journal of Nuclear Materials, 2024, 592: 154927.
- [6] Das J, Appa Rao G, Pabi S K. Microestructura y propiedades mecánicas de aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 787: 139482.
- [7] ASTM B777-20 Especificación estándar para aleaciones de tungsteno de alta densidad[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2020.

### COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [8] Senthilnathan N, Raja Annamalai A, Venkatraman B. Aleación pesada de tungsteno como material de blindaje contra la radiación: una revisión[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2022, 198: 110245.
- [9] Chen WG, Liu Y, Li J. Modificación superficial y recubrimientos protectores para aleaciones pesadas de tungsteno[J]. Surface and Coatings Technology, 2023, 457: 129289.
- [10] Kiran UR, Kumar J, Kumar V, et al. Estado actual y perspectivas futuras de las aleaciones de alta densidad basadas en tungsteno[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 78: 123-135.



Bolas de aleación de tungsteno de CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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