

Qué es la aleación de níquel-hierro y 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

电话/TEL: 0086 592 512 9696
CTIAQCD-MA-E/P 2018-2024V
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 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

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

Tabla de contenido

Capítulo 1 Conocimientos básicos de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

- 1.1 Definición de aleación de tungsteno, níquel y hierro
- 1.2 Composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 1.2.1 Características y funciones del tungsteno
 - 1.2.2 Características y funciones del níquel
 - 1.2.3 Características y funciones del hierro
- 1.3 Antecedentes históricos y desarrollo de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 1.3.1 Descubrimiento de la aleación de tungsteno, níquel y hierro
 - 1.3.2 Aplicaciones tempranas y avances tecnológicos

Capítulo 2 Propiedades físicas y químicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

- 2.1 Densidad y propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 2.1.1 Características de alta densidad
 - 2.1.2 Resistencia a la tracción y tenacidad
 - 2.1.3 Dureza y resistencia al desgaste
- 2.2 Propiedades térmicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 2.2.1 Punto de fusión y estabilidad térmica
 - 2.2.2 Coeficiente de expansión térmica
 - 2.2.3 Conductividad térmica
- 2.3 Estabilidad química de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 2.3.1 Resistencia a la corrosión
 - 2.3.2 Propiedades antioxidantes
 - 2.3.3 Reacciones químicas con otros materiales
- 2.4 Propiedades electromagnéticas y otras propiedades especiales de la aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 2.4.1 Propiedades magnéticas
 - 2.4.2 Conductividad
 - 2.4.3 Resistividad
 - 2.4.4 Resistencia a la radiación
- 2.5 CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro MSDS

Capítulo 3 Preparación y procesamiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

- 3.1 Selección de materia prima y pretratamiento
 - 3.1.1 Requisitos de pureza para tungsteno, níquel y hierro
 - 3.1.2 Proceso de pretratamiento de la materia prima
- 3.2 Método de preparación de aleación de tungsteno-níquel-hierro
 - 3.2.1 Metalurgia de polvos
 - 3.2.2 Tecnología de sinterización en fase líquida
 - 3.2.3 Tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D)
 - 3.2.4 Otras técnicas de preparación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Tecnología de procesamiento de aleación de tungsteno-níquel-hierro

3.3.1 Mecanizado

3.3.2 Tecnología de tratamiento térmico

3.3.3 Tecnología de tratamiento y recubrimiento de superficies

Capítulo 4 Control de calidad e inspección de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

4.1 Análisis de la composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

4.1.1 Método de detección de la composición química

4.1.2 Análisis de microestructura

4.2 Prueba de rendimiento de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

4.2.1 Ensayo de propiedades mecánicas

4.2.2 Prueba de rendimiento térmico

4.2.3 Prueba de rendimiento eléctrico

4.2.4 Prueba de rendimiento magnético

4.3 Certificación y estándares de calidad

4.3.1 Norma nacional china para la aleación de tungsteno, níquel y hierro

4.3.2 Normas internacionales para la aleación de tungsteno-níquel-hierro

4.3.3 Normas de aleación de tungsteno-níquel-hierro en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países del mundo

Capítulo 5 Campos de aplicación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

5.1 Aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en la industria aeroespacial

5.1.1 Materiales de equilibrio

5.1.2 Piezas resistentes a altas temperaturas

5.2 Defensa y Militar

5.2.1 Materiales perforantes

5.2.2 Armadura protectora

5.3 Aplicación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro en el campo médico

5.3.1 Componentes de blindaje de equipos de TC/RMN

5.3.2 Colimadores para equipos de radioterapia

5.3.3 Dispositivos médicos de precisión

5.3.4 Contrapesos de las articulaciones del robot quirúrgico

5.3.5 Micropesos para terapia intervencionista

5.4 Aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en instrumentos de precisión

5.4.1 Contrapesos de instrumentos de precisión

5.4.2 Bloque de equilibrio de la plataforma de litografía

5.4.3 Bloque de amortiguación del husillo de la máquina herramienta de alta velocidad

5.4.4 Componentes de reducción de vibraciones de la plataforma óptica de precisión

5.5 Otras aplicaciones de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

5.5.1 Aplicación de la tecnología de impresión 3D

5.5.2 Potencial en el sector energético

5.5.3 Pesos de los palos de golf

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5.4 Kit de equilibrado de motor de competición

Capítulo 6: Ventajas y desventajas de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

6.1 Análisis de las ventajas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

6.1.1 Alta densidad y resistencia

6.1.2 Rendimiento del procesamiento

6.2 Limitaciones de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

6.2.1 Limitaciones de costos y recursos

6.2.2 Impactos ambientales y en la salud

6.3 Comparación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro con otros materiales

6.3.1 Comparación con la aleación de tungsteno-níquel-cobre

6.3.2 Comparación con aleaciones a base de plomo

6.3.3 Comparación con otros materiales de alta densidad

Capítulo 7: Impacto ambiental de la producción y uso de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro

7.1 Impacto ambiental durante la producción

7.1.1 Extracción de recursos y consumo de energía

7.1.2 Residuos y emisiones

7.2 Tecnología de fabricación ecológica

7.2.1 Método de preparación respetuoso con el medio ambiente

7.2.2 Tecnologías de ahorro de energía

7.3 Reciclaje y reutilización

7.3.1 Tecnología de recuperación de aleaciones

7.3.2 Roles en la economía circular

Capítulo 8: Preguntas y respuestas frecuentes

8.1 Malentendidos comunes sobre la aleación de níquel-hierro y tungsteno

8.2 Problemas comunes en tecnología y aplicación

8.3 Asesoramiento y soluciones de expertos

apéndice:

Glosario de términos de aleación de tungsteno, níquel y hierro

Referencias



Imagen de aleación de tungsteno, níquel y hierro 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

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

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 1 Conocimientos básicos de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

1.1 Definición de aleación de tungsteno, níquel y hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es un material de aleación de alta densidad con tungsteno como componente principal y níquel y hierro como fase aglutinante. Generalmente se clasifica como una aleación de alta densidad. Esta aleación se utiliza ampliamente en los sectores aeroespacial, militar, médico, nuclear y civil debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas. La definición de aleación de tungsteno-níquel-hierro se basa en sus principales elementos constituyentes y su combinación única de propiedades: el tungsteno proporciona alta densidad y alta resistencia, y el níquel y el hierro como aglutinantes mejoran la tenacidad y la maquinabilidad de la aleación.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro suele tener una densidad de entre 16,5 y 18,75 g/cm³, similar a la de metales preciosos como el oro o el platino, por lo que se utiliza a menudo como material sustituto. Sus principales características incluyen alta densidad, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y buena maquinabilidad. En comparación con otros materiales de alta densidad, la aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta una mayor rentabilidad, especialmente en aplicaciones que requieren una gran concentración de peso en un volumen pequeño, como contrapesos, materiales de protección radiológica y proyectiles perforantes militares.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se obtiene generalmente mediante un proceso de pulvimetalurgia, que consiste en mezclar polvo de tungsteno, níquel y hierro de alta pureza en una proporción específica, prensarlo, moldearlo y sinterizarlo a alta temperatura para formar una estructura de aleación densa. Durante el proceso de sinterización, el níquel y el hierro forman una fase líquida que favorece la unión de las partículas de tungsteno, lo que confiere a la aleación excelentes propiedades mecánicas. La proporción de la composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro puede ajustarse según el uso específico, como aumentar la proporción de níquel para mejorar la tenacidad o ajustar el contenido de hierro para optimizar el coste.

Desde el punto de vista de su aplicación, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente en componentes de contrapeso en el sector aeroespacial debido a su alta densidad y resistencia, como el contrapeso de una aeronave o el contrapeso del rotor de un helicóptero. Además, en el sector médico, se utiliza para fabricar equipos de protección contra rayos X o rayos gamma gracias a su excelente capacidad de blindaje. En el ámbito militar, se utiliza a menudo para fabricar núcleos perforantes gracias a su alta densidad y dureza, que permiten penetrar eficazmente objetivos blindados. En resumen, la definición de aleación de tungsteno-níquel-hierro no solo abarca su composición química, sino también su valor único en diversas aplicaciones de alta gama.

1.2 Composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se compone principalmente de tres elementos: tungsteno (W), níquel (Ni) y hierro (Fe). Entre ellos, el tungsteno suele ser el más abundante, con un 85%-95%, mientras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que el níquel y el hierro, como fases aglutinantes, representan entre el 5% y el 15%, respectivamente. Además, según el uso específico, se pueden añadir trazas de otros elementos como cobre, cobalto o molibdeno a la aleación para optimizar aún más su rendimiento. La proporción de la aleación de tungsteno-níquel-hierro afecta directamente a sus propiedades físicas (como densidad, dureza y tenacidad) y al rendimiento del procesamiento. Por lo tanto, en la producción real, la proporción de cada elemento debe controlarse con precisión según los requisitos de la aplicación.

El tungsteno es el componente principal de la aleación, lo que le confiere una alta densidad ($19,25 \text{ g/cm}^3$) y un alto punto de fusión ($3410 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que lo convierte en una opción ideal para aleaciones de alta densidad. El níquel, como aglutinante principal, presenta buena ductilidad y resistencia a la corrosión, y puede formar una fase líquida durante el proceso de sinterización para promover la unión de las partículas de tungsteno, mejorando así la resistencia y tenacidad generales de la aleación. El hierro mejora aún más las propiedades mecánicas de la aleación, a la vez que reduce los costes de producción. El efecto sinérgico del níquel y el hierro permite que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro tengan buena maquinabilidad y resistencia al impacto, manteniendo al mismo tiempo una alta densidad.

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suelen expresarse en porcentaje de peso. Por ejemplo, la aleación común 90W-7Ni-3Fe contiene 90 % de tungsteno, 7 % de níquel y 3 % de hierro. Este diseño de proporción permite equilibrar la alta densidad y las propiedades mecánicas, y es adecuado para diversas aplicaciones. Cabe destacar que la proporción de níquel a hierro afecta significativamente el rendimiento de la aleación: a mayor contenido de níquel, mayor tenacidad y ductilidad; un mayor contenido de hierro puede aumentar la dureza, pero reducir la resistencia a la corrosión. Por lo tanto, en la producción real, la fórmula debe optimizarse según los usos específicos.

La microestructura de la aleación de tungsteno-níquel-hierro se compone de partículas de tungsteno y una matriz de níquel-hierro. Las partículas de tungsteno suelen ser casi esféricas o poligonales, incrustadas en la matriz de níquel-hierro para formar una estructura compuesta uniforme. Esta estructura confiere a la aleación excelentes propiedades mecánicas, como alta resistencia a la tracción (generalmente de 800 a 1000 MPa) y una ductilidad adecuada. Además, la resistencia a la corrosión y a la oxidación de la aleación también se beneficia de la presencia de níquel, lo que permite su uso prolongado en entornos hostiles. En resumen, el diseño de la composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es clave para su rendimiento superior, lo que determina directamente su amplia aplicación en campos de alto rendimiento.

1.2.1 Características y funciones del tungsteno

El tungsteno (símbolo W) es el componente más crítico de la aleación de tungsteno-níquel-hierro. Sus propiedades físicas y químicas únicas garantizan el rendimiento esencial de la aleación. El tungsteno es un metal raro con una densidad extremadamente alta ($19,25 \text{ g/cm}^3$), cercana a la del oro ($19,32 \text{ g/cm}^3$), y es uno de los metales más densos de la naturaleza. Esta alta densidad convierte a la aleación de tungsteno-níquel-hierro en un material ideal para aplicaciones que requieren una gran concentración de peso en un volumen pequeño, como contrapesos aeroespaciales o núcleos de perforación de blindaje militar.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El tungsteno tiene un punto de fusión extremadamente alto de 3410 °C, el más alto de todos los metales, lo que confiere a la aleación de tungsteno-níquel-hierro una excelente resistencia a altas temperaturas, lo que le permite mantener la estabilidad estructural en entornos de alta temperatura. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan a menudo para fabricar componentes de contrapeso para álabes de turbinas, que pueden soportar condiciones extremas de alta temperatura y rotación a alta velocidad. Además, el tungsteno tiene una dureza extremadamente alta (dureza Mohs de aproximadamente 7,5), solo superada por el diamante, lo que confiere a la aleación de tungsteno-níquel-hierro una excelente resistencia al desgaste y es adecuada para la fabricación de piezas resistentes al desgaste o herramientas de alta resistencia.

La estabilidad química del tungsteno también contribuye significativamente a su función en las aleaciones. El tungsteno presenta una buena resistencia a la corrosión frente a la mayoría de los ácidos y álcalis, y puede permanecer estable en entornos químicos agresivos. Esto hace que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro sean eficaces en aplicaciones de protección contra la radiación en la industria nuclear y el sector médico, como la fabricación de escudos contra rayos gamma. El bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno (aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) mejora aún más la estabilidad dimensional de la aleación, lo que le permite mantener una geometría precisa en entornos con grandes cambios de temperatura.

En la aleación de tungsteno-níquel-hierro, el tungsteno se distribuye uniformemente en la matriz de níquel-hierro en forma de partículas finas, formando una estructura compuesta de alta densidad. La alta dureza y densidad de las partículas de tungsteno proporcionan las principales propiedades mecánicas y características de peso de la aleación, mientras que la matriz de níquel-hierro une firmemente las partículas de tungsteno mediante sinterización en fase líquida, compensando las deficiencias del tungsteno puro, su fragilidad y la dificultad de procesamiento. Este efecto sinérgico permite que la aleación de tungsteno-níquel-hierro tenga suficiente tenacidad y maquinabilidad, manteniendo al mismo tiempo una alta densidad.

La función del tungsteno en la aleación también se refleja en su capacidad de protección contra la radiación. Gracias a su elevado número atómico ($Z=74$), el tungsteno puede absorber eficazmente la radiación de alta energía, como los rayos X y los rayos gamma. Esto hace que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro sean importantes en equipos médicos (como los blindajes de las máquinas de tomografía computarizada) y en la industria nuclear (como los contenedores de residuos radiactivos). Además, la conductividad térmica del tungsteno (aproximadamente $173 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) y la conductividad eléctrica también le confieren ventajas adicionales en ciertas aplicaciones especiales, como su uso como material para electrodos o disipadores de calor.

1.2.2 Características y funciones del níquel

El níquel (símbolo Ni) es un importante elemento de la fase de enlace en la aleación de tungsteno-níquel-hierro, que suele representar entre el 5 % y el 10 % de la masa total de la aleación y desempeña un papel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fundamental en la optimización de su rendimiento. El níquel es un metal de transición de color blanco plateado con buena ductilidad, tenacidad y resistencia a la corrosión. Su densidad es de 8,91 g/cm³ y su punto de fusión es de 1455 °C. La adición de níquel mejora significativamente las propiedades mecánicas y de mecanizado de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, lo que le confiere suficiente tenacidad y resistencia al impacto, manteniendo una alta densidad y superando así las deficiencias del tungsteno puro, que es frágil y difícil de procesar.

En el proceso de producción pulvimetalúrgica de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, el papel principal del níquel se refleja en la etapa de sinterización en fase líquida. Dado que el punto de fusión del níquel es mucho menor que el del tungsteno (3410 °C), durante la sinterización a alta temperatura, el níquel se fundirá primero para formar una fase líquida, rellenando los huecos entre las partículas de tungsteno y promoviendo la reorganización y la unión de las partículas de tungsteno mediante acción capilar. Este mecanismo de sinterización en fase líquida mejora significativamente la densidad de la aleación (normalmente cerca del 99 % de la densidad teórica), mejorando así su resistencia y tenacidad. La matriz formada por níquel envuelve firmemente las partículas de tungsteno de alta dureza para formar una estructura compuesta uniforme, lo que permite que la aleación mantenga su integridad estructural en entornos de alta tensión.

La estabilidad química del níquel es otra característica importante de la aleación de tungsteno-níquel-hierro. El níquel posee una excelente resistencia a la corrosión en la mayoría de los entornos ácidos, alcalinos y oxidantes, y resiste eficazmente la erosión causada por la humedad, la niebla salina y otros medios corrosivos. Esto permite ampliar su aplicación en entornos hostiles, como la ingeniería naval o la industria química, como contrapesos resistentes a la corrosión. Además, la propiedad antioxidante del níquel también protege la aleación en entornos de alta temperatura, prolongando así su vida útil.

Desde la perspectiva de las propiedades mecánicas, la ductilidad y la tenacidad del níquel mejoran significativamente la resistencia al impacto y a la fractura de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Los materiales de tungsteno puro son propensos a fracturarse al ser sometidos a impactos o tensiones cíclicas debido a su alta dureza y fragilidad, y la presencia de níquel confiere a la aleación cierta capacidad de deformación plástica. Por ejemplo, la resistencia a la tracción de la aleación 90W-7Ni-3Fe puede alcanzar los 800-1000 MPa, y su elongación es de aproximadamente el 10-20%, lo que le confiere un buen rendimiento en aplicaciones de alta tensión, como contrapesos aeroespaciales o núcleos de perforación de blindaje militar.

El níquel también influye en las propiedades magnéticas de la aleación. El níquel es un material ferromagnético, y su adición hace que la aleación de tungsteno-níquel-hierro presente un magnetismo débil, lo cual ofrece ventajas potenciales en ciertas aplicaciones específicas (como en situaciones que requieren blindaje magnético o posicionamiento magnético). Sin embargo, el contenido de níquel debe controlarse con precisión, ya que una proporción de níquel demasiado alta puede reducir la densidad de la aleación, lo que afecta a su alta gravedad específica. Además, el coste del níquel es relativamente alto, por lo que es necesario equilibrar el rendimiento y la rentabilidad en la producción real. En resumen, la función del níquel en la aleación de tungsteno-níquel-hierro se refleja principalmente en la mejora de las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

propiedades mecánicas, la promoción del proceso de sinterización, el aumento de la resistencia a la corrosión y la concesión de ciertas propiedades magnéticas. El efecto sinérgico del níquel, el tungsteno y el hierro permite que la aleación alcance un equilibrio ideal entre alta densidad, alta resistencia y maquinabilidad, convirtiéndose en un material indispensable en los sectores aeroespacial, militar y médico.

1.2.3 Características y funciones del hierro

El hierro (símbolo Fe) es otro elemento clave de la fase de enlace en la aleación de tungsteno-níquel-hierro, y suele representar entre el 2 % y el 5 % de la masa de la aleación. Con una densidad de 7,87 g/cm³ y un punto de fusión de 1538 °C, sus propiedades físicas y químicas proporcionan importantes mejoras en el rendimiento de la aleación. La adición de hierro no solo reduce los costes de producción, sino que también desempeña un papel importante en la mejora de las propiedades mecánicas de la aleación, la optimización de la microestructura y el ajuste de las propiedades magnéticas, lo que permite que la aleación de tungsteno-níquel-hierro cumpla con diversos requisitos de aplicación. En el proceso de fabricación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, el hierro y el níquel actúan como fases de enlace y participan en el proceso de sinterización en fase líquida. Dado que el punto de fusión del hierro es inferior al del tungsteno, el hierro y el níquel se funden durante la sinterización para formar una matriz en fase líquida, que promueve la unión y la reorganización de las partículas de tungsteno. La presencia de hierro puede refinar la microestructura de la aleación y hacer que las partículas de tungsteno se distribuyan de forma más uniforme, mejorando así su resistencia y tenacidad. Por ejemplo, en la aleación 90W-7Ni-3Fe, la adición de hierro compacta la microestructura, mejorando significativamente la resistencia a la tracción y la dureza, lo que resulta ideal para la fabricación de contrapesos de alto rendimiento o núcleos antiblindaje.

Las propiedades mecánicas del hierro son cruciales para reforzar aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. El hierro posee una alta dureza y resistencia (dureza de Mohs de aproximadamente 4-5), y su adición aumenta la dureza general de la aleación, lo que la hace ideal para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste o al impacto. En comparación con el níquel, el hierro presenta menor ductilidad, pero su mayor dureza compensa esta deficiencia, permitiéndole soportar mayores cargas mecánicas en entornos de alta tensión. Por ejemplo, en el ámbito militar, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan como núcleos perforantes debido a su alta dureza y alta densidad, que pueden penetrar eficazmente objetivos blindados.

La rentabilidad del hierro es un factor importante en su uso en aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. En comparación con el níquel, el hierro tiene un coste significativamente menor, y su sustitución parcial puede reducir eficazmente el coste de producción de la aleación sin sacrificar significativamente su rendimiento. Esto hace que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro sean más competitivas en sectores civiles, como la fabricación de pesas para equipos deportivos o herramientas industriales. Sin embargo, el hierro presenta una baja resistencia a la corrosión y se oxida fácilmente en ambientes húmedos o ácidos, por lo que es necesario confiar en la resistencia a la corrosión del níquel para compensar esta deficiencia. En la producción real, la proporción de níquel a hierro debe optimizarse con precisión para equilibrar la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la corrosión y el coste.

El ferromagnetismo del hierro también confiere ciertas propiedades magnéticas a la aleación de tungsteno-níquel-hierro. Al igual que con el níquel, la adición de hierro reduce el magnetismo de la aleación, lo cual resulta ventajoso en ciertas aplicaciones que requieren respuesta magnética, como dispositivos electromagnéticos o sistemas de posicionamiento magnético. Además, la adición de hierro también puede ajustar el coeficiente de expansión térmica y la conductividad térmica de la aleación, de modo que mantenga un rendimiento estable en entornos de alta temperatura o ciclos térmicos.

Cabe señalar que un aumento en el contenido de hierro puede afectar negativamente las propiedades de la aleación. Por ejemplo, una proporción de hierro demasiado alta puede reducir la resistencia a la corrosión de la aleación o inducir cambios de fase innecesarios durante la sinterización a alta temperatura, lo que afecta la estabilidad de la microestructura. Por lo tanto, en el diseño de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, el contenido de hierro suele controlarse a una proporción menor (por ejemplo, entre el 2 % y el 5 %) para garantizar un rendimiento equilibrado.

1.3 Antecedentes históricos y desarrollo de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

Como material de aleación de alta densidad, la historia y el desarrollo de la aleación de tungsteno-níquel-hierro están estrechamente relacionados con el progreso de la tecnología industrial moderna. Desde que se reconocieron las propiedades únicas del tungsteno a finales del siglo XIX, las aleaciones a base de tungsteno se han convertido gradualmente en el foco de investigación en el campo de los materiales de alto rendimiento. Al combinar la alta densidad del tungsteno con las propiedades de enlace del níquel y el hierro, la aleación de tungsteno-níquel-hierro supera las dificultades de procesamiento de los materiales de tungsteno puro y gradualmente ocupa una posición importante en los campos aeroespacial, militar, médico e industrial. Su proceso de desarrollo no solo refleja el progreso de la ciencia de los materiales, sino también la creciente demanda de materiales de alto rendimiento.

de tungsteno -níquel-hierro se beneficiaron de la madurez de la tecnología pulvimetalúrgica, especialmente del avance de la sinterización en fase líquida, que permitió la producción a gran escala a mediados del siglo XX. Con la aceleración de la industrialización global, en particular la demanda de materiales de alto rendimiento durante la Segunda Guerra Mundial, el desarrollo y la aplicación de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se han impulsado rápidamente. Desde el ámbito militar inicial hasta los posteriores campos civil y médico, el ámbito de aplicación de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se ha ampliado continuamente y su rendimiento se ha optimizado continuamente. A continuación, se analizará en detalle el descubrimiento de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, sus primeras aplicaciones y avances tecnológicos.

1.3.1 Descubrimiento de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro está estrechamente relacionada con el estudio de las características del tungsteno y el desarrollo de la pulvimetalurgia. Al ser un metal raro con alta densidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y alto punto de fusión, el tungsteno atrajo la atención de los científicos ya a finales del siglo XVIII. En 1783, los químicos españoles hermanos Eluard separaron por primera vez el tungsteno del ácido tungstico y confirmaron su alta densidad ($19,25 \text{ g/cm}^3$) y alto punto de fusión ($3410 \text{ }^\circ\text{C}$). Sin embargo, debido a su fragilidad y la dificultad de procesamiento, sus primeras aplicaciones se limitaron principalmente al tungsteno puro o a compuestos simples de tungsteno, como los filamentos de tungsteno utilizados en la fabricación de bombillas.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro surgió a principios del siglo XX con el auge de la pulvimetalurgia. Desde finales del siglo XIX hasta principios del XX, los científicos de materiales comenzaron a explorar la posibilidad de mejorar las propiedades de procesamiento del tungsteno añadiendo metales de bajo punto de fusión, como el níquel y el hierro. El níquel y el hierro se seleccionaron como fases de enlace debido a su buena ductilidad y bajo punto de fusión (níquel $1455 \text{ }^\circ\text{C}$, hierro $1538 \text{ }^\circ\text{C}$), que pueden formar una fase líquida durante la sinterización a alta temperatura y envolver las partículas de tungsteno de alto punto de fusión para formar una estructura de aleación densa. El prototipo de este método apareció por primera vez en la década de 1920, cuando los investigadores intentaron preparar materiales compuestos a base de tungsteno mediante pulvimetalurgia para satisfacer las necesidades de los sectores industrial y militar.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro surgió en la década de 1930, impulsada principalmente por las necesidades militares. En vísperas de la Segunda Guerra Mundial, la demanda de materiales perforantes de alto rendimiento en varios países aumentó drásticamente, y la alta densidad y dureza del tungsteno lo convirtieron en la opción ideal para los núcleos de proyectiles perforantes. Sin embargo, la fragilidad del tungsteno puro dificulta su procesamiento en formas complejas, lo que limita su aplicación. Los investigadores han descubierto que, añadiendo níquel y hierro, se puede mejorar significativamente la tenacidad y la maquinabilidad de los materiales a base de tungsteno. A finales de la década de 1930, instituciones de investigación científica de Estados Unidos y Alemania desarrollaron casi simultáneamente fórmulas de aleación con tungsteno como cuerpo principal y níquel y hierro como fase de enlace, con una proporción típica de $90\text{W}-7\text{Ni}-3\text{Fe}$. La aparición de esta fórmula marca el nacimiento oficial de la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

El descubrimiento de la aleación de níquel-hierro también se benefició del profundo conocimiento del mecanismo de sinterización en fase líquida. Durante el proceso de sinterización, la fase líquida de níquel y hierro puede rellenar eficazmente los huecos entre las partículas de tungsteno, reducir la porosidad y mejorar la densidad y las propiedades mecánicas de la aleación. Este avance tecnológico sentó las bases para la producción industrial de la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

En la década de 1940, con la mejora de los equipos y procesos de pulvimetalurgia, la eficiencia de producción y la calidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro mejoraron aún más, y sus áreas de aplicación también se expandieron de la industria militar a los campos civil y médico. En resumen, el descubrimiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es el resultado integral de la investigación de las propiedades del tungsteno y el desarrollo de la tecnología de pulvimetalurgia, que ha abierto un nuevo camino para la aplicación de materiales modernos de alto rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.3.2 Aplicaciones tempranas y avances tecnológicos

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se concentraron principalmente en la industria militar, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial (1939-1945). Debido a su alta densidad y dureza, se utilizan ampliamente en la fabricación de núcleos de munición perforante para tanques y vehículos blindados. En comparación con los núcleos de acero tradicionales, los núcleos de aleación de tungsteno-níquel-hierro pueden proporcionar mayor energía cinética en un volumen menor y penetrar eficazmente blindajes pesados. Esta aplicación ha impulsado considerablemente la investigación, el desarrollo y la producción de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, impulsando a los países a invertir grandes recursos para optimizar sus formulaciones y procesos de fabricación.

En términos tecnológicos, la producción de las primeras aleaciones de tungsteno, níquel y hierro se basaba principalmente en procesos de pulvimetalurgia, que incluían tres pasos principales: mezcla, prensado y sinterización. Si bien la tecnología de sinterización de la década de 1940 permitía alcanzar una mayor densidad, aún presentaba algunos problemas, como la distribución desigual de las partículas de tungsteno y la dificultad para controlar la contracción de sinterización. Para solucionar estos problemas, los investigadores han desarrollado equipos más avanzados, como los hornos de sinterización al vacío y la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP). Estas tecnologías permiten sinterizar a temperaturas y presiones más elevadas, mejorando aún más la densidad y las propiedades mecánicas de la aleación. Por ejemplo, la tecnología de prensado isostático en caliente reduce significativamente la porosidad interna de la aleación mediante la sinterización bajo presión isotrópica, de modo que su resistencia a la tracción alcanza los 800-1000 MPa y su elongación alcanza el 10-20 %.

En cuanto al diseño de fórmulas, la proporción típica de las primeras aleaciones de tungsteno-níquel-hierro era 90W-7Ni-3Fe. Sin embargo, a medida que se diversificaron los requisitos de aplicación, los investigadores comenzaron a ajustar la proporción de níquel y hierro para optimizar propiedades específicas. Por ejemplo, aumentar el contenido de níquel puede mejorar la tenacidad de la aleación, lo que la hace adecuada para piezas que requieren resistencia al impacto; aumentar el contenido de hierro puede reducir costos y es adecuado para la producción a gran escala en el sector civil. Además, también se ha comenzado a explorar la adición de oligoelementos (como cobre o cobalto) para mejorar aún más la resistencia a la corrosión o las propiedades magnéticas de la aleación.

En la década de 1950, con el rápido desarrollo de la industria aeroespacial, la aplicación de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se expandió al campo de los componentes de contrapeso. Debido a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), estas aleaciones se utilizan para fabricar contrapesos para aeronaves y helicópteros, como contrapesos de alerones y dispositivos de equilibrado de rotores. Estos componentes deben proporcionar suficiente peso en un espacio limitado, además de requerir buenas propiedades mecánicas y adaptabilidad ambiental. La resistencia a la corrosión y la estabilidad dimensional de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro las convierten en una opción ideal.

En el campo médico, las propiedades de blindaje radiológico de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro comenzaron a llamar la atención en la década de 1960. Gracias a su elevado número atómico ($Z=74$), el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno absorbe eficazmente los rayos X y gamma, por lo que se utiliza en la fabricación de cubiertas protectoras para equipos médicos y contenedores de blindaje radiológico para la industria nuclear. En comparación con los materiales de blindaje tradicionales de plomo, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro presentan mayor densidad y mejor resistencia mecánica, logran el mismo efecto de blindaje con un espesor menor y son más respetuosas con el medio ambiente.

El progreso tecnológico también se refleja en la mejora de la tecnología de procesamiento de aleaciones. El procesamiento mecánico inicial de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro era complejo, especialmente en la fabricación de formas complejas. En la década de 1970, la introducción del mecanizado por control numérico (CNC) y la electroerosión (EDM) mejoraron significativamente la precisión y la eficiencia del mecanizado de la aleación, lo que permitió procesarla en formas geométricas más complejas para satisfacer los requisitos de alta precisión de los sectores aeroespacial y médico.

En resumen, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se aplicó inicialmente principalmente en la industria militar, expandiéndose posteriormente a los sectores aeroespacial y médico. Su desarrollo se benefició del continuo progreso de la pulvimetalurgia, la tecnología de sinterización y la tecnología de procesamiento. Estos avances tecnológicos no solo mejoraron el rendimiento y la eficiencia de producción de la aleación, sino que también impulsaron su amplia aplicación en diversos campos, sentando una base importante para el desarrollo de materiales modernos de alto rendimiento.



Imagen de aleación de tungsteno, níquel y hierro de CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 2 Propiedades físicas y químicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

2.1 Densidad y propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro desempeñan un papel importante en numerosas aplicaciones de alto rendimiento gracias a sus excelentes propiedades físicas y mecánicas. Su alta densidad, excelente resistencia a la tracción y adecuada tenacidad las convierten en materiales ideales para los sectores aeroespacial, militar, médico e industrial. La densidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele estar entre 16,5 y 18,75 g/cm³, cercana a la de metales preciosos como el oro o el platino. Sus propiedades mecánicas se optimizan gracias a la sinergia de la alta dureza del tungsteno y las fases aglutinantes de níquel y hierro. A continuación, se detallarán sus características de alta densidad, así como su resistencia a la tracción y tenacidad.

2.1.1 Características de alta densidad

La aleación de tungsteno-níquel-hierro posee una de sus propiedades físicas más destacadas, debido principalmente a su alta densidad (19,25 g/cm³). Como componente principal de la aleación, su contenido de tungsteno suele estar entre el 85 % y el 95 %, lo que hace que su densidad total sea mucho mayor que la de materiales metálicos comunes como el acero (7,85 g/cm³) o el aluminio (2,7 g/cm³). Ajustando la proporción de níquel y hierro, la densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro se puede controlar con precisión en un rango de 16,5 a 18,75 g/cm³ para satisfacer las necesidades de diferentes aplicaciones. Por ejemplo, la densidad de la aleación 90W-7Ni-3Fe es de aproximadamente 17,0 g/cm³, mientras que la de la aleación 95W-4Ni-1Fe con mayor contenido de tungsteno puede acercarse a los 18,5 g/cm³.

La alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro permite un buen rendimiento en aplicaciones que requieren una alta concentración de peso en un volumen reducido. En el sector aeroespacial, se utiliza a menudo para fabricar componentes de contrapeso para aeronaves y helicópteros, como contrapesos de alerones o contrapesos de rotor. Estos componentes requieren suficiente masa en un espacio limitado para garantizar la estabilidad y el equilibrio de la aeronave. En comparación con materiales tradicionales como el plomo, la aleación de tungsteno-níquel-hierro no solo presenta una mayor densidad, sino también una mayor resistencia mecánica y estabilidad ambiental, evitando los defectos de toxicidad y blandura del plomo.

En la industria militar, la alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le otorga una excelente capacidad de penetración de energía cinética. Por ejemplo, el núcleo perforante utiliza la alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro para concentrar la energía en un área pequeña durante un impacto a alta velocidad, penetrando así eficazmente los objetivos blindados. Además, su alta densidad también le otorga importantes aplicaciones en el campo del blindaje radiológico. El alto número atómico del tungsteno ($Z=74$) le permite absorber eficazmente la radiación de alta energía, como los rayos X y los rayos gamma, por lo que la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente como material de blindaje en equipos médicos (como las cubiertas protectoras de las máquinas CT) y en la industria nuclear (como los contenedores de residuos radiactivos). En comparación con el plomo, la aleación de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno-níquel-hierro puede lograr el mismo efecto de blindaje con un espesor menor, reduciendo así el tamaño del equipo.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está estrechamente relacionada con su microestructura. Durante el proceso de producción pulvimetalúrgica, la tecnología de sinterización en fase líquida permite que el níquel y el hierro formen una matriz que envuelve firmemente las partículas de tungsteno y reduce la porosidad, de modo que la densidad de la aleación se acerca al valor teórico (más del 99%). Esta alta densidad garantiza la estabilidad dimensional de la aleación en entornos de alta tensión o alta temperatura y evita la degradación del rendimiento causada por la porosidad. Además, el bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro (aproximadamente $4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) mejora aún más su estabilidad en entornos con cambios de temperatura, lo que le confiere una ventaja en instrumentos de precisión y aplicaciones de alta temperatura.

2.1.2 Resistencia a la tracción y tenacidad

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro son fundamentales para sus propiedades mecánicas, lo que determina su fiabilidad y su rango de aplicación en entornos de alta tensión. La alta dureza y resistencia del tungsteno constituyen la base de la aleación, mientras que el níquel y el hierro, como fases aglutinantes, mejoran significativamente su tenacidad y resistencia a la fractura. La resistencia a la tracción de una aleación típica de tungsteno-níquel-hierro (como 90W-7Ni-3Fe) se encuentra entre 800 y 1000 MPa, y su elongación es de aproximadamente el 10 % al 20 %, lo que le confiere cierta capacidad de deformación plástica a la vez que mantiene una alta resistencia.

La resistencia a la tracción es la capacidad de la aleación WNiFe de soportar tensiones de tracción sin romperse. Durante el proceso de pulvimetalurgia, la sinterización en fase líquida permite que el níquel y el hierro formen una matriz uniforme que une firmemente las partículas de tungsteno de alta dureza. Esta estructura compuesta permite que la aleación mantenga su integridad estructural en entornos de alta tensión. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, la aleación WNiFe se utiliza para fabricar componentes de contrapeso para álabes de turbinas, sometidos a grandes tensiones de tracción causadas por la rotación a alta velocidad y la vibración. La alta resistencia a la tracción de la aleación garantiza su resistencia a las fallas en condiciones extremas.

La tenacidad es otra característica importante de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, que compensa la fragilidad del tungsteno puro. El tungsteno puro es propenso a fracturas frágiles al ser sometido a impactos o tensiones cíclicas debido a su alta dureza y estructura cristalina. La ductilidad del níquel y la resistencia del hierro generan un efecto sinérgico en la aleación, lo que permite que la aleación de tungsteno-níquel-hierro absorba energía en condiciones de impacto o fatiga y evite fracturas repentinas. Por ejemplo, en la aplicación de núcleos antiblindaje militares, la aleación de tungsteno-níquel-hierro debe mantener la integridad estructural bajo impactos a alta velocidad, y su tenacidad moderada le permite resistir la propagación de grietas causada por el impacto.

La proporción de níquel a hierro tiene un efecto significativo en la resistencia a la tracción y la tenacidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la aleación. Un mayor contenido de níquel (como 7%-10%) puede mejorar la ductilidad y la tenacidad de la aleación, haciéndola más adecuada para aplicaciones que requieren resistencia al impacto; mientras que un mayor contenido de hierro (como 3%-5%) puede aumentar la dureza y la resistencia, pero puede reducir ligeramente la tenacidad. Por lo tanto, en la producción real, la fórmula debe optimizarse según los usos específicos. Por ejemplo, la aleación 90W-7Ni-3Fe logra un buen equilibrio entre resistencia y tenacidad y se usa ampliamente en contrapesos y componentes militares; mientras que las aleaciones con mayor contenido de tungsteno (como 95W-4Ni-1Fe) se centran más en la resistencia y son adecuadas para escenarios que requieren una dureza extremadamente alta.

La microestructura de la aleación de tungsteno-níquel-hierro también influye significativamente en sus propiedades mecánicas. El tamaño y la uniformidad de la distribución de las partículas de tungsteno determinan directamente la resistencia y la tenacidad de la aleación. Las partículas de tungsteno más pequeñas (generalmente de 10 a 50 micras) y la distribución uniforme de la matriz pueden reducir la concentración de tensiones y mejorar la resistencia a la tracción y a la fractura. Además, las técnicas de tratamiento térmico y procesamiento (como el prensado isostático en caliente) pueden optimizar aún más la microestructura de la aleación, eliminar defectos internos y, por lo tanto, mejorar sus propiedades mecánicas.

2.1.3 Dureza y resistencia al desgaste

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro son componentes importantes de sus propiedades mecánicas, lo que les permite un buen rendimiento en entornos de alta tensión y alto desgaste. La dureza refleja la capacidad del material para resistir la deformación y los arañazos, mientras que la resistencia al desgaste determina su vida útil en condiciones de fricción o abrasión. La alta dureza y la excelente resistencia al desgaste de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se deben principalmente a la alta dureza del tungsteno (dureza de Mohs de aproximadamente 7,5) y al efecto sinérgico de las fases de enlace de níquel y hierro, lo que las hace ampliamente utilizadas en entornos que requieren resistencia al desgaste, como núcleos de perforación de blindaje militar, herramientas industriales y componentes aeroespaciales.

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suelen tener una dureza Vickers (HV) de entre 250 y 400, dependiendo del contenido de tungsteno y su microestructura. Por ejemplo, la dureza de la aleación 90W-7Ni-3Fe es de aproximadamente 300 HV, mientras que la de la aleación 95W-4Ni-1Fe con mayor contenido de tungsteno puede alcanzar los 350-400 HV. La alta dureza del tungsteno constituye la base de la aleación, mientras que la matriz de níquel y hierro combina estrechamente las partículas de tungsteno mediante sinterización en fase líquida, lo que reduce los microdefectos y mejora aún más la dureza general. Esta alta dureza permite que la aleación resista la deformación plástica causada por fuerzas externas, y es especialmente adecuada para la fabricación de piezas que requieren alta resistencia y resistencia a la deformación, como núcleos perforantes o contrapesos de alta precisión.

La resistencia al desgaste es otra propiedad clave de la aleación WNiFe, derivada de su alta dureza y microestructura densa. En entornos de fricción o abrasivos, la alta dureza de las partículas de tungsteno puede resistir eficazmente el desgaste superficial, mientras que la tenacidad de la matriz de níquel-hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

evita que el material se agriete o descascare debido al desgaste. Por ejemplo, en el ámbito industrial, la aleación WNiFe se utiliza a menudo para fabricar piezas resistentes al desgaste de moldes o herramientas de corte, que pueden mantener una larga vida útil bajo cargas elevadas y condiciones de fricción repetida. Además, el bajo coeficiente de fricción de la aleación (gracias a las propiedades superficiales del níquel) mejora aún más su resistencia al desgaste y reduce el desgaste en las superficies de contacto.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está estrechamente relacionada con su proceso de producción. La sinterización en fase líquida y el prensado isostático en caliente (HIP) en pulvimetalurgia pueden mejorar significativamente la densidad de la aleación, reducir los poros internos y las microfisuras, y así aumentar la resistencia al desgaste. Además, el tamaño y la distribución de las partículas de tungsteno influyen significativamente en la resistencia al desgaste. Las partículas de tungsteno más pequeñas (10-50 micras) pueden formar una estructura más uniforme, reducir la concentración de tensiones y, por lo tanto, mejorar la resistencia al desgaste. En algunas aplicaciones, el tratamiento superficial (como la carburación o el recubrimiento) puede mejorar aún más la resistencia al desgaste de la aleación, adaptándola a entornos de trabajo más exigentes.

El equilibrio entre dureza y resistencia al desgaste es fundamental en el diseño de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Una dureza demasiado alta puede reducir la tenacidad, haciendo que la aleación sea susceptible a fracturas frágiles en condiciones de impacto. Por lo tanto, es necesario controlar con precisión la proporción de níquel y hierro para lograr el equilibrio óptimo entre dureza y tenacidad. Por ejemplo, aumentar el contenido de níquel puede mejorar la tenacidad, lo cual resulta adecuado para piezas resistentes al desgaste que necesitan resistir impactos; mientras que aumentar el contenido de hierro puede aumentar la dureza, lo cual resulta adecuado para entornos de alto desgaste. En resumen, la alta dureza y resistencia al desgaste de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro les confieren ventajas irremplazables en diversas aplicaciones de alto rendimiento.

2.2 Propiedades térmicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro posee importantes características en entornos de alta temperatura y ciclos térmicos, lo que afecta directamente su aplicación en los sectores aeroespacial, militar e industrial. Sus propiedades térmicas incluyen el punto de fusión, la estabilidad térmica, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica. Entre ellas, el alto punto de fusión y la excelente estabilidad térmica del tungsteno le confieren fiabilidad en condiciones extremas de temperatura, mientras que la adición de níquel y hierro optimiza el equilibrio entre las propiedades térmicas y mecánicas de la aleación.

2.2.1 Punto de fusión y estabilidad térmica

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se ven afectadas principalmente por el tungsteno, que posee el punto de fusión más alto de todos los metales (3410 °C), lo que le confiere una excelente resistencia a altas temperaturas. Si bien los puntos de fusión del níquel (1455 °C) y el hierro (1538 °C) son mucho más bajos que los del tungsteno, en el proceso de fabricación por pulvimetalurgia, las partículas de tungsteno permanecen sólidas durante la sinterización, mientras que el níquel y el hierro forman la matriz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante la sinterización en fase líquida. Por lo tanto, el punto de fusión y la estabilidad térmica de la aleación en su conjunto dependen principalmente de las características de las partículas de tungsteno. La temperatura de uso real de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele ser mucho menor que el punto de fusión del tungsteno, generalmente en el rango de 1000 a 1500 °C, suficiente para satisfacer las necesidades de la mayoría de las aplicaciones de alta temperatura.

La estabilidad térmica es una ventaja importante de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, ya que se refiere a su capacidad para mantener la estructura y el rendimiento en entornos de alta temperatura. El bajo coeficiente de expansión térmica del tungsteno (aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) le otorga una excelente estabilidad dimensional ante los cambios de temperatura, lo que reduce la deformación o el agrietamiento causados por la tensión térmica. Esto es particularmente importante para aplicaciones en el sector aeroespacial, como contrapesos de álabes de turbinas o componentes de naves espaciales, que requieren mantener una geometría precisa en condiciones de alta temperatura y ciclos térmicos. La adición de níquel mejora aún más la estabilidad térmica de la aleación, y su buena resistencia a la oxidación le permite resistir la corrosión oxidativa en entornos de aire a alta temperatura y prolongar su vida útil.

En la industria militar, la estabilidad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la convierte en un material ideal para entornos transitorios de alta temperatura. Por ejemplo, cuando el núcleo de un proyectil perforante impacta un objetivo blindado a alta velocidad, genera altas temperaturas instantáneas. La aleación de tungsteno-níquel-hierro puede soportar estas condiciones extremas sin ablandarse ni sufrir fallos estructurales. Además, en la industria nuclear, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza para fabricar contenedores de blindaje radiológico, y su estabilidad térmica garantiza su fiabilidad en entornos de radiación de alta temperatura.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está relacionada con su microestructura. La estructura densa (densidad cercana al 99%) formada mediante sinterización en fase líquida reduce los poros y defectos internos, lo que reduce la probabilidad de que la aleación experimente cambios de fase o deslizamiento del límite de grano a altas temperaturas. La tecnología de prensado isostático en caliente optimiza aún más la microestructura de la aleación y mejora la estabilidad de sus propiedades mecánicas en entornos de alta temperatura. Sin embargo, la proporción de níquel a hierro tiene cierto efecto en la estabilidad térmica: un contenido de hierro demasiado alto puede reducir la resistencia a la corrosión de la aleación en entornos de alta temperatura debido a su menor resistencia a la oxidación, por lo que la fórmula debe controlarse con precisión.

2.2.2 Coeficiente de expansión térmica

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es un indicador importante de su rendimiento térmico, ya que refleja el grado de cambio dimensional del material cuando cambia la temperatura. El coeficiente de expansión térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele estar entre $4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Este bajo coeficiente de expansión térmica se debe principalmente a las características del tungsteno (el coeficiente de expansión térmica del tungsteno es de aproximadamente $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). El níquel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(aproximadamente $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y el hierro (aproximadamente $12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) tienen coeficientes de expansión térmica más altos, pero debido a que el tungsteno domina la aleación (generalmente 85%-95%), el coeficiente general de expansión térmica de la aleación se mantiene bajo, cercano a las características del tungsteno puro.

El bajo coeficiente de expansión térmica confiere a la aleación de tungsteno, níquel y hierro una excelente estabilidad dimensional en entornos de alta temperatura o ciclos térmicos, y puede resistir eficazmente la tensión térmica o la deformación causada por los cambios de temperatura. Esta característica es especialmente importante en el sector aeroespacial, como en los componentes de contrapeso utilizados para la fabricación de álabes de turbinas de aeronaves o los bloques de equilibrio de naves espaciales, que requieren mantener una geometría precisa en condiciones de calentamiento o enfriamiento rápidos. El bajo coeficiente de expansión térmica garantiza que la aleación no experimente una expansión o contracción significativa del volumen ante fluctuaciones de temperatura, evitando así fallos estructurales o pérdidas de precisión.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está relacionada con su proporción de composición y microestructura. Por ejemplo, el coeficiente de expansión térmica de la aleación 90W-7Ni-3Fe es de aproximadamente $5,0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, mientras que el coeficiente de expansión térmica de la aleación 95W-4Ni-1Fe con un mayor contenido de tungsteno puede ser cercano a $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, mostrando una mejor estabilidad dimensional. La proporción de níquel y hierro tiene cierto efecto en el coeficiente de expansión térmica: aumentar el contenido de níquel o hierro aumentará ligeramente el coeficiente de expansión térmica, por lo que la densidad, la resistencia y las propiedades de expansión térmica deben sopesarse al diseñar la aleación. Además, la sinterización en fase líquida y la tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) en el proceso de pulvimetalurgia pueden aumentar la densidad de la aleación y reducir los microdefectos, mejorando así aún más su estabilidad en los ciclos térmicos.

En aplicaciones prácticas, el bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le confiere ventajas significativas en instrumentos de precisión y entornos de alta temperatura. Por ejemplo, en equipos de protección radiológica en el sector médico, la estabilidad dimensional de la aleación garantiza la precisión y fiabilidad del blindaje durante un uso prolongado. De igual manera, en la industria nuclear, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza para fabricar contenedores de residuos radiactivos. Su bajo coeficiente de expansión térmica permite soportar la tensión térmica en entornos de alta radiación y evitar la deformación o el agrietamiento del contenedor.

2.2.3 Conductividad térmica

La conductividad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es otro aspecto importante de sus propiedades térmicas, que determina el rendimiento del material durante la conducción de calor. El tungsteno tiene una alta conductividad térmica de aproximadamente $173 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, mientras que el níquel (aproximadamente $90 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) y el hierro (aproximadamente $80 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) tienen una conductividad térmica relativamente baja. Dado que el tungsteno representa el contenido dominante en la aleación (generalmente 85%-95%), la conductividad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

generalmente está entre 100-130 W/ m·K , dependiendo de la proporción de la composición y la microestructura. Esta mayor conductividad térmica permite que la aleación transfiera calor rápidamente en entornos de alta temperatura, lo que reduce el riesgo de sobrecalentamiento local.

La alta conductividad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro ofrece un excelente rendimiento en aplicaciones que requieren una disipación térmica eficaz. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, esta aleación se utiliza para fabricar componentes de alta temperatura (como contrapesos de álabes de turbinas). Su buena conductividad térmica permite disipar rápidamente el calor generado durante el funcionamiento al entorno circundante, evitando así fallos por sobrecalentamiento. En la industria electrónica, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza a veces como disipador de calor, aprovechando su alta conductividad térmica y densidad para gestionar la carga térmica de los dispositivos electrónicos y garantizar la estabilidad de los equipos al operar a alta potencia. La conductividad térmica también está estrechamente relacionada con la microestructura y el proceso de producción de la aleación. La densa estructura formada por sinterización en fase líquida (con una densidad cercana al 99 %) reduce la porosidad interna y la dispersión en los límites de grano, mejorando así la eficiencia de la conducción térmica. La tecnología de prensado isostático en caliente optimiza aún más la microestructura de la aleación, reduce la resistencia térmica y mejora la conductividad térmica. Sin embargo, la proporción de níquel a hierro afectará ligeramente la conductividad térmica: un mayor contenido de níquel o hierro puede reducir ligeramente la conductividad térmica general de la aleación debido a su menor conductividad térmica. Por lo tanto, en aplicaciones que requieren alta conductividad térmica, generalmente se prefieren formulaciones con alto contenido de tungsteno como 95W-4Ni-1Fe. La aleación de tungsteno-níquel-hierro también le da una ventaja en el procesamiento de alta temperatura y escenarios de choque térmico transitorio. Por ejemplo, en aplicaciones de núcleo de perforación de blindaje militar, la aleación generará altas temperaturas instantáneas durante impactos de alta velocidad, y su alta conductividad térmica puede dispersar rápidamente el calor para evitar el ablandamiento local o daño estructural. Además, la combinación de conductividad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica mejora aún más el rendimiento de la aleación en entornos de ciclos térmicos, lo que le permite permanecer estable en condiciones de calentamiento y enfriamiento rápidos.

2.3 Estabilidad química de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro posee una característica importante en diversos entornos, lo que determina su vida útil en condiciones corrosivas u oxidantes. Su estabilidad química se debe principalmente a la excelente resistencia a la corrosión del tungsteno y el níquel. Si bien la adición de hierro reduce ligeramente la resistencia a la corrosión, la aleación en su conjunto mantiene una buena estabilidad química gracias al control preciso de la proporción. Esta característica le permite un uso prolongado en entornos húmedos, ácidos o de alta temperatura, y se utiliza ampliamente en ingeniería naval, industria química, médica y nuclear.

El tungsteno posee una estabilidad química extremadamente alta y una buena resistencia a la corrosión frente a la mayoría de los ácidos, álcalis y oxidantes. Por ejemplo, el tungsteno muestra una alta resistencia a la corrosión por ácido clorhídrico, ácido sulfúrico y ácido nítrico a temperatura ambiente, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reacciona escasamente en ácido nítrico o ácido fluorhídrico concentrados a alta temperatura. Esta propiedad permite que la aleación de tungsteno, níquel y hierro mantenga su integridad estructural en ambientes ácidos y es adecuada para la fabricación de piezas resistentes a la corrosión en la industria química, como contrapesos para recipientes de reacción o tuberías.

La adición de níquel mejora aún más la estabilidad química de la aleación. El níquel presenta una alta resistencia a la corrosión por humedad, niebla salina y ambientes alcalinos, especialmente en entornos marinos. La matriz de níquel de la aleación puede formar una densa capa de óxido (principalmente NiO) en la superficie, lo que previene eficazmente reacciones de corrosión posteriores. Esta característica permite que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilicen como contrapesos o componentes estructurales en ingeniería naval, y resisten la erosión del agua de mar y la niebla salina durante mucho tiempo.

El hierro presenta una estabilidad química relativamente baja y es propenso a la corrosión oxidativa, especialmente en ambientes húmedos o ácidos. Sin embargo, en las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, el contenido de hierro suele ser bajo (2-5 %), y la presencia de níquel puede compensar en cierta medida la deficiencia de hierro. Al optimizar la proporción de níquel y hierro (como 90W-7Ni-3Fe), la resistencia a la corrosión de la aleación puede acercarse al nivel de las aleaciones a base de níquel, manteniendo al mismo tiempo una alta densidad y resistencia. Además, la estructura densa formada por el proceso de sinterización en fase líquida reduce la exposición de poros y bordes de grano, lo que reduce aún más la posibilidad de corrosión.

En entornos de alta temperatura, la estabilidad química de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se debe a la resistencia a la oxidación del tungsteno y el níquel. El tungsteno resiste la oxidación a altas temperaturas, mientras que la capa de óxido de níquel protege la superficie de la aleación de reacciones de oxidación posteriores. Esto permite que la aleación mantenga su rendimiento en entornos con aire caliente u oxígeno, como en componentes aeroespaciales o materiales de blindaje de la industria nuclear. Cabe destacar que un contenido de hierro demasiado alto puede provocar un aumento de la oxidación a altas temperaturas, por lo que se suelen seleccionar formulaciones bajas en hierro para aplicaciones de alta temperatura.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también tiene importantes aplicaciones en las industrias médica y nuclear. Por ejemplo, en equipos de protección radiológica, la aleación debe estar expuesta a la radiación y a ambientes húmedos durante largos periodos, y su excelente resistencia a la corrosión garantiza la fiabilidad y seguridad a largo plazo del equipo. En resumen, la estabilidad química de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es una garantía importante para su aplicación en diversos campos, junto con su alta densidad y propiedades mecánicas, lo que la convierte en la opción ideal para materiales de alto rendimiento.

2.3.1 Resistencia a la corrosión

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se caracteriza por su estabilidad química, lo que le permite un uso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

prolongado en diversos entornos corrosivos. Su resistencia a la corrosión se debe principalmente a la excelente resistencia del tungsteno y el níquel. Si bien la adición de hierro reduce ligeramente este rendimiento, la aleación en general mantiene una buena resistencia a la corrosión gracias al control preciso de la proporción de la composición. Esta resistencia a la corrosión la hace ampliamente utilizada en ingeniería naval, industria química, equipos médicos e industria nuclear, especialmente en entornos que requieren resistencia a la corrosión por ácidos, álcalis o niebla salina.

El tungsteno posee una estabilidad química extremadamente alta y exhibe una excelente resistencia a la corrosión frente a la mayoría de los ácidos y álcalis. Por ejemplo, el tungsteno apenas reacciona con el ácido clorhídrico, el ácido sulfúrico y el ácido nítrico diluido a temperatura ambiente, y solo se corroe ligeramente en ácido nítrico concentrado o ácido fluorhídrico a alta temperatura. Esta propiedad permite que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro mantengan su integridad estructural en entornos ácidos, lo que las hace idóneas para su uso en contrapesos o componentes estructurales en la industria química, como componentes resistentes a la corrosión de recipientes de reacción o tuberías. La combinación de la alta densidad del tungsteno y su resistencia a la corrosión le permite ofrecer un rendimiento fiable en volúmenes pequeños.

La adición de níquel mejora significativamente la resistencia a la corrosión de la aleación. El níquel presenta una excelente resistencia a la humedad, la niebla salina y los ambientes alcalinos, especialmente en entornos marinos. En las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, el níquel (generalmente entre un 5 % y un 10 %) forma una matriz de sinterización en fase líquida que genera una densa capa protectora de óxido (principalmente NiO_2) sobre la superficie de la aleación, previniendo eficazmente la erosión por medios corrosivos. Por ejemplo, la aleación 90W-7Ni-3Fe puede mantener la estabilidad superficial durante mucho tiempo en entornos de agua de mar o niebla salina, y es adecuada para contrapesos o componentes estructurales en ingeniería naval, como bloques de equilibrio para buques o equipos de perforación marina.

El hierro presenta una resistencia a la corrosión relativamente baja, especialmente en ambientes húmedos o ácidos, donde es propenso a la oxidación. Sin embargo, debido al bajo contenido de hierro en las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro (generalmente entre un 2 % y un 5 %) y a la presencia de níquel, que puede compensar la deficiencia de hierro, la resistencia general a la corrosión de la aleación sigue siendo alta. La estructura densa (densidad cercana al 99 %) formada por el proceso de sinterización en fase líquida reduce aún más la exposición de poros y bordes de grano, lo que reduce la posibilidad de penetración de medios corrosivos. Además, al optimizar la proporción de níquel a hierro, se puede lograr un equilibrio entre costo y rendimiento. Por ejemplo, aumentar el contenido de níquel (por ejemplo, entre un 7 % y un 10 %) puede mejorar significativamente la resistencia a la corrosión y es adecuado para entornos químicos agresivos.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está relacionada con la calidad de su superficie y la tecnología de procesamiento. El pulido o recubrimiento puede mejorar aún más la resistencia a la corrosión de la aleación y reducir el efecto corrosivo de los defectos superficiales. En la práctica, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza a menudo para fabricar componentes de protección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

radiológica de equipos médicos, como las cubiertas protectoras de las máquinas de tomografía computarizada. Su resistencia a la corrosión garantiza la fiabilidad del equipo para un uso prolongado en entornos húmedos o esterilizados. De igual manera, en la industria nuclear, la aleación se utiliza en la fabricación de contenedores para residuos radiactivos, y su resistencia a la corrosión garantiza la seguridad de los contenedores en entornos complejos.

2.3.2 Propiedades antioxidantes

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es una característica importante para mantener su rendimiento en entornos con alta temperatura o con oxígeno. La resistencia a la oxidación se refiere a la capacidad de un material para resistir las reacciones de oxidación y evitar la degradación del rendimiento causada por la oxidación a alta temperatura. Esta resistencia se debe principalmente a la estabilidad química del tungsteno y el níquel, mientras que la adición de hierro influye en cierta medida en la resistencia a la oxidación a alta temperatura. Sin embargo, mediante un diseño de fórmula razonable, la aleación puede mostrar una buena estabilidad en aire a alta temperatura u otros entornos oxidantes.

El tungsteno posee una excelente resistencia a la oxidación y es prácticamente inactivo al oxígeno a temperatura ambiente y moderada (por debajo de unos 800 °C). En condiciones de alta temperatura, el tungsteno forma lentamente óxidos (como WO_3), pero debido a su alto contenido (85 %-95 %) y a su densa estructura en aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, la reacción de oxidación suele limitarse a la superficie y progresa lentamente. Esta propiedad permite que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro mantengan su integridad estructural en entornos de alta temperatura y es adecuada para componentes de alta temperatura en los sectores aeroespacial y militar, como contrapesos de álabes de turbinas o núcleos de proyectiles perforantes.

La resistencia a la oxidación del níquel es la garantía clave para las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en entornos de alta temperatura. El níquel puede formar una capa protectora de óxido estable en la superficie, impidiendo eficazmente que el oxígeno penetre más en la aleación. Esta capa de óxido puede permanecer estable a altas temperaturas (aproximadamente entre 600 y 1000 °C), lo que confiere a la aleación una larga vida útil en entornos con oxígeno. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan para fabricar piezas rotativas de alta temperatura, y su resistencia a la oxidación garantiza que las piezas no experimenten una degradación significativa de su rendimiento en aire a alta temperatura.

El hierro tiene una baja resistencia a la oxidación, especialmente a altas temperaturas, donde forma fácilmente óxido de hierro (Fe_2O_3 o Fe_3O_4), lo que puede provocar corrosión oxidativa en la superficie de la aleación. Sin embargo, debido al bajo contenido de hierro en la aleación (2%-5%) y a la presencia de níquel, que puede mitigar la tendencia a la oxidación del hierro, la resistencia general a la oxidación de la aleación sigue siendo fuerte. La microestructura densa formada por la sinterización en fase líquida reduce aún más los canales de penetración de oxígeno y mejora la resistencia a la oxidación. En aplicaciones de alta temperatura, generalmente se seleccionan fórmulas con bajo contenido de hierro (como 90W-7Ni-3Fe) para optimizar la resistencia a la oxidación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno -níquel-hierro se utiliza ampliamente en entornos oxidantes y de alta temperatura. Por ejemplo, en la industria nuclear, se utiliza para fabricar contenedores de protección radiológica, que resisten la oxidación en entornos de radiación de alta temperatura y garantizan una fiabilidad a largo plazo. En el sector médico, la resistencia a la oxidación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro garantiza la estabilidad de los equipos de protección radiológica durante la esterilización a alta temperatura o la exposición prolongada al aire. La optimización de procesos (como el prensado isostático en caliente) puede aumentar aún más la densidad de la aleación y reducir los microdefectos sensibles a la oxidación, mejorando así la resistencia a la oxidación.

2.3.3 Reacciones químicas con otros materiales

La aleación de tungsteno-níquel-hierro con otros materiales es un aspecto importante de su estabilidad química, lo que determina su aplicabilidad en entornos químicos complejos. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro generalmente presentan baja actividad química y no reaccionan significativamente con la mayoría de los materiales a temperatura ambiente. Esta inercia se debe principalmente a la alta estabilidad química del tungsteno y el níquel, que permite que la aleación coexista con diversos materiales sin inducir reacciones químicas perjudiciales. Sin embargo, en ciertas condiciones (como altas temperaturas o entornos altamente corrosivos), la aleación puede presentar reacciones químicas limitadas con ciertos materiales, lo cual debe evaluarse según el entorno de aplicación.

El alto contenido de tungsteno en la aleación la hace químicamente inerte a la mayoría de los materiales comunes (p. ej., agua, aire, soluciones salinas). El tungsteno presenta una reactividad muy baja con ácidos (p. ej., ácido clorhídrico, ácido sulfúrico) y puede disolverse solo ligeramente en ácido nítrico o ácido fluorhídrico concentrados a altas temperaturas. En contacto con materiales metálicos, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro no suelen causar corrosión galvánica significativa, ya que el potencial de electrodo del tungsteno es alto y la capa de óxido de níquel protege la superficie de la aleación. Por ejemplo, en piezas mecánicas en contacto con aluminio o acero, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro pueden permanecer estables y son adecuadas para su uso como contrapesos o piezas de conexión.

La inercia química del níquel mejora aún más su compatibilidad con otros materiales. El níquel presenta una buena resistencia a la corrosión por sustancias alcalinas y soluciones neutras (como agua o agua salada), y no reacciona químicamente fácilmente con metales comunes ni materiales no metálicos. En equipos médicos, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan a menudo junto con materiales como plásticos, cerámica o vidrio. Por ejemplo, en los componentes de protección contra la radiación de los equipos de tomografía computarizada (TC), la aleación no presenta una reacción química evidente con los materiales no metálicos circundantes y mantiene una estabilidad a largo plazo.

La presencia de hierro puede desencadenar reacciones químicas en determinadas condiciones, especialmente en ambientes húmedos o ácidos, donde el hierro puede oxidarse o corroerse con oxígeno o cloruros. Sin embargo, debido al bajo contenido de hierro (2-5 %) y a los efectos protectores del níquel y el tungsteno, estas reacciones suelen limitarse a la superficie y progresan lentamente. A altas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperaturas, el hierro puede reaccionar con oxígeno o sulfuros para formar óxidos o sulfuros, por lo que las aleaciones con fórmulas bajas en hierro deben seleccionarse con cuidado en ambientes corrosivos de alta temperatura.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro requiere especial atención con ciertos materiales específicos. Por ejemplo, al entrar en contacto con oxidantes fuertes (como ácido nítrico concentrado o peróxidos) a altas temperaturas, la aleación puede experimentar una oxidación superficial lenta, por lo que se requiere un tratamiento superficial (como un recubrimiento) para mejorar su protección. Además, el tungsteno puede reaccionar ligeramente al entrar en contacto con materiales que contienen flúor o ácido fluorhídrico, por lo que no se recomienda su uso en entornos con alto contenido de flúor. En general, la baja actividad química de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permite coexistir de forma segura con la mayoría de los materiales en diversos entornos, siendo especialmente adecuada para la fabricación de estructuras compuestas de múltiples materiales.

2.4 Propiedades electromagnéticas y otras propiedades especiales de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro no solo es conocida por su alta densidad y excelentes propiedades mecánicas, sino que sus propiedades electromagnéticas y otras propiedades especiales también le otorgan ventajas únicas en aplicaciones específicas. Las propiedades electromagnéticas incluyen propiedades magnéticas, conductividad eléctrica y resistividad, las cuales están determinadas por la composición y microestructura de la aleación. La alta densidad y estabilidad química del tungsteno constituyen la base de la aleación, mientras que la adición de níquel y hierro le confiere propiedades electromagnéticas específicas, lo que le confiere un excelente rendimiento en los sectores aeroespacial, electrónico y militar. A continuación, se analizarán en detalle las propiedades magnéticas, la conductividad eléctrica y la resistividad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

2.4.1 Propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro se determinan principalmente por el ferromagnetismo del níquel y el hierro, mientras que el tungsteno en sí es un material no magnético (paramagnético). Tanto el níquel como el hierro son elementos ferromagnéticos que pueden magnetizarse en un campo magnético externo. Por lo tanto, la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele presentar un ferromagnetismo débil, y sus propiedades magnéticas específicas dependen del contenido y la proporción de níquel y hierro. En general, las aleaciones con mayor contenido de níquel (como 7%-10%) (como 90W-7Ni-3Fe) presentan un magnetismo más fuerte, y un mayor contenido de hierro (como 3%-5%) aumentará aún más la intensidad de magnetización, pero el magnetismo general sigue siendo mucho menor que el del níquel o el hierro puros.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro ofrece ventajas en ciertas aplicaciones específicas. Por ejemplo, en situaciones donde se requiere posicionamiento magnético o blindaje electromagnético, se pueden aprovechar las propiedades magnéticas de la aleación, como en el sector aeroespacial para la fabricación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de contrapesos compatibles con electromagnetismo o componentes de sensores. La intensidad de magnetización de la aleación (la magnetización de saturación suele estar en el rango de 0,1 a 0,3 T) es suficiente para satisfacer las necesidades de estas aplicaciones sin interferir con los equipos electrónicos de precisión debido a un magnetismo excesivo. Además, el magnetismo de la aleación puede optimizarse mediante tratamiento térmico o ajuste de la composición, como la reducción de la tensión interna mediante recocido para mejorar aún más la estabilidad de las propiedades magnéticas.

La microestructura también influye significativamente en las propiedades magnéticas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro. La densa estructura formada por la sinterización en fase líquida permite que el níquel y el hierro se distribuyan uniformemente alrededor de las partículas de tungsteno, formando una matriz magnética continua. Esta estructura mejora la permeabilidad magnética y reduce la pérdida por histéresis, lo que mejora la respuesta de la aleación en campos magnéticos dinámicos. Sin embargo, un contenido de hierro demasiado alto puede provocar inestabilidad en las propiedades magnéticas, especialmente en entornos de alta temperatura o corrosivos, donde la oxidación del hierro puede afectar las propiedades de la matriz magnética. Por lo tanto, al diseñar aleaciones, el contenido de hierro suele controlarse a un nivel bajo (por ejemplo, entre el 2 % y el 5 %) para equilibrar el magnetismo y la resistencia a la corrosión.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también tiene aplicaciones potenciales en el ámbito militar. Por ejemplo, en sistemas de armas de accionamiento electromagnético o sensores magnéticos, su bajo magnetismo puede proporcionar una respuesta magnética moderada, mientras que su alta densidad y resistencia cumplen con los requisitos estructurales. En el ámbito médico, las propiedades magnéticas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro deben considerarse cuidadosamente. Por ejemplo, al utilizarla cerca de equipos de resonancia magnética, es necesario garantizar que su bajo magnetismo no interfiera con la uniformidad del campo magnético.

2.4.2 Conductividad

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es un indicador importante de sus propiedades electromagnéticas, reflejando la capacidad del material para conducir corriente eléctrica. La conductividad eléctrica se expresa usualmente en Siemens por metro (S/m), que es el recíproco de la resistividad. La conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro se ve afectada por su composición y microestructura. El tungsteno tiene una conductividad eléctrica más alta (aproximadamente $1,82 \times 10^7$ S/m), mientras que el níquel (aproximadamente $1,43 \times 10^7$ S/m) y el hierro (aproximadamente $1,0 \times 10^7$ S/m) tienen una conductividad eléctrica ligeramente menor. Dado que el tungsteno domina la aleación (85%-95%), la conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro está usualmente entre $1,0 \times 10^7$ - $1,5 \times 10^7$ S/m, que es menor que el tungsteno puro pero mayor que el acero ordinario.

Su alta conductividad eléctrica confiere a las aleaciones de WNiFe ciertas ventajas en aplicaciones que requieren conducción de corriente. Por ejemplo, en la industria electrónica, esta aleación puede utilizarse para fabricar electrodos o componentes de conexión, aprovechando su alta densidad y conductividad eléctrica para garantizar una transferencia de corriente eficiente y estabilidad estructural. En el sector

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aeroespacial, las aleaciones de WNiFe se utilizan a veces como contrapesos en sistemas eléctricos, y su conductividad eléctrica ayuda a reducir las pérdidas de calor resistivas y a mejorar la eficiencia general del sistema. Además, la conductividad eléctrica de la aleación, combinada con su alta conductividad térmica (100-130 W/ m·K), le confiere un excelente rendimiento en entornos donde es necesario gestionar tanto el calor como la corriente, como en disipadores de calor o componentes de puesta a tierra.

La conductividad eléctrica también está estrechamente relacionada con la microestructura de la aleación. La estructura densa formada mediante sinterización en fase líquida y prensado isostático en caliente (HIP) reduce el efecto de dispersión de los límites de grano y los poros, y mejora la eficiencia de la conducción electrónica. La relación níquel-hierro influye en la conductividad eléctrica: un mayor contenido de níquel contribuye a mantener una conductividad eléctrica más alta, mientras que un mayor contenido de hierro puede reducir ligeramente la conductividad eléctrica general de la aleación debido a su menor conductividad. Por lo tanto, en aplicaciones que requieren alta conductividad eléctrica, se suelen seleccionar aleaciones con fórmulas ricas en tungsteno y bajas en hierro, como 95W-4Ni-1Fe.

Cabe señalar que la conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro puede disminuir ligeramente a altas temperaturas, ya que el aumento de temperatura incrementa la dispersión de electrones y reduce la eficiencia de la conductividad. Sin embargo, debido a su alto punto de fusión y estabilidad térmica, la conductividad de la aleación varía relativamente poco en entornos de alta temperatura, lo que la hace adecuada para su uso en dispositivos electrónicos de alta temperatura. En general, la conductividad eléctrica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la hace práctica en aplicaciones eléctricas y electrónicas, especialmente en entornos que requieren alta densidad y propiedades conductivas.

2.4.3 Resistividad

Resistividad eléctrica es el recíproco de la conductividad, reflejando la capacidad de un material para bloquear el paso de la corriente eléctrica, y usualmente se expresa en ohm-metro ($\Omega \cdot m$). La resistividad de aleación de tungsteno-níquel-hierro está generalmente entre 6.7×10^{-8} - $1.0 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$, el valor específico depende de la relación de composición y microestructura. El tungsteno tiene una resistividad baja (alrededor de $5.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$), mientras que el níquel (alrededor de $7.0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) y el hierro (alrededor de 1.0×10^{-7}). Dado que el tungsteno es el componente principal de la aleación, la resistividad de la aleación es cercana a la del tungsteno, pero ligeramente más alta que la del tungsteno puro.

La baja resistividad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le otorga una ventaja en aplicaciones que requieren una conducción eficiente de la corriente. Por ejemplo, en dispositivos electrónicos, la aleación puede utilizarse como componente conductor o material de electrodo, aprovechando su baja resistividad para reducir la pérdida de energía, mientras que su alta densidad cumple con los requisitos estructurales. En el ámbito militar, la baja resistividad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la hace potencialmente aplicable en sistemas de accionamiento electromagnético (como cañones electromagnéticos), que pueden conducir grandes corrientes eficientemente, soportando altas tensiones y altas temperaturas instantáneas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La resistividad está estrechamente relacionada con la microestructura de la aleación. La sinterización en fase líquida y el prensado isostático en caliente en procesos de pulvimetalurgia permiten formar una estructura de alta densidad, reducir los obstáculos a la conducción electrónica causados por los límites de grano y los defectos, y, por lo tanto, reducir la resistividad. La relación níquel-hierro influye en la resistividad: un mayor contenido de hierro la aumenta ligeramente, mientras que la adición de níquel ayuda a mantenerla baja. Por ejemplo, la resistividad de la aleación 90W-7Ni-3Fe es de aproximadamente $8,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$, mientras que la resistividad de la aleación 95W-4Ni-1Fe puede ser de tan solo $7,0 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$.

En entornos de alta temperatura, la resistividad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura debido a una mayor dispersión de electrones. Sin embargo, el alto punto de fusión y la estabilidad térmica del tungsteno garantizan que la resistividad cambie poco, lo que permite que la aleación mantenga una buena conductividad en aplicaciones electrónicas de alta temperatura. Además, la resistividad de la aleación, combinada con su resistencia a la corrosión, le permite mantener propiedades eléctricas estables en entornos húmedos o químicos, lo que la hace adecuada para su uso en piezas conductoras en ingeniería naval o la industria química.

2.4.4 Resistencia a la radiación

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es una de sus características más importantes en la industria nuclear y el campo médico, lo que la convierte en la opción preferida para materiales de protección contra la radiación. Su resistencia a la radiación se debe principalmente a su elevado número atómico ($Z=74$) y a su alta densidad (la densidad de la aleación suele estar entre 16,5 y 18,75 g/cm³), lo que le confiere una gran capacidad para absorber y proteger contra radiaciones de alta energía, como rayos X, rayos gamma y neutrones. Si bien el níquel y el hierro, como fases aglutinantes, contribuyen menos a la protección contra la radiación, su resistencia a la radiación puede mejorarse aún más optimizando la microestructura y la proporción de la composición de la aleación.

El alto número atómico del tungsteno le confiere un alto efecto fotoeléctrico y una alta probabilidad de dispersión Compton al interactuar con fotones de alta energía (como rayos X y gamma), atenuando así eficazmente la energía de la radiación. En comparación con materiales de blindaje tradicionales como el plomo (densidad de 11,34 g/cm³, $Z=82$), la aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta mayor densidad y resistencia mecánica, y puede lograr el mismo efecto de blindaje con un espesor menor, evitando la toxicidad y los problemas ambientales del plomo. Por ejemplo, en el campo médico, la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente para fabricar cubiertas protectoras para máquinas de tomografía computarizada y equipos de rayos X. Su alta densidad permite el diseño de equipos más compactos y reduce la ocupación de espacio.

En la industria nuclear, la resistencia a la radiación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la hace idónea para contenedores de residuos radiactivos y componentes de blindaje de reactores nucleares. Esta aleación no solo protege eficazmente contra los rayos gamma, sino que también posee cierta capacidad de absorción de la radiación neutrónica. El blindaje neutrónico suele requerir la combinación de otros

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materiales (como compuestos de boro), pero su alta densidad y estabilidad estructural la convierten en un sustrato ideal para sistemas de blindaje compuestos. Además, su resistencia a la corrosión y estabilidad térmica garantizan su fiabilidad para un uso prolongado en entornos de radiación, evitando así la degradación del rendimiento en condiciones de alta temperatura o humedad.

La aleación de tungsteno-níquel-hierro también está estrechamente relacionada con su microestructura. La sinterización en fase líquida y el prensado isostático en caliente (HIP) en el proceso de pulvimetalurgia permiten que la aleación alcance una densidad cercana al valor teórico (superior al 99%), reduciendo la porosidad y los defectos, y por consiguiente la posibilidad de penetración de la radiación. La proporción de níquel a hierro tiene poco efecto en el rendimiento de blindaje, pero un alto contenido de tungsteno (como 95W-4Ni-1Fe) suele ofrecer una mejor resistencia a la radiación, ya que este determina directamente la densidad y la capacidad de absorción de la aleación.

Cabe señalar que la estabilidad a largo plazo de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en entornos de alta radiación puede verse afectada por el níquel y el hierro. El níquel y el hierro pueden experimentar ligeros cambios en su estructura cristalina bajo altas dosis de radiación, lo que resulta en ligeras variaciones en su rendimiento. Por lo tanto, en entornos de radiación extrema, es necesario mejorar aún más la resistencia a la radiación mediante un recubrimiento superficial o una formulación optimizada (como la reducción del contenido de hierro). En general, la resistencia a la radiación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le confiere ventajas significativas en aplicaciones en los sectores médico, nuclear y aeroespacial (como la protección radiológica de satélites).

2.5 CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro MSDS

Productos químicos y logotipos de empresas: Este material es aleación de tungsteno, níquel y hierro, producido por CTIA GROUP LTD.

Composición/ Información de la composición: La aleación de tungsteno-níquel-hierro es una aleación de alta densidad, compuesta principalmente por tungsteno (W, n.º CAS: 7440-33-7, 85 %-95 %), níquel (Ni, n.º CAS: 7440-02-0, 5 %-10 %), hierro (Fe, n.º CAS: 7439-89-6, 2 %-5 %). Esta aleación se fabrica mediante pulvimetalurgia, con tungsteno como componente principal y níquel y hierro como fase aglutinante. Puede contener trazas de impurezas, pero esto no afecta su rendimiento.

Descripción general de peligros : La aleación de tungsteno, níquel y hierro es relativamente segura en forma masiva.

1. Propiedades físicas y químicas

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es un sólido metálico de color gris plateado con una densidad de 16,5-18,75 g/cm³. Al estar bajo la influencia de la matriz de níquel-hierro, su punto de fusión se sitúa entre 1450 y 1500 °C. Es insoluble en agua y resistente a la mayoría de las corrosivas ácidas y alcalinas. Es estable en forma de bloque.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Estabilidad y reactividad

La aleación es químicamente estable a temperatura ambiente, pero debe evitarse el contacto con oxidantes fuertes (como ácido nítrico y peróxido) o ácido fluorhídrico a altas temperaturas. Los materiales prohibidos incluyen oxidantes fuertes y azufre para prevenir posibles reacciones químicas.

3. Información toxicológica

Los compuestos de níquel están clasificados como carcinógenos de clase 1 por el IARC. La inhalación prolongada de polvo de níquel puede causar enfermedades respiratorias o reacciones alérgicas. El tungsteno y el hierro son menos tóxicos, pero la inhalación de polvo puede causar irritación mecánica. Se debe evitar la exposición prolongada al polvo.

4. Información ecológica

La aleación de tungsteno, níquel y hierro es insoluble en agua y tiene un bajo impacto ambiental. Sin embargo, los residuos deben gestionarse de acuerdo con la normativa ambiental para garantizar la seguridad ecológica.

5. Información de envío

La aleación de tungsteno, níquel y hierro no es una carga peligrosa y puede transportarse como material metálico general.

6. Información reglamentaria

Esta Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) cumple con la norma GB/T 16483-2008, Contenido y secuencia de elementos de las Hojas de Datos de Seguridad Química. Níquel.

7. Otra información

Esta hoja de datos de seguridad (MSDS) se basa en una fórmula típica de aleación de tungsteno, níquel y hierro. Los datos específicos pueden variar ligeramente debido a las diferentes fórmulas.



Imagen de aleación de tungsteno, níquel y hierro de CTIA GROUP LTD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 3 Preparación y procesamiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

3.1 Selección de materia prima y pretratamiento

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro tienen una influencia crucial en su rendimiento final. La selección de la materia prima y el pretratamiento son el punto de partida de todo el proceso, lo que determina directamente su pureza, microestructura y estabilidad. Estas aleaciones se producen principalmente mediante pulvimetalurgia, que implica la selección y el pretratamiento de tres materias primas principales: tungsteno, níquel y hierro. La pureza, el tamaño de partícula y las propiedades químicas de las materias primas afectan significativamente el efecto de sinterización, la densidad y las propiedades mecánicas de la aleación. Por lo tanto, una selección científica y razonable de la materia prima y un proceso de pretratamiento son fundamentales para garantizar la calidad de la aleación. A continuación, se detallarán los requisitos de pureza del tungsteno, el níquel y el hierro, así como el proceso de pretratamiento de las materias primas.

3.1.1 Requisitos de pureza para tungsteno, níquel y hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro depende en gran medida de la pureza de las materias primas, ya que las impurezas pueden causar defectos microestructurales, degradación del rendimiento o mayor dificultad de procesamiento. El tungsteno, el níquel y el hierro son los componentes principales de la aleación, y sus requisitos de pureza suelen estar determinados por el escenario de aplicación (como el aeroespacial, el militar o el médico) y los requisitos de rendimiento. A continuación, se presentan los requisitos de pureza de cada elemento y su impacto en el rendimiento de la aleación.

Tungsteno (W) : El tungsteno es el componente principal de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, representando el 85%-95%. Su pureza es crucial para la densidad, dureza y resistencia a la radiación de la aleación. La industria generalmente requiere que la pureza del polvo de tungsteno alcance el 99.9% (3N) o superior, preferiblemente por encima del 99.95% (4N) para reducir la influencia de impurezas como el oxígeno, el carbono y el azufre. El contenido excesivo de oxígeno (>0.05%) puede conducir a la formación de inclusiones de óxido durante la sinterización, reduciendo la densidad y las propiedades mecánicas de la aleación; las impurezas de carbono o azufre pueden causar fragilización del límite de grano y afectar la tenacidad. En aplicaciones de alta precisión, se requiere polvo de tungsteno de alta pureza (99.99%) para garantizar una excelente resistencia a la radiación y estabilidad química.

Níquel (Ni) : El níquel actúa como una fase de enlace, representando 5%-10%, y es responsable de mejorar la tenacidad y la resistencia a la corrosión de la aleación. La pureza del níquel generalmente se requiere para alcanzar 99.8% (2N8) o superior, preferiblemente 99.9% (3N). Las impurezas comunes en el níquel incluyen azufre, fósforo y silicio. El contenido excesivo de azufre (>0.01%) puede conducir a la formación de una fase de bajo punto de fusión durante la sinterización, afectando la estabilidad térmica de la aleación; el fósforo puede reducir la tenacidad y el silicio puede afectar la uniformidad de la sinterización en fase líquida. El níquel de alta pureza puede asegurar la formación de una matriz estable durante la sinterización en fase líquida, mejorar la fuerza de enlace de las partículas de tungsteno y, por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo tanto, mejorar la resistencia a la tracción (800-1000 MPa) y el alargamiento (10%-20%) de la aleación.

Hierro (Fe) : El hierro representa entre el 2 % y el 5 % de la aleación y se utiliza para mejorar la dureza y reducir los costos. Su requisito de pureza suele ser del 99,5 % (2N5) o superior. Las principales impurezas del hierro son el oxígeno, el carbono y el nitrógeno. Un contenido demasiado alto de oxígeno (>0,1 %) puede provocar la formación de óxido de hierro durante la sinterización, lo que reduce la resistencia a la corrosión; un contenido demasiado alto de carbono (>0,05 %) puede provocar la precipitación de carburo y afectar la tenacidad de la aleación. En algunas aplicaciones de alta resistencia a la corrosión (como la ingeniería naval), se requiere hierro de mayor pureza (99,9 %) para reducir la tendencia a la corrosión. La pureza del hierro también afecta a las propiedades magnéticas de la aleación. Un menor contenido de impurezas ayuda a mantener estable el ferromagnetismo débil.

Para satisfacer las necesidades de las diferentes aplicaciones, es necesario optimizar la pureza de la materia prima según la fórmula específica y los requisitos de rendimiento. Por ejemplo, la aleación 90W-7Ni-3Fe requiere alta densidad y resistencia en el ámbito militar (como núcleos perforantes), por lo que se prefieren el tungsteno de alta pureza (99,95 %) y el níquel (99,9 %). En el ámbito civil (como las pesas para equipos deportivos), la pureza del hierro puede reducirse adecuadamente para controlar los costos. Los proveedores suelen proporcionar materias primas que cumplen con las normas ASTM B777 o ISO para garantizar la pureza y la consistencia.

3.1.2 Proceso de pretratamiento de la materia prima

El pretratamiento de la materia prima es un paso importante en la preparación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro. Su objetivo es optimizar el tamaño de partícula, la morfología y el estado químico de los polvos de tungsteno, níquel y hierro para asegurar el correcto desarrollo de los procesos posteriores de mezclado, prensado y sinterización. El proceso de pretratamiento incluye el cribado, la limpieza, la reducción y la activación del polvo, y cada paso influye significativamente en el rendimiento final de la aleación.

Cribado de polvos : Los polvos de tungsteno, níquel y hierro deben cribarse para eliminar partículas de mayor o menor tamaño y asegurar una distribución uniforme del tamaño de partícula. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno se controla generalmente entre 1 y 10 micras, preferiblemente entre 3 y 5 micras, para garantizar una alta densidad y una microestructura uniforme durante la sinterización. El tamaño de partícula de los polvos de níquel y hierro es ligeramente mayor, generalmente entre 5 y 20 micras, para favorecer la fluidez durante la sinterización en fase líquida. El cribado suele utilizar una criba vibratoria o un equipo de clasificación por flujo de aire, y el tamaño de la criba se selecciona según el tamaño de partícula deseado (por ejemplo, malla 200-400). Una distribución uniforme del tamaño de partícula contribuye a mejorar la uniformidad de la mezcla y la eficiencia de la sinterización, además de reducir la porosidad.

Limpieza y eliminación de impurezas : El polvo crudo puede contener óxidos superficiales, aceite u otras impurezas que deben eliminarse mediante limpieza. El polvo de tungsteno se suele limpiar con un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ácido diluido (como ácido clorhídrico diluido) para eliminar los óxidos superficiales (WO_3), luego se enjuaga con agua desionizada y se seca. Los polvos de níquel y hierro deben limpiarse cuidadosamente para evitar la introducción de nuevos óxidos. Generalmente se limpian con disolventes orgánicos (como etanol) y luego se secan al vacío o con un gas inerte (como nitrógeno). El proceso de limpieza requiere controlar el tiempo y la temperatura para evitar la aglomeración del polvo o la alteración de sus propiedades químicas.

de reducción : El polvo de tungsteno puede contener óxidos (como WO_2 o WO_3) durante su producción, que deben eliminarse mediante un tratamiento de reducción con hidrógeno. La reducción se realiza habitualmente en un horno de atmósfera de hidrógeno a 700-900 °C durante 1-2 horas para garantizar que el contenido de oxígeno descienda por debajo del 0,05 %. Los polvos de níquel y hierro también pueden requerir un tratamiento de reducción suave para eliminar la capa de óxido superficial y mejorar la sinterización. El proceso de reducción requiere un control estricto de la pureza de la atmósfera (pureza del hidrógeno >99,99 %) para evitar la introducción de nuevas impurezas.

Activación del polvo : Para mejorar la sinterización del polvo, el tungsteno puede activarse mecánicamente, como mediante molienda de bolas de alta energía. Esta molienda puede refinar las partículas de tungsteno (a 1-3 micras), aumentar su energía superficial y favorecer la combinación con níquel y hierro. El tiempo de molienda de bolas suele ser de 2 a 4 horas. Un tiempo demasiado largo puede introducir impurezas o causar aglomeración de partículas. Los polvos de níquel y hierro generalmente no requieren una activación excesiva, ya que sus puntos de fusión más bajos son suficientes para formar una fase líquida durante la sinterización. El proceso de activación debe realizarse en una atmósfera inerte (como argón) para evitar la oxidación.

Pretratamiento de la mezcla : En algunos casos, es necesario premezclar los polvos de tungsteno, níquel y hierro o añadir aditivos antes de la mezcla formal para mejorar su fluidez. Por ejemplo, se puede añadir una pequeña cantidad de aglutinante orgánico (como alcohol polivinílico, PVA, 0,1-0,5 %) para mejorar el rendimiento de prensado del polvo. La premezcla suele realizarse con un mezclador en V o un mezclador tridimensional durante 4-8 horas para garantizar una distribución uniforme de los componentes. Evite la entrada de humedad o aire durante el proceso de mezcla para prevenir la oxidación.

Un polvo con un tamaño de partícula demasiado grande puede provocar una sinterización incompleta y reducir la densidad; un contenido de oxígeno demasiado alto puede causar poros o inclusiones, lo que afecta las propiedades mecánicas. Por lo tanto, los parámetros del proceso de pretratamiento deben controlarse estrictamente y la composición química de las materias primas debe analizarse mediante espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF) o espectroscopia de plasma acoplado inductivamente (ICP) para garantizar el cumplimiento de los requisitos de pureza y calidad. Estos pasos sientan las bases para la preparación de alto rendimiento de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro.

3.2 Método de preparación de aleación de tungsteno-níquel-hierro

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se basan principalmente en la tecnología de pulvimetalurgia,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

un método para formar materiales densos mediante la mezcla, el prensado y la sinterización de polvos metálicos. Este proceso supera eficazmente las dificultades de procesamiento causadas por el alto punto de fusión (3410 °C) y la fragilidad de los materiales de tungsteno puro. Además, gracias a la unión del níquel y el hierro, la aleación presenta excelentes propiedades mecánicas y maquinabilidad. El proceso de preparación de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele incluir etapas como la mezcla de la materia prima, el prensado, la sinterización y el posprocesamiento, entre las cuales la tecnología de sinterización en fase líquida es clave para lograr una alta densidad y un alto rendimiento. A continuación, se detallará el método de pulvimetalurgia y su tecnología principal: la sinterización en fase líquida.

3.2.1 Metalurgia de polvos

La pulvimetalurgia es el principal método industrial para la preparación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, ideal para la producción de piezas de aleación de alta densidad (16,5-18,75 g/cm³) y alta resistencia (resistencia a la tracción de 800-1000 MPa). Este método forma una estructura de aleación densa mediante la mezcla de polvos de tungsteno, níquel y hierro de alta pureza en una proporción específica, el prensado y la sinterización a alta temperatura. Sus ventajas son el control preciso de la proporción de componentes, la obtención de formas geométricas complejas y su idoneidad para la producción a gran escala. A continuación, se presentan los pasos principales y los puntos técnicos clave para la preparación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro mediante pulvimetalurgia.

Mezcla de materia prima : El proceso de preparación comienza con la mezcla de polvo de tungsteno de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula 1-10 micras), polvo de níquel (pureza $\geq 99,8\%$, tamaño de partícula 5-20 micras) y polvo de hierro (pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 5-20 micras) en una proporción objetivo (como 90W-7Ni-3Fe). La mezcla se lleva a cabo generalmente en un mezclador de tipo V o un mezclador tridimensional durante 4-8 horas para asegurar que los componentes se distribuyan uniformemente. El proceso de mezcla debe llevarse a cabo bajo la protección de un gas inerte (como argón o nitrógeno) para evitar la oxidación del polvo. Para mejorar la fluidez del polvo, se puede agregar una pequeña cantidad de aglutinante orgánico (como alcohol polivinílico, 0,1%-0,5%), pero debe asegurarse de que se volatilice completamente durante la sinterización posterior.

Moldeo por compresión : El polvo mezclado se prensa para formar un cuerpo verde mediante prensado isostático en frío (CIP) o moldeo por compresión. El prensado isostático en frío se realiza generalmente a una presión de 100-200 MPa, lo que permite formar un cuerpo verde uniforme y es adecuado para la producción de piezas con formas complejas. El moldeo por compresión es adecuado para formas simples, y la presión generalmente es de 50-150 MPa. Durante el proceso de prensado, es necesario controlar la presión y el tiempo de mantenimiento (generalmente de 1 a 3 minutos) para garantizar que el cuerpo verde tenga la resistencia suficiente (resistencia en verde) para su posterior manipulación. La densidad del cuerpo verde suele ser del 50 % al 70 % de la densidad teórica, lo que proporciona la base para la sinterización posterior.

Sinterización : El cuerpo verde prensado se sinteriza a alta temperatura para formar una estructura de aleación densa. La sinterización se realiza generalmente en un horno de vacío o en atmósfera de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

hidrógeno, con una temperatura controlada entre 1400 y 1550 °C, inferior al punto de fusión del tungsteno, pero superior al del níquel (1455 °C) y el hierro (1538 °C). De esta manera, el níquel y el hierro forman una fase líquida y promueven la unión de las partículas de tungsteno. El tiempo de sinterización es de 1 a 4 horas, dependiendo del tamaño del cuerpo verde y la densidad deseada. Tras la sinterización, la densidad de la aleación puede superar el 99 % del valor teórico, lo que mejora significativamente las propiedades mecánicas.

Posprocesamiento : Las aleaciones sinterizadas pueden requerir un procesamiento posterior , como tratamiento térmico, mecanizado o tratamiento superficial. El tratamiento térmico (como el recocido) puede eliminar las tensiones internas y mejorar la tenacidad. El mecanizado (como torneado, fresado o electroerosión) se utiliza para obtener la forma final, y se requieren herramientas de carburo para soportar la alta dureza de la aleación (dureza Vickers de 250 a 400). El tratamiento superficial (como pulido o recubrimiento) puede mejorar la resistencia a la corrosión o al desgaste.

La ventaja de la pulvimetalurgia reside en su flexibilidad y eficiencia, lo que permite producir una variedad de productos, desde pequeñas piezas de precisión hasta grandes contrapesos. Sin embargo, los parámetros del proceso (como la uniformidad de la mezcla, la presión de prensado y la temperatura de sinterización) deben controlarse estrictamente para evitar problemas como porosidad, inclusiones o segregación de componentes. La pulvimetalurgia también puede combinarse con otras tecnologías (como el prensado isostático en caliente) para optimizar aún más el rendimiento, lo que hace que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilicen ampliamente en los sectores aeroespacial, militar y médico.

3.2.2 Tecnología de sinterización en fase líquida

Aleación de tungsteno-níquel-hierro obtenida mediante pulvimetalurgia , lo que permite formar una estructura de aleación de alta densidad y alto rendimiento. A diferencia de la sinterización en fase sólida, la sinterización en fase líquida aprovecha las propiedades líquidas del níquel y el hierro a altas temperaturas para mejorar significativamente la eficiencia de unión de las partículas de tungsteno y la densidad de la aleación. La clave de la sinterización en fase líquida reside en controlar la temperatura, la atmósfera y el tiempo de sinterización para garantizar la formación y distribución uniforme de la fase líquida, evitando la sobrecombustión o la pérdida de fase líquida.

Principio de sinterización en fase líquida : Durante el proceso de sinterización, la temperatura alcanza los 1400-1550 °C, lo que supera el punto de fusión del níquel y el hierro, pero es mucho menor que el del tungsteno. El níquel y el hierro se funden para formar una fase líquida, rellenando los huecos entre las partículas de tungsteno y promoviendo la reorganización y la unión de las partículas de tungsteno mediante capilaridad. La presencia de la fase líquida reduce la temperatura y el tiempo de sinterización, a la vez que aumenta la densidad (casi un 99%). Las partículas de tungsteno permanecen sólidas e incrustadas en la matriz de níquel-hierro para formar una estructura compuesta uniforme, lo que confiere a la aleación una alta resistencia (800-1000 MPa) y una tenacidad adecuada.

Condiciones del proceso : La sinterización en fase líquida se realiza generalmente en un horno de vacío

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o en atmósfera de hidrógeno para evitar la oxidación. La atmósfera de hidrógeno (pureza > 99,99 %) puede eliminar eficazmente los óxidos traza del polvo y mejorar la calidad de la sinterización. La temperatura de sinterización debe controlarse con precisión, manteniéndose por encima del punto de formación de la fase líquida de níquel-hierro (aprox. 1450 °C), pero por debajo de la temperatura de evaporación excesiva de la fase líquida (aprox. 1600 °C). El tiempo de mantenimiento suele ser de 1 a 3 horas. Un tiempo demasiado largo puede provocar la pérdida de la fase líquida o el crecimiento de grano, lo que reduce el rendimiento. También es necesario controlar la velocidad de enfriamiento (normalmente 10-20 °C/min) para evitar microfisuras causadas por tensión térmica.

Influencia de la microestructura : La microestructura formada mediante sinterización en fase líquida consta de partículas de tungsteno (tamaño de 10-50 micras) y una matriz de níquel-hierro. Las partículas de tungsteno son casi esféricas o poligonales y se distribuyen uniformemente en la matriz, lo que garantiza una alta densidad y propiedades mecánicas uniformes. La sinterización en fase líquida puede reducir significativamente la porosidad (<1%) y mejorar la resistencia a la tracción y al desgaste. La proporción de níquel y hierro influye significativamente en la microestructura: un mayor contenido de níquel (por ejemplo, un 7%) aumenta la tenacidad de la matriz, mientras que un mayor contenido de hierro (por ejemplo, un 3%) aumenta la dureza.

Optimización técnica : Para mejorar aún más el efecto de sinterización en fase líquida, se puede utilizar el prensado isostático en caliente (HIP) como proceso auxiliar. Tras la sinterización, el prensado isostático en caliente trata el cuerpo verde con una presión isotrópica de 100-200 MPa y una temperatura de 1200-1400 °C, lo que permite eliminar los poros residuales y aumentar la densidad a más del 99,5 %. Además, la adición de oligoelementos (como cobalto o cobre) puede optimizar la humectabilidad de la fase líquida y mejorar la adhesión de las partículas de tungsteno a la matriz. El sellado del horno de sinterización y la pureza de la atmósfera son cruciales para la estabilidad del proceso y deben revisarse periódicamente para evitar la contaminación por oxígeno o humedad.

Las ventajas de la tecnología de sinterización en fase líquida residen en su alta eficiencia y alta densidad, lo que permite que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro cumplan con los altos requisitos de rendimiento de contrapesos aeroespaciales, núcleos antiblindaje militares y blindaje radiológico médico. Sin embargo, la sinterización en fase líquida exige equipos exigentes (como hornos de control de temperatura de alta precisión), y los parámetros del proceso deben optimizarse con precisión para evitar un exceso o una insuficiencia de fase líquida. La aplicación exitosa de la tecnología de sinterización en fase líquida es clave para lograr un rendimiento excelente de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro y ha promovido su amplia aplicación en el campo de la alta tecnología.

3.2.3 Tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D)

La fabricación aditiva (FA) o tecnología de impresión 3D es un método para fabricar directamente piezas de formas complejas mediante el apilamiento de materiales capa por capa. Esta tecnología ha ganado popularidad en la preparación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Esta tecnología permite una gran libertad de diseño, reduce el desperdicio de material y es adecuada para el prototipado rápido de piezas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con geometrías complejas. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro presentan altos requisitos para los procesos de impresión 3D debido a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³) y su alto punto de fusión (el del tungsteno es de 3410 °C). Sin embargo, al optimizar los parámetros del proceso, ha demostrado un gran potencial en los sectores aeroespacial, médico y militar.

La impresión 3D de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro utiliza principalmente tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). La SLM utiliza un haz láser de alta potencia para fundir el polvo metálico capa a capa, mientras que la EBM utiliza un haz de electrones para fundir el polvo al vacío. Ambos métodos depositan y funden polvo mixto de tungsteno, níquel y hierro (o polvo prealeado) capa a capa para formar piezas de aleación densas. Los puntos de fusión más bajos del níquel y el hierro (1455 °C y 1538 °C) contribuyen a la formación de una fase líquida y promueven la unión de las partículas de tungsteno, de forma similar al mecanismo de sinterización en fase líquida.

La preparación del polvo es un paso clave en la impresión 3D. Se requiere polvo de tungsteno de alta pureza (pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula de 10-50 micras), polvo de níquel (pureza $\geq 99,8\%$) y polvo de hierro (pureza $\geq 99,5\%$), mezclados en una proporción adecuada (por ejemplo, 90W-7Ni-3Fe), o bien se utiliza polvo prealeado para garantizar la consistencia de la composición. El polvo debe tener buena fluidez (generalmente mediante esferoidización) y una distribución uniforme del tamaño de partícula para garantizar la estabilidad durante la impresión.

Los parámetros del proceso de impresión deben optimizarse con precisión para garantizar la calidad. En SLM, la potencia del láser suele ser de 200 a 400 W, la velocidad de escaneo de 500 a 1500 mm/s y el espesor de capa de 20 a 50 micras. El EBM debe operarse en un entorno de vacío con una potencia de haz de electrones de 3 a 6 kW. Optimizar la densidad energética permite evitar grietas o poros y garantizar una densidad superior al 98%. Tras la impresión, las piezas suelen requerir un tratamiento térmico (como recocido a 800-1000 °C) para eliminar la tensión residual, que puede combinarse con prensado isostático en caliente (HIP, 1200-1400 °C, 100-200 MPa) para aumentar la densidad hasta el 99,5%.

La ventaja de la impresión 3D es que permite fabricar directamente piezas de aleación de tungsteno, níquel y hierro con formas complejas, como contrapesos aeroespaciales o piezas de protección radiológica médica, lo que reduce los pasos de procesamiento tradicionales. Sin embargo, el alto punto de fusión y la conductividad térmica del tungsteno (173 W/ m·K) generan grandes gradientes térmicos y facilitan su agrietamiento; el costo del polvo es elevado y el equipo de impresión requiere un control de alta precisión. El níquel y el hierro pueden volatilizarse al fundirse a altas temperaturas, por lo que su composición debe controlarse mediante protección con argón o polvo prealeado. Actualmente, la tecnología SLM puede alcanzar una resistencia a la tracción de 700-900 MPa, similar a la de los productos pulvimetalúrgicos tradicionales.

Las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro impresas en 3D pueden utilizarse para fabricar bloques de equilibrio de álabes de turbinas en el sector aeroespacial, componentes de protección radiológica personalizados en el sector médico y núcleos de proyectiles perforantes de alta precisión en el sector

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

militar. Con el avance de los equipos de impresión y la tecnología de preparación de polvos, se prevé que la impresión 3D se convierta en una tecnología importante para la preparación de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro, especialmente en la producción de lotes pequeños y piezas de formas complejas.

3.2.4 Otras técnicas de preparación

Además de la pulvimetalurgia y la fabricación aditiva, la preparación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro también incluye tecnologías como la aleación mecánica, la pulverización de plasma y el moldeo por inyección de metal. Estos métodos ofrecen ventajas únicas para aplicaciones específicas (como formas complejas, recubrimientos resistentes al desgaste o componentes de alto rendimiento), superando las limitaciones de los procesos tradicionales.

La aleación mecánica (MA) es un método para preparar polvos compuestos mediante molienda de bolas de alta energía. La molienda de bolas de alta energía provoca que los polvos de tungsteno, níquel y hierro experimenten deformación plástica, fractura y soldadura en frío para formar un polvo compuesto uniforme y mejorar la actividad de sinterización. El proceso utiliza un molino de bolas planetario con una relación bola-material de 10:1 a 20:1 y un tiempo de molienda de bolas de 10 a 20 horas. Debe llevarse a cabo bajo protección de argón para evitar la oxidación. El polvo resultante se forma en una aleación densa mediante prensado isostático en frío y sinterización. Este método puede refinar partículas de tungsteno (a 1-3 micras), mejorar la uniformidad de la aleación y las propiedades mecánicas, y es adecuado para la producción de componentes de alta resistencia como núcleos de proyectiles perforantes militares, pero el tiempo de proceso es largo y las impurezas se introducen fácilmente.

La pulverización de plasma pulveriza polvos de tungsteno, níquel y hierro sobre la superficie del sustrato mediante una llama de plasma de alta temperatura para formar un recubrimiento de alta densidad o un componente con una forma casi neta. El tamaño de partícula del polvo es de 20 a 50 micras y la pulverización se realiza bajo protección de argón o helio. Tras la pulverización, el rendimiento se puede optimizar mediante tratamiento térmico o mecanizado. Este método es adecuado para la preparación de recubrimientos resistentes al desgaste o a la corrosión para moldes industriales o piezas aeroespaciales resistentes a altas temperaturas, pero la densidad del recubrimiento es baja (aproximadamente el 95 %) y no es adecuado para piezas de gran volumen.

El moldeo por inyección de metal (MIM) mezcla polvos de tungsteno, níquel y hierro con aglutinantes orgánicos (como polipropileno o cera, al 10%-20%) para formar una suspensión inyectable y prepara piezas en bruto de formas complejas mediante una máquina de moldeo por inyección. El desaglomerante se realiza a 400-600 °C y la sinterización se completa en una atmósfera de hidrógeno o vacío a 1400-1500 °C. El MIM es adecuado para la producción de piezas pequeñas de formas complejas, como piezas de blindaje de precisión en equipos médicos o contrapesos para dispositivos electrónicos, pero el proceso de eliminación del aglutinante es complejo y pueden quedar trazas de carbono, lo que afecta al rendimiento.

Estas tecnologías se seleccionan según los requisitos de la aplicación y la escala de producción. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleación mecánica es adecuada para la producción de lotes pequeños de alto rendimiento, la pulverización de plasma es adecuada para el refuerzo de superficies y la MIM es eficaz en la producción en masa de piezas con formas complejas. En el futuro, la optimización de procesos y la modernización de equipos (como una pulverización de plasma más eficiente o una MIM de bajo coste) ampliarán aún más las posibilidades de aplicación de estas tecnologías y satisfarán las diversas necesidades de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en el ámbito de la alta tecnología.

3.3 Tecnología de procesamiento de aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es fundamental para garantizar que las piezas finales cumplan con los requisitos de diseño y rendimiento. Debido a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), alta dureza (dureza Vickers 250-400) y excelentes propiedades mecánicas, el proceso de procesamiento requiere equipos y procesos especiales para superar su alta dureza y tenacidad moderada. Las tecnologías de procesamiento más comunes incluyen el mecanizado y el tratamiento térmico, que permiten moldear con precisión la aleación, optimizar su rendimiento y mejorar la calidad superficial y su adaptabilidad ambiental. A continuación, se detallará la aplicación de las tecnologías de mecanizado y tratamiento térmico en el procesamiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro y sus aspectos técnicos clave.

3.3.1 Mecanizado

El mecanizado es un paso importante en la preparación de piezas finales de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Se utiliza para procesar el cuerpo verde sinterizado en formas geométricas precisas para cumplir con los requisitos de alta precisión de los sectores aeroespacial, militar y médico. La alta dureza y la tenacidad moderada de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro dificultan su procesamiento, pero mediante la selección de herramientas, parámetros y métodos de procesamiento adecuados, se puede lograr un procesamiento de alta eficiencia y alta precisión.

Características de procesamiento : La alta dureza (HV 250-400) y la alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro provocan un mayor desgaste de la herramienta durante el procesamiento, mientras que su moderada tenacidad (elongación del 10% al 20%) requiere una fuerza de corte controlada durante el procesamiento para evitar grietas o deformaciones superficiales. Los métodos de mecanizado comunes incluyen torneado, fresado, taladrado, rectificado y electroerosión (EDM), y cada método debe seleccionarse según los requisitos de forma y precisión del componente.

Torneado y fresado : El torneado y el fresado se utilizan para procesar piezas con formas regulares, como contrapesos cilíndricos o núcleos de proyectiles perforantes. Se requieren herramientas de carburo (como WC-Co) o de nitruro de boro cúbico (CBN) debido a su resistencia al desgaste y a su alta dureza. La velocidad de corte se controla habitualmente entre 20 y 50 m/min, el avance es de 0,05 a 0,2 mm/r y la profundidad de corte, de 0,1 a 1 mm. Durante el procesamiento, se requiere refrigerante (como fluido de corte a base de agua) para reducir la temperatura de corte, el desgaste de la herramienta y el daño térmico en la superficie de la pieza. Las máquinas herramienta CNC de alta velocidad pueden mejorar la precisión del procesamiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Taladrado : El taladrado se utiliza para realizar agujeros o estructuras roscadas, como agujeros de montaje en contrapesos aeroespaciales. Se requieren brocas de carburo, con una velocidad de taladrado controlada de 10 a 30 m/min y un avance de 0,02 a 0,1 mm/min. El taladrado profundo requiere un taladrado gradual y una refrigeración adecuada para evitar la rotura de la broca o la formación de paredes rugosas. Tras el procesamiento, es necesario comprobar la precisión del diámetro del agujero para cumplir con los requisitos de diseño.

Rectificado : El rectificado se utiliza para el procesamiento de superficies de alta precisión, como el aplanamiento de componentes de protección radiológica médica. Se prefieren las muelas de diamante o CBN por su alta dureza y su capacidad para rectificar aleaciones de forma eficaz. La velocidad de rectificado es de 20-30 m/s, el avance es de 0,01-0,05 mm/vez y se requiere refrigerante para controlar la temperatura de rectificado.

Mecanizado por electroerosión (EDM) : Para formas complejas o piezas de alta precisión, como pequeñas piezas de protección para dispositivos médicos, el mecanizado por electroerosión es un método eficaz. El mecanizado por electroerosión utiliza descargas eléctricas para eliminar material y es adecuado para mecanizar geometrías complejas de difícil corte. Durante el mecanizado se utilizan electrodos de cobre o grafito, el fluido de trabajo es aceite aislante y la corriente se controla entre 5 y 20 A. El mecanizado por electroerosión permite alcanzar una alta precisión (tolerancia $\pm 0,005$ mm), pero la velocidad de procesamiento es lenta y es adecuado para la producción de lotes pequeños.

Consideraciones de procesamiento : El mecanizado requiere un control estricto del desgaste de la herramienta y de la calidad de la superficie de la pieza para evitar microfisuras o la concentración de tensiones superficiales. La limpieza ultrasónica se suele realizar después del mecanizado para eliminar los residuos de fluido de corte, y el pulido puede utilizarse para mejorar aún más el acabado superficial. Para mejorar la resistencia a la corrosión, se puede aplicar un recubrimiento superficial (como el recubrimiento Ni-P). El éxito del mecanizado requiere equipos de alta precisión y un operador cualificado para garantizar la precisión dimensional y la estabilidad del rendimiento de las piezas de aleación de tungsteno, níquel y hierro.

3.3.2 Tecnología de tratamiento térmico

La tecnología de tratamiento térmico es un componente importante del procesamiento de aleaciones de WNiFe, que se utiliza para optimizar su microestructura, eliminar tensiones internas y mejorar las propiedades mecánicas y la adaptabilidad ambiental. El tratamiento térmico de las aleaciones de WNiFe suele incluir recocido, tratamiento de envejecimiento y tratamiento de solución. La selección del proceso específico depende de la composición de la aleación y los requisitos de la aplicación. El tratamiento térmico puede mejorar la tenacidad, la resistencia a la tracción (800-1000 MPa) y la resistencia a la fatiga de la aleación, manteniendo al mismo tiempo sus características de alta densidad y dureza.

Recocido : El recocido es el método de tratamiento térmico más común para las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Se utiliza para eliminar la tensión residual generada durante la sinterización o el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mecanizado y mejorar la tenacidad y la maquinabilidad. El recocido se realiza generalmente en un horno de vacío o de atmósfera de hidrógeno, con una temperatura controlada de 800-1000 °C, un tiempo de mantenimiento de 1-2 horas y una velocidad de enfriamiento de 5-10 °C/min para evitar la tensión térmica. Tras el recocido, la elongación de la aleación puede aumentar hasta un 15-25 %, y la resistencia a la tracción disminuye ligeramente, manteniéndose en 700-900 MPa, lo cual es adecuado para aplicaciones que requieren alta tenacidad, como contrapesos aeroespaciales.

Tratamiento de envejecimiento : El tratamiento de envejecimiento se utiliza para optimizar aún más la resistencia y la dureza de la aleación, especialmente en aleaciones con alto contenido de tungsteno (como 95W-4Ni-1Fe). El tratamiento de envejecimiento se lleva a cabo a 500-700 °C durante 2-4 horas, generalmente al vacío o con protección de gas inerte (como argón). Durante el proceso de envejecimiento, las fases de precipitación microscópica (como los compuestos de Ni-Fe) en la matriz de níquel-hierro mejoran la resistencia de la matriz y aumentan la dureza Vickers de la aleación a 350-400 HV. Este tratamiento es adecuado para aplicaciones como núcleos de perforación de blindaje militar que requieren alta dureza, pero puede reducir ligeramente la tenacidad.

Tratamiento en solución : El tratamiento en solución es adecuado para ajustar la microestructura de la aleación y mejorar la uniformidad de la matriz de níquel-hierro. La temperatura de tratamiento es de 1100-1200 °C, manteniéndose a esta temperatura durante 1-2 horas, seguida de un enfriamiento rápido (generalmente temple en agua o en gas). El tratamiento en solución puede disolver los precipitados irregulares y mejorar la uniformidad química de la matriz, mejorando así la resistencia a la corrosión y a la fatiga. El tratamiento en solución suele combinarse con un envejecimiento a baja temperatura (500-600 °C) para restaurar la resistencia. El tratamiento en solución es adecuado para piezas de aleación en los sectores de la ingeniería naval o la medicina que requieren una alta resistencia a la corrosión.

Equipos de tratamiento térmico y control de procesos : El tratamiento térmico requiere el uso de un horno de vacío de alta precisión o un horno de atmósfera de hidrógeno para garantizar la pureza de la atmósfera (>99,99 %) y prevenir la oxidación. La precisión del control de temperatura debe ser de ± 5 °C y el proceso de enfriamiento debe ser uniforme para evitar microfisuras causadas por tensión térmica. Tras el tratamiento térmico, se analiza la microestructura mediante microscopía metalográfica o difracción de rayos X (DRX) para garantizar la uniformidad de las partículas de tungsteno y la matriz de níquel-hierro. Se realizan ensayos de propiedades mecánicas (como ensayos de tracción o de dureza) para verificar el efecto del tratamiento térmico.

Aplicación y optimización : La selección del proceso de tratamiento térmico y la optimización de parámetros deben basarse en los requisitos específicos de la aplicación. Por ejemplo, se prefiere el recocido de contrapesos aeroespaciales para mejorar su tenacidad, mientras que los núcleos de proyectiles perforantes militares suelen envejecerse para aumentar su dureza. El tratamiento térmico también puede combinarse con procesos mecánicos, como el recocido inicial para mejorar la maquinabilidad y el acabado y envejecimiento posteriores para optimizar el rendimiento. La aplicación racional de la tecnología de tratamiento térmico puede mejorar significativamente el rendimiento integral de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro y cumplir con los estrictos requisitos de los sectores de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alta tecnología.

3.3.3 Tecnología de tratamiento y recubrimiento de superficies

El tratamiento superficial y la tecnología de recubrimiento son componentes clave en el procesamiento de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, con el objetivo de mejorar la resistencia a la corrosión, la resistencia al desgaste, el acabado superficial y la adaptabilidad ambiental de la aleación. Estas aleaciones se han utilizado ampliamente en los sectores aeroespacial, militar y médico gracias a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), alta dureza (dureza Vickers 250-400) y excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, su superficie puede estar expuesta a riesgos de corrosión, desgaste u oxidación debido al procesamiento o a factores ambientales, por lo que es necesario optimizar aún más su rendimiento mediante el tratamiento superficial y la tecnología de recubrimiento. A continuación, se detallará la tecnología de tratamiento superficial y recubrimiento de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro y sus puntos clave de proceso.

Tecnología de tratamiento de superficies

El tratamiento superficial incluye principalmente procesos de pulido, arenado y limpieza química para mejorar la calidad superficial de la aleación de tungsteno, níquel y hierro, eliminar defectos de procesamiento y prepararla para su posterior recubrimiento o aplicación. Estas tecnologías pueden mejorar significativamente el acabado superficial y la resistencia a la corrosión de la aleación para cumplir con los requisitos de alta precisión y entornos hostiles.

Pulido : El pulido es un método común para mejorar el acabado superficial de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro. Permite alcanzar una rugosidad superficial baja (Ra 0,1-0,2 μm), ideal para blindaje radiológico médico o piezas de precisión aeroespaciales. El pulido mecánico utiliza pasta de diamante o líquido de pulido de alúmina, combinado con un disco de pulido giratorio de alta velocidad (1000-2000 rpm), y el tiempo de pulido es de 10 a 30 minutos. El pulido electroquímico también se utiliza comúnmente para piezas de formas complejas, utilizando un electrolito ácido (como una mezcla de ácido sulfúrico y ácido fosfórico) con una densidad de corriente de 5-10 A/dm² y un tiempo de procesamiento de 5 a 15 minutos. El pulido no solo mejora el aspecto de la superficie, sino que también reduce las microfisuras y la concentración de tensiones, y mejora la resistencia a la corrosión y a la fatiga.

Chorro de arena : El chorro de arena utiliza un flujo de aire a alta presión para pulverizar abrasivos (como óxido de aluminio o microesferas de vidrio, con un tamaño de partícula de 50-150 micras) sobre la superficie de la aleación para eliminar capas de óxido, rebabas o marcas de procesamiento, a la vez que se forma una superficie mate uniforme (Ra 1,6-3,2 μm). La presión de chorro de arena se controla a 0,3-0,6 MPa y la distancia de pulverización es de 100-150 mm. El chorro de arena puede mejorar la rugosidad de la superficie y proporcionar una mejor adhesión para recubrimientos posteriores. Es adecuado para núcleos de perforación de blindaje militar o piezas industriales resistentes al desgaste. Se debe tener cuidado al controlar el tiempo de chorro de arena (generalmente de 1 a 3 minutos) para evitar una rugosidad excesiva o daños en la superficie.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Limpieza química : La limpieza química se utiliza para eliminar aceite, óxidos o residuos de procesamiento de la superficie y garantizar una superficie limpia. Las soluciones de limpieza habituales son ácidos diluidos (como ácido clorhídrico al 5%-10% o ácido nítrico) o soluciones alcalinas (como hidróxido de sodio), con una temperatura de limpieza de 40-60 °C y un tiempo de 5-10 minutos. Tras la limpieza, enjuague con agua desionizada y seque al vacío o con un gas inerte (como nitrógeno) para evitar la oxidación secundaria. La limpieza química se utiliza a menudo como pretratamiento antes del recubrimiento para asegurar una buena adhesión entre el recubrimiento y el sustrato.

Tecnología de recubrimiento

La tecnología de recubrimiento mejora aún más la resistencia a la corrosión, al desgaste y la estabilidad térmica de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro mediante la aplicación de recubrimientos funcionales en su superficie. Los métodos de recubrimiento más comunes incluyen la galvanoplastia, la deposición física de vapor (PVD), la deposición química de vapor (CVD) y la pulverización térmica; cada tecnología ofrece diferentes mejoras de rendimiento para requisitos específicos de la aplicación.

Electrochapado : El electrochapado se usa comúnmente para aplicar recubrimientos de níquel-fósforo (Ni-P) o níquel-cromo (Ni-Cr) para mejorar la resistencia a la corrosión y la dureza de la superficie. Los recubrimientos de Ni-P (que contienen entre un 8 % y un 12 % de fósforo) se aplican mediante un proceso sin corriente eléctrica con una temperatura de baño de 80-90 °C, un pH de 4,5-5,5, un tiempo de deposición de 1-2 horas y un espesor de recubrimiento de 10-50 micras. Los recubrimientos de Ni-P pueden alcanzar una dureza de 500-600 HV y tienen una excelente resistencia a la corrosión, lo que los hace adecuados para contrapesos en ingeniería marina. Los recubrimientos de Ni-Cr se aplican mediante un proceso de electrochapado con una densidad de corriente de 20-40 A/dm² y un espesor de recubrimiento de 5-20 micras, lo que los hace adecuados para piezas industriales que requieren alta resistencia al desgaste. El electrochapado requiere asegurar que la superficie del sustrato esté limpia para evitar el descascarillado del recubrimiento.

Deposición física de vapor (PVD) : La PVD deposita películas delgadas (como TiN , CrN o DLC) en la superficie de la aleación mediante la evaporación o pulverización catódica de materiales metálicos o cerámicos en un entorno de vacío, con un espesor de 1 a 5 micras. El proceso de PVD se lleva a cabo a 300-500 °C, un grado de vacío de 10⁻³ -10⁻⁴ Pa y un tiempo de deposición de 1 a 3 horas. La dureza del recubrimiento de TiN puede alcanzar los 2000-2500 HV, lo que mejora significativamente la resistencia al desgaste y es adecuado para núcleos de proyectiles perforantes militares o superficies de herramientas de corte. El recubrimiento de DLC (carbono tipo diamante) tiene un bajo coeficiente de fricción (0,1-0,2) y una excelente resistencia a la corrosión, y es adecuado para piezas deslizantes en equipos médicos. Los recubrimientos de PVD tienen una fuerte adhesión, pero el coste del equipo es relativamente alto y es adecuado para aplicaciones de alta precisión.

Deposición química en fase de vapor (CVD) : La CVD deposita un recubrimiento cerámico (como WC o Al₂O₃) sobre la superficie de la aleación mediante una reacción química con un espesor de 5-10 micras. La temperatura del proceso es de 800-1000 °C y debe llevarse a cabo en una atmósfera que contenga un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precursor de carbono o aluminio. El tiempo de deposición es de 2 a 4 horas. Los recubrimientos de CVD tienen una dureza extremadamente alta (los recubrimientos de WC pueden alcanzar 1500-2000 HV) y una alta resistencia a la temperatura, lo que los hace adecuados para componentes aeroespaciales de alta temperatura o moldes industriales. Sin embargo, los procesos de alta temperatura pueden afectar la microestructura de la matriz de la aleación, y se requiere un tratamiento térmico posterior (como el recocido) para optimizar el rendimiento.

Proyección térmica : La proyección térmica (como la proyección de plasma) pulveriza polvo cerámico o metálico (como aleaciones de cobre-cobalto o níquel) sobre la superficie de la aleación mediante un flujo de llama a alta temperatura para formar un recubrimiento con un espesor de 50-200 micras. La proyección se realiza bajo protección de argón o helio. Los recubrimientos por proyección térmica presentan una excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, y son adecuados para piezas industriales resistentes al desgaste o contrapesos en entornos marinos. Sin embargo, la densidad del recubrimiento es baja (aproximadamente el 95 %) y puede requerir mecanizado o tratamiento térmico posterior.

Control y aplicación de procesos

La implementación de tecnologías de tratamiento y recubrimiento de superficies requiere un control estricto de los parámetros del proceso para garantizar la resistencia de la unión y la estabilidad del rendimiento del recubrimiento y el sustrato. Antes del tratamiento de la superficie, es necesario eliminar el aceite y los óxidos mediante limpieza ultrasónica o química. Después del recubrimiento, se realizan pruebas de adhesión (como pruebas de rayado) y de dureza (como durómetros Vickers) para verificar la calidad. El espesor del recubrimiento debe optimizarse según los requisitos de la aplicación. Un espesor demasiado grueso puede causar desprendimiento, y uno demasiado fino puede no proporcionar la protección suficiente. Estas tecnologías han mejorado significativamente el rendimiento de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Por ejemplo, los recubrimientos de galvanoplastia Ni-P mejoran la resistencia a la corrosión de los contrapesos de ingeniería naval; los recubrimientos PVD TiN mejoran la resistencia al desgaste de los núcleos de proyectiles perforantes militares; y los recubrimientos CVD WC proporcionan protección térmica para componentes aeroespaciales de alta temperatura. La selección y optimización adecuadas de las tecnologías de tratamiento y recubrimiento de superficies permiten que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro satisfagan diversos requisitos de aplicación de alto rendimiento.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 4 Control de calidad e inspección de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

4.1 Análisis de la composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

tungsteno-níquel-hierro son clave para garantizar que su rendimiento cumpla con los estrictos requisitos de los sectores aeroespacial, militar, médico y otros. El análisis de la composición es fundamental para el control de calidad, cuyo objetivo es verificar si la composición química y la microestructura de la aleación cumplen con los estándares de diseño. Las propiedades de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro (como la densidad, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión) dependen directamente de las proporciones precisas de tungsteno (85-95%), níquel (5-10%) y hierro (2-5%), así como de la uniformidad de su microestructura. Por lo tanto, las pruebas de composición química y el análisis de microestructura son pasos indispensables para garantizar la estabilidad y la fiabilidad de la aleación. A continuación, se detallarán los métodos de prueba de composición química y las técnicas de análisis de microestructura.

4.1.1 Método de detección de la composición química

Las pruebas de composición química se utilizan para determinar el contenido de tungsteno, níquel, hierro y otros oligoelementos en aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, garantizando así su cumplimiento con la fórmula objetivo (como 90W-7Ni-3Fe) y las normas relacionadas (como ASTM B777). El método de detección debe tener alta precisión y sensibilidad para identificar los componentes principales y las impurezas traza (como oxígeno, carbono y azufre). Los métodos de detección de composición química más comunes incluyen los siguientes:

Espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)

La espectroscopia de fluorescencia de rayos X es una técnica analítica no destructiva ampliamente utilizada que se basa en la interacción entre los rayos X y la materia. Cuando una muestra de aleación de tungsteno, níquel y hierro se irradia con rayos X de alta energía, los átomos en la superficie de la muestra absorben la energía de los rayos X y los electrones internos se excitan y saltan a órbitas de alta energía. En este momento, los átomos se encuentran en un estado excitado inestable. Los electrones externos llenarán rápidamente las vacantes dejadas por los electrones internos. En este proceso, los átomos liberarán energía en forma de radiación de fluorescencia característica (es decir, rayos X secundarios). Cada elemento tiene su propia estructura atómica única, por lo que la radiación de fluorescencia característica emitida tiene una energía y una longitud de onda específicas. Al detectar la energía y la intensidad de estas radiaciones de fluorescencia, se pueden determinar los tipos de elementos presentes en la aleación y su contenido.

La tecnología XRF ofrece ventajas significativas en el análisis de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro. Permite detectar rápidamente los elementos principales, como tungsteno, níquel y hierro, presentes en la aleación. Generalmente, el análisis solo tarda de 1 a 5 minutos, lo que la hace ideal para el control de calidad en línea durante el proceso de producción. Proporciona información oportuna sobre la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

composición del producto, lo que facilita al personal de producción el ajuste de los parámetros del proceso. En términos de precisión de detección, la XRF puede alcanzar el 0,01 %, suficiente para satisfacer las necesidades de la mayoría de las aplicaciones industriales. Por ejemplo, cuando se utilizan aleaciones de tungsteno, níquel y hierro para fabricar piezas mecánicas convencionales, la XRF puede detectar con precisión si el contenido de los elementos principales cumple con los estándares y garantizar la estabilidad del rendimiento del producto.

En cuanto a la preparación de la muestra, la XRF requiere que la superficie de la muestra tenga cierto grado de planitud y que la muestra se pule hasta alcanzar una rugosidad superficial de $Ra < 1,6 \mu m$. Esto se debe a que una superficie irregular puede dificultar la dispersión y la absorción de los rayos X, lo que afecta la precisión de los resultados de la prueba. Mediante un pulido fino, se garantiza que los rayos X actúen uniformemente sobre la superficie de la muestra, de modo que la radiación de fluorescencia detectada pueda reflejar con mayor precisión la composición elemental de la muestra.

En cuanto a equipos, existen diversos tipos de XRF, incluyendo espectrómetros portátiles y de escritorio. Los espectrómetros portátiles son muy portátiles y permiten detectar muestras rápidamente in situ. Son adecuados para el análisis preliminar de piezas de trabajo grandes o muestras difíciles de transportar al laboratorio. Los espectrómetros de escritorio suelen ofrecer mayor resolución y estabilidad, proporcionar resultados analíticos más precisos y son adecuados para la investigación exhaustiva y el control de calidad de muestras en un entorno de laboratorio. Independientemente del tipo de equipo, su funcionamiento es relativamente sencillo y puede ser operado por personal con formación básica, lo que promueve aún más la aplicación generalizada de la tecnología XRF.

Sin embargo, la tecnología XRF no es perfecta. Presenta baja sensibilidad para detectar oligoelementos (como oxígeno o carbono). Esto se debe a que la energía característica de rayos X de elementos ligeros como el oxígeno y el carbono es baja, lo cual se ve fácilmente interferido por el ruido de fondo durante el proceso de detección, y a que la intensidad de fluorescencia que producen es relativamente baja, lo que dificulta la detección precisa de su contenido. Al analizar aleaciones de tungsteno-níquel-hierro de alta pureza, si es necesario determinar con precisión cantidades extremadamente pequeñas de impurezas de oxígeno y carbono, la tecnología XRF podría no cumplir los requisitos, y se requieren otros métodos de análisis más sensibles.

Espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP - AES)

La espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP -AES) es un método analítico basado en espectros característicos de emisión atómica excitados por plasma para detectar el contenido de elementos. Para analizar una aleación de tungsteno, níquel y hierro, la muestra debe pretratarse; es decir, se disuelve en una solución ácida. La solución ácida más común es una mezcla de ácido nítrico o ácido clorhídrico. El objetivo de este paso es convertir los elementos metálicos de la aleación en iones para que puedan excitarse posteriormente en el plasma.

Tras el tratamiento de disolución, la solución de muestra se introduce en el plasma acoplado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inductivamente a través del sistema de inyección. Este plasma se genera acoplado energía eléctrica de alta frecuencia a la antorcha de plasma mediante una inductancia (bobina de inducción). Su aspecto es similar al de una llama y se caracteriza por su alta temperatura (la temperatura de la llama puede alcanzar los 6000-8000 K). Tras entrar en el plasma, la solución de muestra experimenta rápidamente procesos como la evaporación, la disociación, la atomización y la ionización. Dado que los átomos de diferentes elementos tienen diferentes estructuras energéticas, bajo la excitación a alta temperatura del plasma, los electrones externos de los átomos alcanzan órbitas energéticas más altas. Al pasar de niveles energéticos altos a niveles energéticos más bajos, emiten espectros con sus propias longitudes de onda características.

El ICP-AES presenta una alta sensibilidad a los elementos principales (tungsteno, níquel, hierro) y a las impurezas traza (como azufre y fósforo) en aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, y su límite de detección puede alcanzar el nivel de ppm (partes por millón). Esto significa que puede detectar elementos de impurezas extremadamente traza en la aleación, lo cual es de gran importancia para estudiar los efectos de las impurezas traza en las propiedades de la aleación. Al estudiar los efectos de las impurezas de azufre y fósforo en la resistencia a la corrosión de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, el ICP-AES puede determinar con precisión el nivel de ppm de azufre y fósforo en la aleación, proporcionando una base de datos para estudiar más a fondo la relación entre las impurezas y la resistencia a la corrosión.

Sin embargo, el proceso de preparación de muestras mediante ICP-AES es relativamente complejo y requiere mucho tiempo. La aleación debe pulverizarse para aumentar el área de contacto entre la muestra y la solución ácida y promover la reacción de disolución. Posteriormente, la muestra en polvo se disuelve en la solución ácida. Este proceso puede tardar un tiempo para garantizar su completa disolución. El proceso completo de preparación de la muestra suele requerir tiempo y esfuerzo. En cuanto al tiempo de análisis, un análisis ICP-AES tarda entre 30 y 60 minutos, lo cual es menos eficiente que el análisis rápido por XRF. Sin embargo, gracias a su alta sensibilidad para detectar trazas de impurezas, el ICP-AES sigue siendo un método de análisis indispensable en la investigación de laboratorio, con altos requisitos de rendimiento de las aleaciones y control de calidad de productos de alta gama.

Espectrometría de masas de descarga luminiscente (GD - MS)

La espectrometría de masas por descarga luminiscente (GD -MS) es una tecnología analítica de vanguardia ideal para el análisis preciso de materiales de alta pureza, especialmente para la detección de la composición de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro de alta pureza (como el tungsteno con una pureza del 99,99 % para uso médico). Su principio de funcionamiento se basa en el fenómeno de la descarga luminiscente. Se introduce gas argón a baja presión entre dos electrodos y se aplica un alto voltaje para ionizarlo y formar un plasma luminiscente. En este proceso, los átomos de la superficie de la muestra de aleación de tungsteno, níquel y hierro que se va a analizar, que sirve como cátodo, son pulverizados por los iones de argón del plasma y se desprenden de la superficie de la muestra hacia la región del plasma.

Los átomos de la muestra pulverizada se ionizan aún más en el plasma para formar iones positivos. Estos iones positivos se introducen en el espectrómetro de masas, donde se separan y detectan según la relación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

masa-carga (m/z) de los diferentes iones. Dado que los átomos de diferentes elementos tienen masas diferentes, se generarán picos de señal en diferentes posiciones del espectrómetro de masas. El análisis de estos picos de señal permite determinar con precisión no solo los tipos de elementos presentes en la aleación, sino también el contenido de cada elemento, incluyendo elementos mayoritarios y trazas, con un límite de detección de hasta ppb (partes por billón).

En cuanto a la preparación de la muestra, la GD-MS requiere que esta se prepare en un bloque plano. Esto garantiza que la superficie de la muestra pueda ser pulverizada uniformemente con iones de argón durante el proceso de descarga luminiscente, de modo que los resultados del análisis sean más representativos. El tiempo de análisis suele ser de 10 a 20 minutos. Si bien es más largo que el de la XRF, considerando su alta sensibilidad para la detección de elementos traza y su importancia en el análisis de materiales de alta pureza, este tiempo de análisis es aceptable.

Los equipos GD-MS son relativamente caros, principalmente debido a su complejidad técnica y a los altos requisitos de precisión de componentes clave, como los espectrómetros de masas de alta resolución. Sin embargo, su alta sensibilidad y capacidad para analizar múltiples elementos simultáneamente hacen que se utilicen ampliamente en aplicaciones de alta gama que requieren una pureza de aleación extremadamente alta, como la fabricación de semiconductores, la industria aeroespacial y la médica. En la fabricación de semiconductores, la aleación de tungsteno-níquel-hierro utilizada requiere una pureza extremadamente alta para evitar que las impurezas afecten el rendimiento de los dispositivos semiconductores. El GD-MS puede detectar con precisión elementos de impureza a nivel de ppb en la aleación para garantizar que la calidad del material cumpla con los estrictos estándares de la fabricación de semiconductores.

Análisis químico (análisis húmedo)

El análisis químico (análisis húmedo) es un método analítico clásico que separa y analiza cuantitativamente los elementos en aleaciones mediante reacciones químicas. Al analizar aleaciones de tungsteno, níquel y hierro, se suele utilizar el método gravimétrico para determinar el contenido de tungsteno, y el método de titulación para determinar los contenidos de níquel y hierro. En la determinación gravimétrica del contenido de tungsteno, por ejemplo, la muestra de aleación se somete primero a una serie de reacciones químicas para precipitar el tungsteno en forma de un compuesto específico. Posteriormente, mediante filtrado, lavado, secado y pesaje, se mide con precisión la masa del precipitado y se calcula el contenido de tungsteno en la aleación con base en la ecuación de la reacción química y las relaciones estequiométricas relacionadas. Para la determinación del contenido de níquel y hierro, el método de titulación utiliza una solución estándar de concentración conocida para reaccionar químicamente con los iones de níquel y hierro en la solución de muestra. Los contenidos de níquel y hierro se calculan con base en el volumen de la solución estándar consumida, juzgando el punto final de la titulación.

El método de análisis químico ofrece una alta precisión y el error suele controlarse en <0,1 %. Esto lo convierte en una herramienta muy útil en situaciones donde la precisión del contenido de componentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

principales es extremadamente alta, como la calibración de muestras estándar o la detección controvertida. Al formular nuevas muestras estándar de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro, es necesario determinar el contenido de los elementos principales con extrema precisión. El método de análisis químico proporciona datos fiables que garantizan la precisión y la autoridad de las muestras estándar.

Sin embargo, los métodos de análisis químico son complejos de operar, lo que requiere analistas químicos profesionales con habilidades experimentales competentes y amplia experiencia. Todo el proceso de análisis implica múltiples pasos de reacción química y un estricto control de las condiciones de reacción. Desde el pretratamiento de la muestra hasta el cálculo del resultado final, cada paso debe ejecutarse con cuidado; de lo contrario, es fácil introducir errores. Además, este método requiere mucho tiempo y, a menudo, completar un análisis tarda varias horas. Esto se debe a que, durante el proceso de reacción, se debe dar tiempo suficiente para que la reacción química se desarrolle por completo y así garantizar la precisión de los resultados del análisis. Por ejemplo, al determinar el contenido de tungsteno por peso, los pasos de formación de precipitación, lavado y secado requieren mucho tiempo. En cuanto a la detección de trazas de impurezas, los métodos de análisis químico presentan ciertas limitaciones cuando se utilizan por separado. Debido al extremadamente bajo contenido de trazas de impurezas en la aleación, sus reacciones químicas pueden no ser evidentes, lo que dificulta su detección precisa mediante métodos convencionales. Por lo tanto, en la práctica, para mejorar la eficiencia y la precisión de la detección de trazas de impurezas, suele ser necesario combinar otros métodos más sensibles, como el ICP-AES. Primero, las trazas de impurezas se detectan preliminarmente y se analizan cuantitativamente mediante ICP-AES, y luego se determinan con precisión los componentes principales mediante métodos de análisis químico, para comprender de forma completa y precisa la composición de la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

Puntos clave del control de procesos : Las pruebas de composición química requieren la selección de métodos adecuados según los requisitos de la aplicación. Por ejemplo, los contrapesos aeroespaciales requieren un contenido de tungsteno con una precisión de $\pm 0,5\%$, que se puede lograr mediante XRF; las piezas de protección radiológica médica requieren un control estricto de impurezas, por lo que se recomienda el método ICP-AES o GD-MS. Antes de realizar la prueba, asegúrese de que la superficie de la muestra esté limpia para evitar que la contaminación afecte los resultados. Los resultados de la prueba deben compararse con la fórmula objetivo, y las materias primas o los parámetros del proceso deben ajustarse si la desviación supera el $\pm 0,2\%$.

4.1.2 Análisis de microestructura

El análisis de microestructura se utiliza para evaluar la organización interna, la distribución de fases y los defectos de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, lo cual afecta directamente sus propiedades mecánicas (como la resistencia a la tracción de 800-1000 MPa), la resistencia a la corrosión y la densidad (>99%). La microestructura de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele estar compuesta por partículas de tungsteno y la matriz de níquel-hierro, y su uniformidad, porosidad y características de límite de grano deben verificarse mediante una variedad de técnicas analíticas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Análisis con microscopio metalográfico: El microscopio metalográfico se utiliza para observar la microestructura de las aleaciones. La muestra debe cortarse, pulirse ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) y grabarse con reactivos químicos (como una solución de ácido nítrico y etanol) para revelar la microestructura. El análisis permite determinar el tamaño y la forma de las partículas de tungsteno (generalmente casi esféricas o poligonales) y la uniformidad de la distribución de la matriz de níquel-hierro. El aumento es de 100 a 1000 veces, y se pueden detectar defectos como poros, inclusiones o grietas en los límites de grano. Por ejemplo, una porosidad $> 1\%$ puede reducir la densidad y requerir la optimización del proceso de sinterización. El análisis metalográfico es fácil de usar y adecuado para una detección rápida durante la producción.

Microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de energía dispersiva (EDS): SEM proporciona imágenes microscópicas de alta resolución (hasta 10.000 aumentos) para la observación detallada de la unión de la interfaz entre las partículas de tungsteno y la matriz de níquel-hierro, la distribución de partículas y los defectos microscópicos. Combinado con EDS, se puede realizar un análisis de la composición química local para detectar la uniformidad de la distribución de tungsteno, níquel y hierro y el enriquecimiento de elementos de impureza (como oxígeno o carbono). El tiempo de análisis SEM-EDS es de 30 a 60 minutos, y la muestra debe pulirse y tratarse conductivamente (como el enchapado de carbono). Este método puede identificar problemas de segregación o inclusión de la composición, como la distribución desigual de la matriz de níquel-hierro, que puede conducir a una tenacidad reducida.

Difracción de rayos X (DRX): La DRX determina la estructura cristalina, la composición de las fases y el tamaño de grano mediante el análisis del patrón de difracción de rayos X de la muestra. En aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, la DRX permite confirmar la estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) del tungsteno y la estructura cúbica centrada en las caras (FCC) de la matriz de níquel-hierro, así como detectar la presencia de fases nocivas (como óxidos o carburos). El tiempo de análisis es de 1 a 2 horas y la muestra debe rectificarse hasta obtener una superficie plana. La DRX permite evaluar el efecto del tratamiento térmico o el proceso de sinterización en la microestructura, ya que, por ejemplo, el crecimiento del grano puede reducir la resistencia.

Microscopía electrónica de transmisión (MET): La MET proporciona información microestructural con una resolución subnanométrica para analizar la estructura de la interfaz, las dislocaciones y los precipitados entre las partículas de tungsteno y la matriz de níquel-hierro. Las muestras de MET deben prepararse mediante dilución iónica, con un espesor $< 100 \text{ nm}$ y un tiempo de análisis de 2 a 4 horas. La MET es adecuada para estudiar los efectos de los precipitados traza (como los compuestos de Ni-Fe) en el rendimiento, especialmente en aplicaciones de alto rendimiento (como los núcleos de perforación de blindaje militar). La desventaja es la complejidad y el alto coste de la preparación de las muestras.

Puntos de análisis y aplicaciones: El análisis de microestructura requiere la combinación de múltiples métodos para evaluar completamente la calidad de la aleación. Por ejemplo, la microscopía metalográfica y el SEM se utilizan para detectar rápidamente la porosidad y la distribución de partículas, mientras que la XRD y el TEM se utilizan para analizar en profundidad la estructura de fases y las características de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la interfaz. Los resultados del análisis deben verificar el tamaño de partícula de tungsteno (10-50 micras), la uniformidad de la matriz (desviación <5%) y la porosidad (<1%). Si se detectan defectos (como porosidad >1% o inclusiones), es necesario optimizar la pureza de la materia prima o los parámetros de sinterización (por ejemplo, aumentando la temperatura de sinterización a 1450-1550 °C). El análisis de microestructura garantiza que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro cumplan con los altos requisitos de rendimiento de contrapesos aeroespaciales, piezas de blindaje médico, etc.

4.2 Prueba de rendimiento de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

Las pruebas de rendimiento son un componente clave del control de calidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, y se utilizan para verificar si cumplen con los altos requisitos de rendimiento en los sectores aeroespacial, militar, médico y otros. Las propiedades de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro incluyen propiedades mecánicas (como resistencia y tenacidad), térmicas (como coeficiente de expansión térmica y conductividad térmica) y eléctricas (como conductividad eléctrica y resistividad). Estas propiedades afectan directamente el rendimiento de la aleación en entornos de alta tensión, alta temperatura o electromagnéticos. Mediante métodos de prueba científicos y rigurosos, se puede garantizar la fiabilidad, la consistencia y el cumplimiento de las normas de diseño (como ASTM B777) de la aleación. A continuación, se detallarán los métodos y los puntos clave de las pruebas de rendimiento mecánico, térmico y eléctrico.

4.2.1 Ensayo de propiedades mecánicas

Las pruebas de propiedades mecánicas se utilizan para evaluar la resistencia, tenacidad, dureza y resistencia al desgaste de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, garantizando así su rendimiento en entornos de alta tensión. Las aleaciones típicas de tungsteno-níquel-hierro (como 90W-7Ni-3Fe) presentan una resistencia a la tracción de 800-1000 MPa, una elongación del 10-20 % y una dureza Vickers de 250-400 HV. Los siguientes son métodos de prueba de propiedades mecánicas comúnmente utilizados:

Ensayos de tracción : Los ensayos de tracción se utilizan para medir la resistencia a la tracción, el límite elástico y la elongación de las aleaciones, siguiendo normas como la ASTM E8. Las muestras de ensayo se procesan en probetas de tracción estándar (como las cilíndricas de $\varnothing 5 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$) y se ensayan utilizando una máquina de ensayos universal a una velocidad de tracción de 0,5-2 mm/min. La temperatura de ensayo suele ser la ambiente (20-25 °C), y también se pueden realizar ensayos de tracción a alta temperatura (como 500-800 °C) para simular aplicaciones aeroespaciales. Los resultados deben verificar la resistencia a la tracción (objetivo 800-1000 MPa) y la elongación (objetivo 10%-20%). Desviaciones >5% pueden indicar segregación de la composición o defectos de sinterización.

Prueba de dureza : La prueba de dureza evalúa la capacidad de la aleación para resistir la deformación, generalmente usando pruebas de dureza Vickers (HV) o dureza Brinell (HB), siguiendo ASTM E92. La prueba de dureza Vickers utiliza un penetrador de diamante, aplica una carga de 5-10 kgf, la mantiene durante 10-15 segundos y mide el tamaño de la indentación. Los valores típicos de dureza son 250-400

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV, dependiendo del contenido de tungsteno (por ejemplo, 95W-4Ni-1Fe puede alcanzar 350-400 HV). La prueba de dureza debe realizarse en muestras pulidas ($Ra < 0,2 \mu m$), y se deben probar al menos 5 puntos para tomar el valor promedio para asegurar la consistencia de los resultados. Los valores de dureza anormales pueden indicar una microestructura desigual o la presencia de inclusiones.

Ensayo de tenacidad al impacto : Este ensayo se utiliza para evaluar la resistencia de la aleación a la fractura bajo cargas de impacto. Cumple con la norma ASTM E23 y utiliza un comprobador de impacto Charpy o Izod. La muestra de ensayo es una probeta estándar con entalla ($10 \times 10 \times 55$ mm, con entalla en V) y la temperatura de ensayo es ambiente o baja (por ejemplo, -40 °C) para simular entornos extremos. La tenacidad al impacto de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele ser baja ($10-30$ J/cm²), pero el aumento del contenido de níquel puede mejorarla. Los resultados del ensayo se utilizan para verificar la fiabilidad de la aleación en aplicaciones de alto impacto.

Prueba de resistencia al desgaste : Esta prueba evalúa el rendimiento de las aleaciones en entornos de fricción mediante la prueba de desgaste de pasador sobre disco (ASTM G99). La prueba se realiza en un disco de rectificado giratorio (generalmente de alúmina o acero), con una carga aplicada de 10-50 N, una velocidad de deslizamiento de 0,1-1 m/s y un tiempo de prueba de 10-30 minutos. El grado de desgaste se mide por la pérdida de masa o el volumen de la huella de desgaste, y la tasa de desgaste típica es $< 0,01$ g/h. La resistencia al desgaste está relacionada con la dureza y la microestructura. Una distribución uniforme de partículas de tungsteno y una matriz densa pueden reducir significativamente la tasa de desgaste. Los resultados de la prueba se utilizan para optimizar el rendimiento de piezas resistentes al desgaste en la industria aeroespacial o moldes industriales.

Puntos clave de las pruebas : Las pruebas de propiedades mecánicas requieren el uso de equipo calibrado para garantizar que la superficie de la muestra sea plana ($Ra < 0,2 \mu m$) y cumpla con las dimensiones estándar. Los resultados de las pruebas deben compararse con el rendimiento objetivo y las desviaciones deben rastrearse hasta su causa mediante análisis de microestructura (como SEM-EDS). Se debe promediar la realización de múltiples pruebas (al menos 3 veces) para mejorar la fiabilidad.

4.2.2 Prueba de rendimiento térmico

Las pruebas de rendimiento térmico se utilizan para evaluar el rendimiento de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en entornos de alta temperatura o ciclos térmicos, incluyendo el coeficiente de expansión térmica, la conductividad térmica y la estabilidad térmica. Estas propiedades son cruciales para aplicaciones de alta temperatura, como contrapesos aeroespaciales y componentes de blindaje médico. Los siguientes son métodos de prueba de rendimiento térmico comúnmente utilizados:

Prueba de coeficiente de expansión térmica : La prueba de coeficiente de expansión térmica (CTE) mide el cambio dimensional de una aleación a medida que cambia la temperatura, siguiendo la norma ASTM E831. Usando un analizador termomecánico (TMA), la muestra (tamaño $5 \times 5 \times 25$ mm) se calienta a $100-800$ °C a una velocidad de calentamiento de $5-10$ °C/min, y se registra la expansión lineal. El CTE de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es típicamente $4,5-5,5 \times 10^{-6}$ / °C, que es cercano al

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tungsteno puro ($4,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$). La prueba debe realizarse en un gas inerte (como argón) para evitar la oxidación, y el requisito de precisión es $\pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$. Los resultados se utilizan para verificar la estabilidad dimensional de la aleación en un entorno de ciclo térmico (como contrapesos de álabes de turbinas).

Prueba de conductividad térmica : La prueba de conductividad térmica evalúa la conductividad térmica de la aleación, según ASTM E1461, utilizando el método de flash láser (LFA). La muestra (en forma de disco, $\phi 10 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$) se prueba en el rango de temperatura ambiente a $1000 ^\circ \text{C}$. El pulso láser calienta un lado de la muestra y el detector infrarrojo mide la respuesta de temperatura en el otro lado. La conductividad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es de $100\text{-}130 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, dependiendo del contenido de tungsteno. La prueba requiere pulir la muestra ($\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$) para reducir la dispersión de la superficie, y la prueba se repite 3 veces para tomar el valor promedio. Los resultados de conductividad térmica se utilizan para optimizar los disipadores de calor aeroespaciales o los componentes de disipación de calor de los dispositivos electrónicos.

Prueba de estabilidad térmica : La prueba de estabilidad térmica evalúa la estabilidad estructural y de rendimiento de las aleaciones a altas temperaturas, generalmente realizada por calorimetría diferencial de barrido (DSC, ASTM E1269) o prueba de recocido a alta temperatura. En la prueba DSC, la muestra ($5\text{-}10 \text{ mg}$) se calienta a $1200 ^\circ \text{C}$ bajo protección de argón, con una velocidad de calentamiento de $10 ^\circ \text{C}/\text{min}$, para detectar cambios de fase o reacciones de oxidación. Las pruebas de recocido se realizan en un horno de vacío ($800\text{-}1000 ^\circ \text{C}$, $2\text{-}4$ horas), y se verifican la pérdida de peso ($< 0,1 \%$) y los cambios microestructurales (como la observación con microscopio metalográfico). La alta estabilidad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro (gracias al alto punto de fusión del tungsteno a $3410 ^\circ \text{C}$) la hace adecuada para aplicaciones de alta temperatura, y los resultados de la prueba se utilizan para verificar su confiabilidad en la industria nuclear o el entorno aeroespacial.

Puntos clave de las pruebas : Las pruebas térmicas deben realizarse en atmósfera controlada para evitar que la oxidación afecte los resultados. La preparación de la muestra debe garantizar la planitud de la superficie y la precisión de las dimensiones, y el equipo de prueba debe calibrarse periódicamente para garantizar la precisión (error $< 1\%$). Los resultados de las pruebas deben compararse con el rendimiento objetivo, ya que los valores anormales pueden indicar defectos microestructurales o desviaciones en la composición.

4.2.3 Prueba de rendimiento eléctrico

Las pruebas de rendimiento eléctrico se utilizan para evaluar la conductividad y la resistividad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, lo que afecta su rendimiento en dispositivos electrónicos, equipos electromagnéticos o aplicaciones militares. La conductividad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele ser de $1,0 \times 10^7 \text{-} 1,5 \times 10^7 \text{ S/m}$, y la resistividad es de $6,7 \times 10^{-8} \text{-} 1,0 \times 10^{-7} \Omega\cdot\text{m}$. Los siguientes son métodos de prueba de rendimiento eléctrico comúnmente utilizados:

Prueba de conductividad/resistividad : Las pruebas de conductividad y resistividad se realizan

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilizando el método de cuatro sondas de acuerdo con ASTM B193. Las muestras de prueba son tiras largas (tamaño $50 \times 5 \times 2$ mm) con una superficie pulida a $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ para reducir la resistencia de contacto. El dispositivo de cuatro sondas aplica una corriente constante (1-10 mA), mide la caída de tensión y calcula la resistividad. La prueba se realiza a temperatura ambiente (20-25 °C) y también puede extenderse a altas temperaturas (como 500 °C) para evaluar el efecto de la temperatura. La resistividad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro aumenta ligeramente con la temperatura (coeficiente de temperatura de aproximadamente $0,004/^\circ\text{C}$), y la precisión de la prueba debe alcanzar $\pm 0,1 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$. Los resultados se utilizan para verificar el rendimiento de la aleación en electrodos o piezas conductoras.

Prueba de resistencia superficial : Esta prueba evalúa la conductividad eléctrica de la superficie de la aleación y se aplica a componentes después del recubrimiento o tratamiento superficial. Con un megóhmetro o un comprobador de resistencia superficial, aplique un voltaje de 100 a 500 V y mida la resistencia superficial (generalmente $> 10^9 \Omega$). La prueba debe realizarse en un ambiente seco (humedad $< 50\%$) y la superficie de la muestra debe estar limpia para evitar la contaminación. Los resultados de la resistencia superficial se utilizan para verificar el rendimiento de aislamiento del blindaje de dispositivos médicos o componentes electrónicos.

Prueba de propiedades magnéticas (relacionadas con la electricidad) : El débil ferromagnetismo de la aleación de tungsteno-níquel-hierro (derivada del níquel y el hierro) puede afectar su aplicación eléctrica, por lo que la intensidad de magnetización debe comprobarse con un magnetómetro de muestra vibrante (VSM). La muestra (tamaño $5 \times 5 \times 5$ mm) se coloca en un campo magnético de 0-2 T a temperatura ambiente y se mide la intensidad de magnetización de saturación (0,1-0,3 T). El tiempo de prueba es de 10 a 20 minutos y el equipo debe calibrarse para garantizar la precisión ($\pm 1\%$). Los resultados de las propiedades magnéticas se utilizan para evaluar la idoneidad de la aleación en dispositivos electromagnéticos, como contrapesos de blindaje electromagnético.

Puntos clave de las pruebas : Las pruebas eléctricas requieren garantizar la ausencia de una capa de óxido o contaminación en la superficie de la muestra, y el punto de contacto debe ser estable para reducir los errores de medición. Las pruebas a alta temperatura deben realizarse en un gas inerte (como el argón) para evitar que la oxidación afecte la conductividad. Los resultados de la prueba deben compararse con el valor objetivo. Desviaciones superiores al 2 % pueden indicar una composición irregular o defectos microscópicos, que requieren análisis SEM-EDS o XRD para su trazabilidad.

4.2.4 Prueba de rendimiento magnético

La prueba de rendimiento magnético de la aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza para evaluar sus propiedades magnéticas, las cuales se deben principalmente al ferromagnetismo del níquel y el hierro, siendo el tungsteno en sí un material paramagnético. La aleación suele presentar un ferromagnetismo débil, y la intensidad de magnetización (intensidad de magnetización de saturación de 0,1-0,3 T) se ve afectada por el contenido de níquel (5-10%) y hierro (2-5%). Las pruebas de rendimiento magnético son cruciales para la aplicación en componentes de compatibilidad electromagnética aeroespacial, equipos electromagnéticos militares y equipos médicos (como el blindaje de resonancia magnética). Los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

siguientes son métodos de prueba de rendimiento magnético comúnmente utilizados:

Prueba de magnetómetro de muestra vibrante (VSM) : VSM es el método principal para medir la magnetización de aleaciones y sigue ASTM A894. La muestra (tamaño $5 \times 5 \times 5$ mm o polvo) se coloca en un campo magnético de 0-2 T con una frecuencia de vibración de 40-80 Hz, y se mide la curva de magnetización (curva MH) para determinar la magnetización de saturación, la remanencia y la coercitividad. La prueba se realiza a temperatura ambiente (20-25 °C) o alta temperatura (como 500 °C), y el tiempo de análisis es de 10-20 minutos. La magnetización de saturación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es generalmente de 0,1-0,3 T, y la coercitividad es baja (<1000 A/m), lo que es adecuado para aplicaciones de blindaje electromagnético. La prueba requiere equipo calibrado (precisión $\pm 1\%$), y la superficie de la muestra necesita ser pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) para reducir la interferencia.

Prueba de permeabilidad magnética : Esta prueba evalúa la capacidad de la aleación para responder a un campo magnético externo. Se utiliza una muestra anular (20 mm de diámetro exterior, 10 mm de diámetro interior y 5 mm de espesor) y se aplica un campo magnético de CA con una frecuencia de 50 Hz a 1 MHz mediante un medidor LCR o un comprobador de permeabilidad magnética. La permeabilidad magnética relativa de la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele estar entre 1,1 y 1,5, lo que refleja su débil ferromagnetismo. La prueba debe realizarse en un entorno sin interferencias de campos magnéticos externos para garantizar una precisión de $\pm 2\%$. Los resultados se utilizan para verificar la idoneidad de la aleación en equipos electromagnéticos, como los componentes de posicionamiento magnético.

Prueba de pérdida de histéresis : Esta prueba evalúa la pérdida de energía de la aleación en un campo magnético alterno, utilizando un probador de anillo BH conforme a la norma ASTM A927. La muestra tiene forma de anillo o varilla, y se aplica un campo magnético alterno de 0,1-1 T a una frecuencia de 50-1000 Hz para medir el área del bucle de histéresis. La pérdida de histéresis de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es baja (<10 W/kg), lo que la hace adecuada para aplicaciones de campo magnético dinámico. La duración de la prueba es de 15 a 30 minutos, y es necesario controlar la temperatura de la muestra para evitar interferencias térmicas.

Puntos clave de la prueba : Las pruebas magnéticas deben garantizar que la muestra no presente oxidación ni contaminación superficial, y el entorno de prueba debe protegerla del campo magnético externo. Los resultados deben compararse con el valor objetivo. Desviaciones superiores al 5 % pueden indicar una distribución desigual del níquel y el hierro, por lo que se requiere un análisis de microestructura mediante SEM-EDS. Las pruebas a alta temperatura deben realizarse bajo protección de argón para evitar la oxidación. Los resultados de la prueba se utilizan para optimizar la fórmula de la aleación (por ejemplo, ajustando la relación níquel-hierro) para satisfacer las necesidades de las aplicaciones electromagnéticas aeroespaciales o militares.

4.3 Certificación y estándares de calidad

La certificación y los estándares de calidad son garantías importantes para el rendimiento, la fiabilidad y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la conformidad con el mercado de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Los estándares nacionales de China proporcionan especificaciones uniformes para la producción, las pruebas y la aplicación de aleaciones, que abarcan la composición, el rendimiento y los métodos de prueba.

El cumplimiento de estos estándares garantiza que las aleaciones cumplan con los altos requisitos de rendimiento de los sectores aeroespacial, militar y médico, a la vez que facilita el comercio internacional y la certificación de calidad. A continuación, se describen los estándares nacionales chinos para las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro:

4.3.1 Norma nacional china para la aleación de tungsteno, níquel y hierro

Las normas nacionales de China (normas GB) proporcionan especificaciones detalladas para la fabricación y el ensayo de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, principalmente en referencia a la norma GB/T 26036-2010 sobre aleaciones pesadas de tungsteno y las normas de materiales relacionadas. Estas normas especifican la composición química, las propiedades mecánicas, la densidad, la microestructura y los métodos de ensayo de la aleación para garantizar la consistencia de su calidad y la fiabilidad de su aplicación.

Composición química : Según la norma GB/T 26036-2010, el contenido de tungsteno en la aleación de tungsteno-níquel-hierro debe ser del 85 % al 97 %, el de níquel del 2 % al 10 %, el de hierro del 1 % al 5 % y el contenido total de impurezas (como oxígeno, carbono y azufre) $<0,1$ %. La norma exige el uso de XRF, ICP-AES o GD-MS para detectar la composición con una precisión de $\pm 0,2$ % y garantizar una alta densidad (16,5-18,75 g/cm³) y resistencia a la corrosión. Por ejemplo, el 90W-7Ni-3Fe debe verificar un contenido de tungsteno del 90 % $\pm 0,5$ % para cumplir con los requisitos de los núcleos antiblindaje militares.

Propiedades mecánicas : La norma estipula una resistencia a la tracción ≥ 800 MPa, una elongación ≥ 10 % y una dureza Vickers de 250-400 HV. El ensayo de tracción se realiza de acuerdo con la norma GB/T 228.1-2010 y el ensayo de dureza, de acuerdo con la norma GB/T 231.1-2018. Los resultados deben cumplir los requisitos de contrapesos aeroespaciales (prioridad a la tenacidad) o componentes militares (prioridad a la resistencia). Si la desviación es >5 %, se debe ajustar el proceso de sinterización.

Densidad y microestructura : La densidad requerida es de 16,5-18,75 g/cm³, con una densidad ≥ 99 %, comprobada mediante el método de Arquímedes (GB/T 1423-1996). La microestructura debe ser uniforme, con un tamaño de partícula de tungsteno de 10-50 micras y una porosidad <1 %, analizada mediante microscopio metalográfico o SEM. Una porosidad anormal puede indicar una temperatura de sinterización insuficiente (debe aumentarse a 1450-1550 °C).

Métodos de ensayo : La norma exige el uso de métodos de ensayo estandarizados, como XRF, ICP-AES (composición), ensayo de tracción (propiedades mecánicas), TMA (coeficiente de expansión térmica $4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y LFA (conductividad térmica 100-130 W/ m·K). El equipo de ensayo debe calibrarse periódicamente y los datos de ensayo deben registrarse y cumplir con las tolerancias estándar.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación y certificación : La norma GB/T 26036-2010 se aplica a contrapesos aeroespaciales, núcleos antiblindaje militares y piezas de protección radiológica médica. Los productos que cumplen con la norma pueden obtener certificaciones de calidad (como la certificación militar ISO 9001 o GJB 9001C) para facilitar su promoción en el mercado y el comercio internacional. Los fabricantes deben presentar informes de pruebas para demostrar que las propiedades de la aleación cumplen con los requisitos de la norma.

4.3.2 Normas internacionales para la aleación de tungsteno-níquel-hierro

Las normas internacionales proporcionan especificaciones uniformes a nivel mundial para la producción, las pruebas y la aplicación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, garantizando la consistencia en la calidad, el rendimiento y el comercio transfronterizo. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en los sectores aeroespacial, militar y médico debido a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), alta resistencia (800-1000 MPa) y excelente resistencia a la corrosión. La Organización Internacional de Normalización (ISO) y la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM) han desarrollado normas relevantes que abarcan la composición química, las propiedades mecánicas, la densidad y los métodos de prueba. A continuación, se presentan las principales normas internacionales:

de tungsteno para la industria aeroespacial : Esta norma especifica los requisitos técnicos para las aleaciones basadas en tungsteno (incluidas las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro) para la industria aeroespacial. La composición química requiere un contenido de tungsteno del 85% al 97%, níquel del 2% al 10%, hierro del 1% al 5% y un contenido total de impurezas (como oxígeno, carbono y azufre) <0,1%. Las propiedades mecánicas requieren una resistencia a la tracción ≥ 700 MPa, una elongación $\geq 10\%$ y una dureza Vickers de 250 a 400 HV. El rango de densidad es de 16,5 a 18,75 g/cm³ y la densidad es $\geq 99\%$. Los métodos de prueba incluyen XRF o ICP-AES (análisis de composición), prueba de tracción (ASTM E8), prueba de dureza (ISO 6507-1) y análisis metalográfico (ISO 643). La norma se aplica a contrapesos y bloques de equilibrio para garantizar la estabilidad dimensional y la resistencia a la corrosión.

ASTM B777-15 (aleación de tungsteno de alta densidad) : ASTM B777 es una norma internacional para aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, que se dividen en cuatro categorías (clase 1-4), correspondientes a un contenido de tungsteno del 90%-97% y una densidad de 16,85-18,75 g/cm³. Por ejemplo, la clase 1 (90W-7Ni-3Fe) requiere una densidad $\geq 17,0$ g/cm³, una resistencia a la tracción ≥ 758 MPa y una elongación $\geq 5\%$. Los métodos de prueba incluyen el método de Arquímedes (densidad), la prueba de tracción (ASTM E8), la prueba de dureza (ASTM E92) y SEM-EDS (microestructura). La norma requiere la verificación del contenido de impurezas (oxígeno <0,05%) para garantizar la resistencia a la corrosión y a la radiación, y es adecuada para núcleos perforantes militares y piezas de blindaje médico.

ISO 9001:2015 (Sistema de Gestión de Calidad) : Aunque no es específica de WNITROGEN, esta norma exige a los fabricantes establecer un sistema de gestión de calidad para garantizar la consistencia en los procesos de producción y el rendimiento del producto. La producción de WNITROGEN debe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cumplir con la certificación ISO 9001, que incluye la gestión estandarizada de la adquisición de materias primas, los procesos de sinterización y las pruebas de rendimiento. La certificación garantiza la trazabilidad del producto y cumple con los requisitos del mercado internacional.

Aplicación e importancia : Normas internacionales como ISO 20886 y ASTM B777 proporcionan una base técnica para el comercio global de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, garantizando su fiabilidad en los sectores aeroespacial (como contrapesos), militar (como núcleos perforantes) y médico (como blindaje radiológico). Los fabricantes deben proporcionar informes de pruebas que cumplan con las normas para verificar la composición, el rendimiento y la microestructura, y las desviaciones (como un contenido de tungsteno de $\pm 0,5\%$) deben corregirse mediante la optimización de procesos.

4.3.3 Normas de aleación de tungsteno-níquel-hierro en Europa, América, Japón, Corea del Sur y otros países del mundo

Diferentes países y regiones han desarrollado normas regionales para las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en función de sus necesidades industriales y características técnicas. Estas normas suelen ser compatibles con las normas internacionales (como ASTM B777 o ISO 20886), pero se centran en ciertos detalles para adaptarse a los escenarios de aplicación locales (como el militar, el aeronáutico o el médico). A continuación, se presentan las normas para las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro de los principales países, como Europa, América, Japón y Corea del Sur:

Estados Unidos (ASTM B777-15 y MIL-T-21014D) : Estados Unidos utiliza la norma ASTM B777-15 como estándar principal, que especifica la clasificación (clase 1-4), la composición (tungsteno 90%-97%), la densidad (16,85-18,75 g/cm³) y el rendimiento (resistencia a la tracción 758-930 MPa) de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en detalle. La industria militar también se refiere a la MIL-T-21014D (especificación militar), que requiere un control de impurezas más estricto (oxígeno <0,03%, carbono <0,02%) y las propiedades mecánicas (elongación $\geq 8\%$) para satisfacer las necesidades de los núcleos perforantes y los contrapesos de aviación. Los métodos de prueba incluyen ICP-AES (composición), pruebas de tracción (ASTM E8) y análisis metalográfico (ASTM E45). El estándar estadounidense enfatiza el alto rendimiento y la confiabilidad y es ampliamente utilizado en la industria de defensa.

Europa (EN 10204 vs. DIN) : Europa utiliza la norma EN 10204 (Certificado de inspección de materiales metálicos) para regular la certificación de calidad de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro, y requiere un informe de prueba de tipo 3.1 o 3.2 para demostrar que la composición y el rendimiento cumplen con los requisitos de diseño.

Las normas DIN alemanas (como DIN EN ISO 20886) son coherentes con las normas ISO y destacan un contenido de tungsteno del 85% al 97%, una densidad de 16,5 a 18,5 g/cm³ y una resistencia a la tracción ≥ 700 MPa. Las normas europeas se centran en la resistencia a la corrosión y la uniformidad microestructural (porosidad <1%), y los métodos de prueba incluyen XRF, SEM-EDS y TMA (coeficiente de expansión térmica 4,5 a $5,5 \times 10^{-6}$ / °C). Estas normas se aplican a los contrapesos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

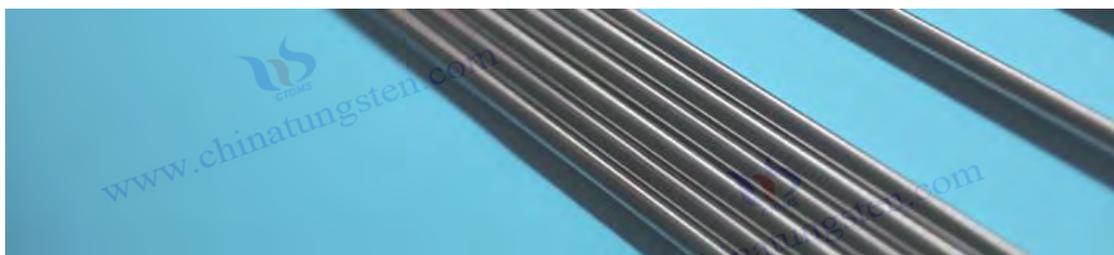
aeroespaciales y a las piezas de protección contra la radiación médica.

Japón (JIS H 4463) : La norma industrial japonesa JIS H 4463 especifica los requisitos técnicos para las aleaciones de tungsteno de alta densidad, aplicables a las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro. La norma exige un contenido de tungsteno del 88 % al 95 %, una relación níquel-hierro ajustable, una densidad de 16,5 a 18,5 g/cm³, una resistencia a la tracción ≥ 750 MPa y una elongación ≥ 10 %. Los métodos de prueba incluyen ICP-AES (composición), pruebas de tracción (JIS Z 2241) y pruebas de dureza (JIS Z 2245). La norma japonesa hace hincapié en el procesamiento de alta precisión y la calidad de la superficie ($R_a < 0,8 \mu\text{m}$), lo que es adecuado para contrapesos de dispositivos electrónicos y equipos médicos. Los fabricantes japoneses a menudo combinan la certificación ISO 9001 para garantizar que sus productos cumplan con los requisitos del mercado internacional.

Corea del Sur (KS D 9502) : La norma coreana KS D 9502 especifica la composición y las propiedades de las aleaciones de tungsteno de alta densidad con un contenido de tungsteno del 85 % al 95 %, una densidad de 16,5 a 18,75 g/cm³, una resistencia a la tracción ≥ 700 MPa y una dureza Vickers de 250 a 400 HV. Los métodos de ensayo son similares a los de la norma ASTM B777, e incluyen el método de Arquímedes (densidad), el ensayo de tracción y la difracción de rayos X (microestructura). La norma coreana se centra en la resistencia al desgaste y la estabilidad térmica, y es adecuada para moldes industriales y componentes aeroespaciales. Corea del Sur también exige el cumplimiento de la directiva RoHS, que limita el contenido de impurezas nocivas (como el plomo) para cumplir con los requisitos medioambientales.

Otros países : Países como Rusia e India suelen consultar las normas ASTM o ISO, pero pueden tener adaptaciones locales. Por ejemplo, la norma GOST de Rusia exige especificaciones de composición y rendimiento similares a la ASTM B777, pero prioriza las pruebas de tenacidad a baja temperatura (-50 °C) para adaptarse a aplicaciones en entornos extremos.

Comparación y aplicación : Las normas europeas y estadounidenses (como ASTM B777 y EN 10204) se centran en los requisitos de alto rendimiento del sector militar y aeroespacial, mientras que las normas japonesas y coreanas (JIS H 4463 y KS D 9502) priorizan el procesamiento de precisión y la protección del medio ambiente. Las normas de todos los países exigen pruebas rigurosas de composición (tungsteno $\pm 0,5$ %) y rendimiento (resistencia a la tracción ± 5 %), y los métodos de prueba incluyen XRF, ICP-AES y SEM-EDS. Los fabricantes deben seleccionar las normas correspondientes según el mercado objetivo para garantizar la conformidad del producto.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 5 Campos de aplicación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

5.1 Aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en la industria aeroespacial

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente en la industria aeroespacial gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica. Esta aleación satisface la demanda de materiales de alto rendimiento en el sector aeroespacial, especialmente en entornos que requieren contrapesos de alta densidad o altas temperaturas. Sus propiedades únicas la convierten en un material clave en equipos como aeronaves, naves espaciales y satélites. A continuación, se detallará su aplicación en materiales para contrapesos y componentes resistentes a altas temperaturas.

5.1.1 Materiales de equilibrio

La aleación de tungsteno-níquel-hierro es ideal como material de contrapeso en el sector aeroespacial gracias a su alta densidad. Los contrapesos se utilizan para ajustar el centro de gravedad de las aeronaves, garantizar la estabilidad de vuelo u optimizar el rendimiento dinámico. En comparación con materiales de contrapeso tradicionales como el plomo, la aleación de tungsteno-níquel-hierro proporciona la masa necesaria en un volumen menor, además de ofrecer mayor resistencia mecánica y respeto al medio ambiente, cumpliendo así con los requisitos de ligereza y alto rendimiento del sector aeroespacial.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en alerones, timones, elevadores y contrapesos de rotores de helicópteros. En aeronaves comerciales, los contrapesos se utilizan para ajustar el equilibrio del ala y garantizar la estabilidad aerodinámica durante el vuelo. En naves espaciales, como satélites o estaciones espaciales, se utilizan para corregir la actitud orbital o estabilizar las piezas giratorias.

Ventajas de rendimiento : Su alta densidad permite que la aleación de tungsteno-níquel-hierro logre un equilibrio de peso eficiente y reduzca el volumen y el peso de los componentes. Su baja expansión térmica garantiza su estabilidad dimensional ante cambios de temperatura (como en entornos de baja o alta temperatura a gran altitud) y evita la deformación causada por el estrés térmico. Su excelente resistencia y tenacidad le permiten soportar vibraciones e impactos durante el vuelo. Además, su resistencia a la corrosión la hace adecuada para la exposición prolongada a la humedad o a entornos con niebla salina, como a gran altitud o sobre el océano.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los contrapesos se fabrican generalmente mediante pulvimetalurgia, combinada con mecanizado para lograr una alta precisión. El tratamiento superficial puede mejorar la resistencia a la corrosión. El control de calidad debe garantizar una densidad uniforme y una microestructura consistente de los contrapesos para garantizar un rendimiento estable.

5.1.2 Piezas resistentes a altas temperaturas

La aleación de tungsteno-níquel-hierro la convierte en un material predilecto para componentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistentes a altas temperaturas en la industria aeroespacial. El alto punto de fusión y la estabilidad térmica del tungsteno, junto con la resistencia a la oxidación y la tenacidad del níquel y el hierro, permiten que la aleación mantenga la integridad estructural y las propiedades mecánicas en entornos de alta temperatura. Estos componentes tienen importantes aplicaciones en motores aeroespaciales, componentes de extremo caliente de naves espaciales y sistemas de propulsión.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan a menudo en contrapesos de álabes de turbinas, componentes de toberas o bloques de equilibrio del extremo caliente en motores de aviación. En motores de turbofán, la aleación se utiliza como contrapeso de álabes para optimizar el equilibrio rotacional y resistir el impacto de la rotación a alta velocidad y el gas a alta temperatura. En sistemas de propulsión espacial, la aleación se utiliza para fabricar soportes para toberas o componentes de la cámara de combustión, que deben soportar altas temperaturas instantáneas y tensiones de ciclo térmico.

Ventajas de rendimiento : La alta conductividad térmica de la aleación permite dispersar rápidamente el calor y prevenir el sobrecalentamiento local, lo que resulta ideal para la gestión térmica en entornos de alta temperatura. Su baja expansión térmica garantiza la estabilidad dimensional de los componentes al calentarse o enfriarse rápidamente, evitando así las grietas por tensión térmica. La resistencia a la oxidación del níquel permite que la aleación resista la corrosión por oxidación en aire caliente y prolongue su vida útil. La resistencia y tenacidad de la aleación le permiten soportar vibraciones y tensiones mecánicas.

Requisitos de procesamiento y calidad : Las piezas resistentes a altas temperaturas se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar la uniformidad microestructural y una alta densidad. El mecanizado requiere el uso de herramientas de alta dureza, y los tratamientos superficiales, como los recubrimientos, pueden mejorar aún más la resistencia al desgaste y a las altas temperaturas. El control de calidad exige verificar la estabilidad del rendimiento y la resistencia a la oxidación de las piezas en entornos de alta temperatura.

5.2 Defensa y Militar

La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene importantes aplicaciones en los sectores militar y de defensa gracias a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción: 800-1000 MPa, elongación: 10-20%), resistencia a la corrosión y estabilidad térmica. Esta aleación satisface las necesidades de materiales de alto rendimiento de los equipos militares modernos, especialmente en situaciones que requieren alta penetración o alta protección. Sus propiedades únicas la convierten en un material ideal para componentes clave como proyectiles perforantes y blindaje protector. Su alta densidad y resistencia le proporcionan un excelente rendimiento en condiciones extremas.

5.2.1 Materiales perforantes

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se ha convertido en la opción preferida para el núcleo de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

munición perforante moderna gracias a su alta densidad, excelente resistencia y tenacidad moderada. Esta munición se utiliza en equipos militares como tanques, armas antitanque y artillería naval, y está diseñada para penetrar objetivos blindados enemigos, como blindaje de tanques o vehículos blindados. La alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro proporciona al núcleo una energía cinética extremadamente alta, mientras que sus buenas propiedades mecánicas garantizan que el núcleo mantenga su integridad estructural durante impactos a alta velocidad, logrando así un excelente efecto perforante.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente como materiales de núcleo para proyectiles cinéticos perforantes (APFSDS, Armor-Piercing Fin-Stabilized Discarding Sabot). Por ejemplo, los proyectiles de tanques suelen utilizar núcleos de aleación de tungsteno-níquel-hierro, que presentan alta densidad y resistencia, y pueden penetrar blindajes laminados homogéneos (RHA) de cientos de milímetros de espesor. En misiles antitanque o artillería naval, los núcleos de aleación de tungsteno-níquel-hierro se utilizan para contrarrestar el blindaje compuesto moderno y el blindaje reactivo, proporcionando una penetración fiable. La fórmula típica es 90W-7Ni-3Fe o 93W-5Ni-2Fe para equilibrar la densidad, la resistencia y la tenacidad.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro ($17,0-18,5 \text{ g/cm}^3$) permite que el núcleo tenga una energía cinética extremadamente alta cuando se dispara a alta velocidad (la velocidad inicial puede alcanzar los $1500-1800 \text{ m/s}$), lo que mejora la penetración. Su alta resistencia a la tracción ($800-1000 \text{ MPa}$) y tenacidad moderada (elongación del $10\%-20\%$) garantizan que el núcleo no sea fácil de romper o deformar excesivamente al impactar la armadura, y puede transferir eficazmente la energía cinética al objetivo. La conductividad térmica de la aleación ($100-130 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) ayuda a dispersar la alta temperatura instantánea generada por el impacto y evita que el núcleo se ablande o se funda. Además, la resistencia a la corrosión de la aleación (gracias a la resistencia a la oxidación del níquel) permite que se almacene durante mucho tiempo en un entorno húmedo o con niebla salina, lo que es adecuado para los diversos requisitos ambientales de los equipos militares.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los núcleos perforantes se preparan generalmente mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una densidad $>99,5 \%$ y uniformidad microestructural. El mecanizado utiliza herramientas de CBN de alta dureza con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mm}$ para garantizar la consistencia geométrica del núcleo. El tratamiento térmico puede aumentar aún más la dureza (dureza Vickers $350-400 \text{ HV}$) y mejorar la penetración. El control de calidad debe cumplir con las normas ASTM B777 o MIL-T-21014D, verificando una desviación de densidad $<0,2 \text{ g/cm}^3$, una porosidad $<1 \%$ y garantizando la consistencia del rendimiento mediante ensayos de tracción y análisis metalográficos. Los recubrimientos superficiales (como PVD TiN) pueden mejorar la resistencia al desgaste y prolongar la vida útil del núcleo en condiciones de fricción a alta velocidad.

5.2.2 Armadura protectora

La aleación de tungsteno-níquel-hierro en blindajes protectores se refleja principalmente en la capa de blindaje de alta densidad y los componentes de refuerzo del blindaje compuesto. Se utiliza ampliamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en los sistemas de protección de tanques, vehículos blindados y buques. El blindaje protector debe resistir la prueba de proyectiles de alta velocidad, impactos explosivos y entornos extremos. La alta densidad, resistencia y tenacidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permiten absorber y dispersar eficazmente la energía del impacto y mejorar el rendimiento protector del blindaje. Además, su resistencia a la corrosión y estabilidad térmica la hacen adecuada para su uso a largo plazo en entornos hostiles.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan a menudo en capas de alta densidad en blindajes compuestos, combinadas con cerámica, acero o materiales poliméricos para formar estructuras protectoras multicapa. Por ejemplo, en el blindaje compuesto de los tanques de batalla principales (como el M1A2 Abrams), se utilizan aleaciones de tungsteno-níquel-hierro como capas de refuerzo para absorber la energía de impacto de los penetradores de energía cinética o los proyectiles perforantes (HEAT). En vehículos blindados o buques, la aleación se utiliza para fabricar placas de blindaje en zonas clave para proteger a los ocupantes y al equipo del impacto de metralla o explosiones. La fórmula típica es 90W-7Ni-3Fe, con una densidad de 17,0-18,0 g/cm³, lo que proporciona una excelente protección.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación (16,5-18,75 g/cm³) le permite absorber eficazmente la energía cinética del proyectil, ralentizar la velocidad de penetración y mejorar la eficiencia protectora del blindaje. Su alta resistencia a la tracción (800-1000 MPa) y tenacidad (elongación 10%-20%) garantizan que el blindaje no sea fácil de romper o desprender bajo impactos de alta velocidad y pueda soportar múltiples golpes. La conductividad térmica (100-130 W/ m·K) ayuda a dispersar la alta temperatura instantánea generada por explosión o impacto, previniendo el ablandamiento o la ablación local. El bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación ($4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) garantiza la estabilidad dimensional y evita grietas en ciclos térmicos o entornos explosivos. La resistencia a la corrosión (gracias a la capa protectora de níquel NiO) la hace adecuada para su uso en entornos marinos o húmedos, como el blindaje de barcos.

Requisitos de procesamiento y calidad : Las piezas de blindaje protector se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una densidad >99,5% y uniformidad microestructural. El mecanizado utiliza herramientas de carburo o electroerosión (EDM) para lograr formas complejas y alta precisión (tolerancia $\pm 0,02$ mm). El tratamiento térmico puede eliminar la tensión interna y mejorar la tenacidad. El control de calidad debe cumplir con las normas MIL-T-21014D o ASTM B777 para verificar la densidad, la resistencia y la porosidad (<1%). El tratamiento superficial (como el recubrimiento CVD WC o la galvanoplastia Ni-P) puede mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión, y prolongar la vida útil del blindaje. El análisis microestructural (como SEM-EDS) se utiliza para detectar la distribución de partículas de tungsteno y la uniformidad de la matriz para garantizar el rendimiento protector.

5.3 Aplicación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro en el campo médico

La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene importantes aplicaciones en el campo médico gracias a su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alta densidad, excelente resistencia a la radiación, buenas propiedades mecánicas (resistencia a la tracción de 800-1000 MPa, elongación del 10% al 20%) y resistencia a la corrosión. Especialmente en entornos donde se requiere blindaje contra la radiación de alta energía o la fabricación de piezas de precisión, la aleación de tungsteno-níquel-hierro puede satisfacer las necesidades de materiales de alto rendimiento de los equipos médicos. Su alta densidad y resistencia a la radiación la convierten en la opción ideal para blindar componentes de equipos de TC/RM y colimadores de equipos de radioterapia, mejorando significativamente la seguridad y la precisión de los equipos. A continuación, se detallarán sus aplicaciones específicas en estos dos aspectos.

5.3.1 Componentes de blindaje de equipos de TC/RMN

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente como componentes de blindaje en equipos de tomografía computarizada (TC) y resonancia magnética (RM) para proteger a los pacientes, al personal médico y a los equipos de los efectos de la radiación de rayos X o gamma. Los equipos de TC utilizan imágenes de rayos X, y aunque los equipos de RM utilizan principalmente campos magnéticos, sus sistemas auxiliares pueden incluir fuentes de radiación, por lo que se requieren materiales de blindaje eficientes. La alta densidad y resistencia a la radiación de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro les permiten atenuar eficazmente la radiación de alta energía, mientras que sus propiedades mecánicas y su resistencia a la corrosión garantizan la fiabilidad a largo plazo de los componentes de blindaje.

Escenarios de aplicación : En equipos de TC, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan para fabricar protectores de radiación, placas de protección para detectores y anillos de protección alrededor de tubos de rayos X para evitar fugas de radiación. En equipos de resonancia magnética, la aleación se utiliza para proteger fuentes de radiación auxiliares (como marcadores radiactivos) o interferencias electromagnéticas, garantizando así la uniformidad del campo magnético. La fórmula típica es 95W-4Ni-1Fe, que proporciona un excelente efecto de protección en un volumen pequeño gracias a su alta densidad (18,0-18,5 g/cm³), cumpliendo así los requisitos de diseño compacto de los equipos médicos.

Ventajas de rendimiento : El alto número atómico del tungsteno ($Z = 74$) y su alta densidad hacen que funcione bien en el efecto fotoeléctrico y la dispersión Compton, y puede absorber eficazmente los rayos X y los rayos gamma. Su eficiencia de blindaje supera con creces la de materiales tradicionales como el plomo (densidad 11,34 g/cm³). El bajo coeficiente de expansión térmica de la aleación ($4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) garantiza la estabilidad dimensional bajo el calor generado por el funcionamiento del equipo, evitando la deformación que afecta al rendimiento del blindaje. Su alta resistencia (800-1000 MPa) y tenacidad moderada (elongación 10%-20%) permiten que los componentes de blindaje soporten la vibración del equipo y el estrés mecánico. La resistencia a la oxidación y la resistencia a la corrosión del níquel (formando una capa protectora de NiO) garantizan la estabilidad a largo plazo de los componentes en entornos esterilizados o húmedos.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los componentes de blindaje se fabrican mediante pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida, 1450-1550 °C) combinada con prensado isostático en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

caliente (HIP, 1200-1400 °C, 100-200 MPa) para garantizar una densidad >99,5 % y homogeneidad microestructural. El mecanizado (como torneado y fresado) requiere el uso de herramientas de CBN para lograr una alta precisión (tolerancia $\pm 0,01$ mm) y un acabado superficial ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$). El tratamiento de la superficie (como el enchapado o pulido de Ni-P) puede mejorar aún más la resistencia a la corrosión y la estética. El control de calidad debe cumplir con las normas ISO 20886 o ASTM B777 para verificar la densidad, la porosidad (<1 %) y la resistencia a la radiación, y XRF o ICP-AES para detectar la composición. El análisis microestructural garantiza que las partículas de tungsteno se distribuyan uniformemente sin inclusiones ni poros.

Desafíos técnicos y optimización : La alta dureza de la aleación de tungsteno-níquel-hierro (dureza Vickers 350-400 HV) dificulta el procesamiento, por lo que es necesario optimizar las herramientas y los parámetros de corte para reducir costos. En los equipos de resonancia magnética (MRI), el débil ferromagnetismo de la aleación (intensidad de magnetización 0,1-0,3 T) debe controlarse estrictamente para evitar afectar la uniformidad del campo magnético. Las propiedades magnéticas pueden optimizarse reduciendo el contenido de hierro (por ejemplo, al 1-2 %) o mediante tratamiento térmico. En el futuro, la fabricación aditiva (como SLM) permitirá obtener componentes de blindaje con formas más complejas, mejorando aún más la flexibilidad de diseño y la eficiencia de producción.

5.3.2 Colimadores para equipos de radioterapia

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente como material para colimadores en equipos de radioterapia para controlar con precisión la dirección y el alcance de los rayos de radiación, proteger los tejidos sanos y mejorar los efectos del tratamiento. Los equipos de radioterapia (como los aceleradores lineales) utilizan rayos X o rayos gamma de alta energía para tratar tumores, y los colimadores deben tener una resistencia a la radiación extremadamente alta y un procesamiento de precisión. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permiten cumplir con estos estrictos requisitos, convirtiéndola en el material preferido para colimadores en equipos de radioterapia.

Escenarios de aplicación : En aceleradores lineales, se utilizan aleaciones de tungsteno-níquel-hierro para fabricar colimadores multiláminas (MLC) y colimadores fijos. Los colimadores multiláminas constan de docenas de láminas de aleación móviles que ajustan dinámicamente la forma del haz de radiación para adaptarse al contorno del tumor. Los colimadores fijos se utilizan para limitar el área de radiación y proteger los tejidos sanos circundantes. La fórmula típica es 95W-4Ni-1Fe o 97W-2Ni-1Fe, que puede apantallar eficazmente la radiación y reducir el volumen del colimador gracias a su alta densidad (18,0-18,75 g/cm³).

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación y el alto número atómico del tungsteno le permiten absorber eficientemente la radiación de alta energía, reducir la dispersión y las fugas, y garantizar la precisión del haz de radiación. Su alta resistencia (800-1000 MPa) y tenacidad (elongación 10%-20%) garantizan que las hojas del colimador no se deformen ni rompan fácilmente durante el movimiento rápido o el uso a largo plazo. El bajo coeficiente de expansión térmica ($4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantiza que el colimador mantenga la precisión geométrica bajo el calor generado por el funcionamiento del equipo de radioterapia. La resistencia a la corrosión de la aleación (gracias a la resistencia a la oxidación del níquel) le permite resistir la influencia de desinfectantes y ambientes húmedos, lo que extiende su vida útil. En comparación con el plomo, la aleación de tungsteno-níquel-hierro no es tóxica y es respetuosa con el medio ambiente, cumpliendo con los estándares de seguridad de los equipos médicos.

Requisitos de procesamiento y calidad : El colimador se fabrica mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una densidad >99,5 % y una estructura no porosa. Se utiliza mecanizado de precisión para fabricar álabes con formas complejas, con tolerancias de $\pm 0,005$ mm y una rugosidad superficial $Ra < 0,2 \mu m$ para garantizar un control preciso del haz de radiación. El tratamiento térmico puede eliminar la tensión de procesamiento y mejorar la tenacidad. Recubrimientos superficiales. Puede mejorar la resistencia al desgaste y a la corrosión. El control de calidad debe cumplir con las normas ISO 13485 o ASTM B777 para verificar la composición, la densidad y la microestructura, y confirmar el rendimiento del blindaje mediante pruebas de transmisión de rayos X.

Desafíos técnicos y optimización : Los altos requisitos de precisión del colimador dificultan el procesamiento, por lo que se requieren equipos avanzados (como el corte láser o la fabricación aditiva) para reducir costos. El débil ferromagnetismo de la aleación puede causar ligeras interferencias en entornos con campos magnéticos elevados, por lo que es necesario optimizar la fórmula o utilizar recubrimientos no magnéticos. En el futuro, la tecnología de impresión 3D permitirá la producción personalizada de colimadores multilamina, mejorando la flexibilidad de diseño y la precisión del tratamiento. La aplicación de la aleación de tungsteno, níquel y hierro en colimadores de radioterapia ha mejorado significativamente la seguridad y la eficacia de la radioterapia.

5.3.3 Dispositivos médicos de precisión

La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene importantes aplicaciones en dispositivos médicos de precisión gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y biocompatibilidad. Estos dispositivos suelen requerir materiales de alta precisión, pequeño volumen y alta fiabilidad para cumplir con los requisitos de rendimiento de los equipos de diagnóstico o terapéuticos en entornos complejos. La alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permite proporcionar suficiente masa o efecto de blindaje en un volumen pequeño, mientras que su resistencia y resistencia a la corrosión garantizan la estabilidad a largo plazo del dispositivo.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan para fabricar pequeños contrapesos, componentes de blindaje o elementos de posicionamiento en equipos de diagnóstico médico. Por ejemplo, en endoscopios o equipos de ultrasonido, se emplean como microcontrapesos o componentes de blindaje para garantizar la estabilidad y precisión del equipo durante operaciones complejas.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación permite una eficiente distribución de masa o

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protección contra la radiación en un espacio limitado, lo que la hace ideal para diseños miniaturizados. Su alta resistencia y tenacidad permiten que el dispositivo resista vibraciones o tensiones mecánicas durante su funcionamiento, garantizando así su estabilidad dimensional ante cambios de temperatura corporal o de funcionamiento del equipo. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión causada por desinfectantes o fluidos corporales, prolongando así su vida útil. Además, la aleación es atóxica y respetuosa con el medio ambiente, cumpliendo con los requisitos de bioseguridad de los dispositivos médicos.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los dispositivos médicos de precisión se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y uniformidad microestructural. El mecanizado de precisión (como la electroerosión o el corte por láser) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias micrométricas y un acabado superficial excepcional para reducir la fricción y el desgaste. El tratamiento térmico elimina las tensiones de procesamiento y mejora la tenacidad. Los tratamientos superficiales (como el pulido o el niquelado químico) mejoran la resistencia a la corrosión y la biocompatibilidad. El control de calidad verifica la consistencia de la composición, la uniformidad de la densidad y la ausencia de defectos en la estructura para garantizar la fiabilidad del dispositivo en entornos médicos.

5.3.4 Contrapesos de las articulaciones del robot quirúrgico

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza como material de contrapeso para articulaciones en robots quirúrgicos para optimizar el equilibrio de movimiento y la precisión operativa. Los robots quirúrgicos (como los sistemas de cirugía mínimamente invasiva) requieren un control de movimiento de alta precisión y propiedades mecánicas estables. Los componentes de contrapeso contribuyen a equilibrar la gravedad y mejorar la precisión de posicionamiento en articulaciones o brazos robóticos. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la convierten en un material de contrapeso ideal.

Escenarios de aplicación : En robots quirúrgicos, se utilizan aleaciones de tungsteno-níquel-hierro para las pesas articulares o el equilibrio del brazo robótico, garantizando así su estabilidad al realizar operaciones delicadas como suturas o cortes. Por ejemplo, en sistemas robóticos quirúrgicos mínimamente invasivos, las pesas de aleación se utilizan para ajustar el equilibrio dinámico del brazo robótico, reducir la vibración y mejorar la precisión quirúrgica. En robots ortopédicos o de neurocirugía, las pesas ayudan a mantener la estabilidad y el control del dispositivo durante movimientos complejos.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad permite que la aleación proporcione un efecto de contrapeso suficiente en un volumen pequeño, optimice la distribución del peso de las articulaciones del robot y reduzca el consumo de energía del sistema de accionamiento. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que el contrapeso no se deforme ni se fracture por fatiga durante movimientos rápidos u operaciones frecuentes. Las características de baja expansión térmica garantizan que el contrapeso mantenga su estabilidad dimensional ante los cambios de temperatura en el quirófano o el calor generado por el funcionamiento del equipo. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

química causada por desinfectantes y procesos de limpieza, lo que la hace adecuada para un uso prolongado. Además, el débil ferromagnetismo de la aleación se ha optimizado para que no interfiera con el sistema electromagnético del robot quirúrgico.

Requisitos de procesamiento y calidad : Las pesas articuladas se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y una estructura no porosa. El mecanizado de precisión (como CNC de cinco ejes o electroerosión) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias controladas en el rango micrométrico, y la superficie debe pulirse hasta alcanzar un acabado de alta calidad para reducir la fricción. El tratamiento térmico puede mejorar la tenacidad, y los recubrimientos superficiales (como el DLC) mejoran la resistencia al desgaste y la corrosión. El control de calidad debe verificar la uniformidad de la densidad, las propiedades mecánicas y la microestructura para garantizar la estabilidad de la pesa en funcionamiento dinámico.

Desafíos técnicos y optimización : El procesamiento de contrapesos diminutos requiere equipos de alta precisión, lo que incrementa los costos de producción, y el proceso debe optimizarse para mejorar la eficiencia. El magnetismo de la aleación debe controlarse estrictamente para evitar interferencias con sensores robóticos o sistemas electromagnéticos, lo cual puede solucionarse reduciendo el contenido de hierro o utilizando recubrimientos no magnéticos. La tecnología de fabricación aditiva permite personalizar la producción de contrapesos complejos y mejorar la flexibilidad del diseño.

5.3.5 Micropesos para terapia intervencionista

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan como micropesos en tratamientos intervencionistas y se emplean ampliamente en catéteres, guías o dispositivos médicos implantables para mejorar la controlabilidad y la precisión de posicionamiento del equipo. Los tratamientos intervencionistas (como la implantación de stents cardiovasculares o la cirugía neurointervencionista) requieren dispositivos miniaturizados de alta precisión, y las pesas se utilizan para ajustar el equilibrio del dispositivo o proporcionar retroalimentación táctil que ayuda a los médicos a operar con precisión. La alta densidad y biocompatibilidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro las convierten en el material predilecto para estas aplicaciones.

Escenarios de aplicación : En el tratamiento intervencionista cardiovascular, se utilizan aleaciones de tungsteno, níquel y hierro para micropesos en la punta de los catéteres, optimizando así su equilibrio y flexibilidad, y facilitando la navegación del médico dentro de los vasos sanguíneos. En la cirugía neurointervencionista, se utilizan pesas de aleación para guías o microsondas que ayudan a alcanzar con precisión la ubicación objetivo. La aleación también se puede utilizar para componentes de peso en dispositivos implantables, como las piezas de equilibrio de marcapasos o neuroestimuladores.

Ventajas de rendimiento : Su alta densidad permite que la aleación proporcione suficiente masa en un volumen pequeño, optimiza la distribución del peso del dispositivo y mejora la controlabilidad y la estabilidad. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que el micropeso no se deforme ni se rompa durante operaciones complejas. Su baja expansión térmica garantiza la estabilidad dimensional del dispositivo a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura corporal o en entornos quirúrgicos. La resistencia a la corrosión y la biocompatibilidad de la aleación le permiten resistir la erosión por fluidos corporales y cumplir con los requisitos de implantación a largo plazo o usos múltiples. Sus propiedades no tóxicas garantizan el cumplimiento de las normas de seguridad médica.

Requisitos de procesamiento y calidad : Las micropesas se preparan mediante pulvimetalurgia o moldeo por inyección de metal (MIM), en combinación con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y una estructura sin defectos. El mecanizado de ultraprecisión (como el micromecanizado láser o el mecanizado por electrochispa) se utiliza para fabricar componentes micrométricos, con tolerancias controladas dentro de $\pm 0,005$ mm y superficies pulidas con efecto espejo ($Ra < 0,1 \mu m$). El tratamiento térmico optimiza las propiedades mecánicas, y el tratamiento superficial (como el niquelado químico o el recubrimiento DLC) mejora la biocompatibilidad y la resistencia a la corrosión. El control de calidad debe verificar la composición, la densidad y la microestructura para garantizar la fiabilidad y la seguridad del dispositivo en tratamientos intervencionistas.

Desafíos técnicos y optimización : El procesamiento de micropesas es complejo y requiere equipos y procesos avanzados para garantizar la precisión y el control de costos. La microestructura debe controlarse estrictamente para evitar poros o inclusiones que afecten el rendimiento. En el futuro, la tecnología de impresión 3D permitirá la producción personalizada de micropesas para satisfacer necesidades médicas específicas, mejorando al mismo tiempo la eficiencia de la producción.

5.4 Aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en instrumentos de precisión

La aleación de tungsteno-níquel-hierro desempeña un papel importante en el campo de los instrumentos de precisión gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas, buena resistencia a la corrosión y baja expansión térmica. Los instrumentos de precisión tienen requisitos de materiales extremadamente estrictos y deben ofrecer alta calidad, estabilidad y precisión en un espacio limitado. La aleación de tungsteno-níquel-hierro cumple estos requisitos y se utiliza ampliamente en entornos que requieren equilibrio preciso, supresión de vibraciones o alta estabilidad. Su alta densidad y resistencia mecánica la convierten en un material ideal para contrapesos y componentes clave de instrumentos de precisión. A continuación, se detallará su aplicación en contrapesos de instrumentos de precisión y bloques de equilibrio de plataformas de máquinas de litografía.

5.4.1 Contrapesos de instrumentos de precisión

de tungsteno -níquel-hierro se utiliza ampliamente como material de contrapeso en instrumentos de precisión para optimizar la distribución del centro de gravedad del equipo y mejorar la precisión y estabilidad del movimiento. Los instrumentos de precisión, como equipos de medición óptica, láseres, dispositivos científicos experimentales e instrumentos de prueba de alta gama, suelen requerir un balance de masa preciso en un espacio compacto para reducir la vibración, mejorar la precisión de posicionamiento o garantizar la estabilidad operativa a largo plazo. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permiten cumplir con estos exigentes requisitos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Escenarios de aplicación : En equipos de medición óptica, como interferómetros láser de alta precisión o microscopios, se utilizan contrapesos de aleación de tungsteno-níquel-hierro para ajustar el centro de gravedad del equipo y garantizar la estabilidad del sistema óptico durante el movimiento o el escaneo. En dispositivos científicos experimentales, como detectores de ondas gravitacionales o balanzas de alta precisión, se utilizan contrapesos de aleación para suprimir las interferencias de vibraciones externas y mejorar la sensibilidad de la medición. En instrumentos de prueba de alta gama, como equipos de prueba de semiconductores, se utilizan contrapesos para optimizar el equilibrio de brazos o plataformas robóticas y reducir los errores de movimiento.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación proporciona suficiente masa en un volumen pequeño, lo que resulta adecuado para los requisitos de diseño compacto de los instrumentos de precisión. Su baja expansión térmica garantiza que el contrapeso se mantenga dimensionalmente estable ante cambios de temperatura (como las diferencias de temperatura en el laboratorio o el calor generado por el funcionamiento del equipo), evitando así la deformación causada por la tensión térmica. Su excelente resistencia y tenacidad permiten que el contrapeso resista vibraciones o impactos durante el funcionamiento del instrumento, evitando así la deformación o la fatiga. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión por productos químicos o humedad en el entorno de laboratorio, lo que prolonga su vida útil. Además, el débil ferromagnetismo de la aleación se ha optimizado para que no interfiera con el sistema electromagnético de los instrumentos de precisión, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta sensibilidad.

Requisitos de procesamiento y calidad : Las pesas para instrumentos de precisión se fabrican generalmente mediante pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida) combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y uniformidad microestructural. El mecanizado de precisión (como el CNC de cinco ejes o la electroerosión) se utiliza para producir formas complejas con tolerancias controladas en el rango micrométrico, y la superficie debe pulirse hasta obtener un acabado de alta calidad para reducir la fricción y el desgaste. El tratamiento térmico puede eliminar las tensiones de procesamiento y mejorar la tenacidad. El tratamiento superficial (como el niquelado químico) mejora la resistencia a la corrosión y la estética. El control de calidad debe verificar la uniformidad de la densidad, las propiedades mecánicas y la ausencia de defectos en la estructura para garantizar la estabilidad de la pesa en funcionamiento dinámico.

5.4.2 Bloque de equilibrio de la plataforma de litografía

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza como bloque de equilibrio de plataforma en máquinas de fotolitografía para garantizar la estabilidad y la precisión de posicionamiento del equipo durante la fabricación de semiconductores de alta precisión. Las máquinas de fotolitografía son equipos esenciales en la producción de semiconductores, ya que se utilizan para grabar patrones de circuitos a escala micro-nano en obleas de silicio y tienen requisitos extremadamente altos de supresión de vibraciones, distribución de masa y estabilidad térmica. Las características de alta densidad y baja expansión térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro lo convierten en un material ideal para bloques de equilibrio de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plataforma, lo que puede mejorar eficazmente el rendimiento y la confiabilidad de las máquinas de fotolitografía.

Escenarios de aplicación : En máquinas de litografía ultravioleta extrema (EUV) o ultravioleta profunda (DUV), se utilizan contrapesos de aleación de tungsteno-níquel-hierro en el banco de trabajo o la plataforma óptica de la máquina para optimizar la distribución de masa, reducir la vibración y la inclinación, y garantizar una precisión de posicionamiento subnanométrica en las obleas de silicio. En sistemas de manipulación de obleas, los contrapesos de aleación se utilizan como contrapesos para brazos robóticos o plataformas de transferencia para mantener el equilibrio dinámico y mejorar la eficiencia de la producción. También se utilizan para suprimir microvibraciones durante el funcionamiento de las máquinas de litografía y proteger los sistemas ópticos de interferencias.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación permite una distribución eficiente de la masa en un espacio limitado, optimiza el equilibrio dinámico de la plataforma litográfica y reduce el impacto de la vibración mecánica en la precisión del patrón. Su baja expansión térmica garantiza la estabilidad dimensional del bloque de equilibrio bajo el calor generado por el funcionamiento de la máquina litográfica o la diferencia de temperatura ambiente, evitando pequeñas deformaciones causadas por la tensión térmica. Su alta resistencia y tenacidad permiten que el bloque de equilibrio soporte vibraciones de alta frecuencia y tensión mecánica, previniendo fallos por fatiga. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión por productos químicos (como agentes de limpieza) en el entorno de sala limpia de la máquina litográfica, lo que la hace adecuada para un uso prolongado. Además, la aleación está optimizada para un bajo magnetismo y no interfiere con los sistemas electromagnéticos ni ópticos de la máquina litográfica.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los contrapesos de equilibrado se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y una estructura no porosa. Se utiliza mecanizado de ultraprecisión (como el micromecanizado láser o el CNC de cinco ejes) para fabricar formas complejas, con tolerancias controladas a nivel submicrónico y requisitos de acabado superficial extremadamente altos para reducir la vibración y la fricción. El tratamiento térmico optimiza las propiedades mecánicas, y los recubrimientos superficiales (como DLC o TiN) mejoran la resistencia al desgaste y la corrosión. El control de calidad requiere la verificación de la consistencia de la densidad, la uniformidad microestructural y las propiedades mecánicas, así como análisis metalográficos y pruebas de vibración para garantizar la estabilidad de los contrapesos de equilibrado en operaciones de alta frecuencia.

Desafíos técnicos y optimización : El bloque de equilibrado de la máquina de litografía presenta requisitos extremadamente altos de precisión de procesamiento, y se requieren equipos y procesos avanzados para garantizar tolerancias submicrónicas, lo que incrementa los costos de producción. La microestructura debe estar libre de defectos para evitar la amplificación de las vibraciones, y los parámetros de sinterización y tratamiento térmico deben controlarse estrictamente. El magnetismo de la aleación debe optimizarse aún más para cumplir con la extremadamente baja tolerancia de la máquina de litografía a las interferencias electromagnéticas, lo cual puede solucionarse ajustando la fórmula o

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

utilizando un tratamiento superficial no magnético.

5.4.3 Bloque de amortiguación del husillo de la máquina herramienta de alta velocidad

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente como bloque amortiguador de husillos para máquinas herramienta de alta velocidad en el sector de instrumentos de precisión gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y buena capacidad de atenuación de vibraciones. Las máquinas herramienta de alta velocidad (como máquinas herramienta CNC, rectificadoras o tornos) producen vibraciones y tensiones dinámicas significativas al funcionar a altas velocidades, lo que puede reducir la precisión del mecanizado o aumentar el desgaste de la herramienta. Los bloques amortiguadores de husillos suprimen eficazmente las vibraciones y mejoran la estabilidad del mecanizado y la calidad superficial de las máquinas herramienta al aumentar la masa y optimizar el efecto amortiguador. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro la convierten en un material ideal para bloques amortiguadores, lo que garantiza el rendimiento de las máquinas herramienta en entornos de alta velocidad y alta tensión.

Escenarios de aplicación : Los bloques amortiguadores de husillo de aleación de tungsteno-níquel-hierro se utilizan en el sistema de husillo de máquinas herramienta CNC de alta velocidad, especialmente en el campo del mecanizado de precisión, como la fabricación de piezas aeroespaciales, componentes de motores de automoción o equipos semiconductores. El bloque amortiguador se instala en el husillo o en su estructura de soporte para reducir la oscilación o resonancia del husillo cuando gira a altas velocidades (como decenas de miles de revoluciones por minuto) mediante el ajuste de la distribución de masa y la absorción de la energía de vibración. Este bloque amortiguador también se utiliza en tornos o rectificadoras de ultraprecisión para garantizar un alto acabado y precisión dimensional de la superficie mecanizada.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación permite proporcionar suficiente masa en un espacio limitado, optimizando el equilibrio dinámico del husillo y reduciendo significativamente la amplitud de la vibración. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que el bloque amortiguador no se deforme ni se fracture por fatiga bajo rotación a alta velocidad y tensión periódica, y puede soportar la carga dinámica de la operación de la máquina herramienta durante mucho tiempo. Las características de baja expansión térmica permiten que el bloque amortiguador mantenga la estabilidad dimensional bajo el calor generado por la fricción o el motor durante el procesamiento, evitando la deformación térmica que afecta la precisión del husillo. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión química por refrigerantes o lubricantes de la máquina herramienta, lo que la hace adecuada para un uso a largo plazo. Además, el ferromagnetismo débil de la aleación se ha optimizado para que no interfiera con el sistema de control electromagnético de la máquina herramienta, lo que la hace adecuada para equipos electrónicos de alta precisión.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los bloques amortiguadores de husillo se fabrican mediante pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida) combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y uniformidad microestructural para proporcionar un excelente rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de amortiguación. El mecanizado de precisión (como el CNC de cinco ejes o la electroerosión) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias controladas en el rango de micras y superficies pulidas a un alto acabado para reducir la fricción y la amplificación de la vibración. El tratamiento térmico (como el recocido) elimina las tensiones de procesamiento y mejora la tenacidad. Los tratamientos de superficie (como el niquelado químico o el recubrimiento DLC) mejoran la resistencia a la corrosión y al desgaste. El control de calidad requiere la verificación de la consistencia de la densidad, las propiedades mecánicas y la estructura libre de defectos, y las pruebas de vibración y el análisis metalográfico para garantizar la estabilidad del bloque amortiguador bajo vibración de alta frecuencia.

Desafíos técnicos y optimización : La alta densidad y dureza aumentan la dificultad del procesamiento, por lo que se requieren equipos de alta precisión y parámetros de corte optimizados para controlar los costos. La microestructura debe controlarse estrictamente para evitar poros o inclusiones que afecten el efecto de amortiguación. El magnetismo de la aleación debe optimizarse aún más para evitar interferencias con los sensores de precisión de la máquina herramienta, lo cual puede solucionarse reduciendo el contenido de hierro o utilizando recubrimientos no magnéticos.

5.4.4 Componentes de reducción de vibraciones de la plataforma óptica de precisión

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza como componente de reducción de vibraciones en plataformas ópticas de precisión para suprimir vibraciones externas o internas y garantizar una alta precisión y estabilidad de los sistemas ópticos. Estas plataformas se utilizan ampliamente en láseres, equipos de medición óptica, microscopios, máquinas de litografía de semiconductores y otros campos, y presentan requisitos extremadamente altos para el control de vibraciones, ya que pequeñas vibraciones pueden causar desalineación de los componentes ópticos o errores de medición. La alta densidad y las excelentes propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le permiten absorber y atenuar eficazmente las vibraciones, lo que la convierte en un material predilecto para componentes de reducción de vibraciones.

Escenarios de aplicación : En plataformas ópticas de precisión, se utilizan componentes de amortiguación de vibraciones de aleación de tungsteno-níquel-hierro para soportar estructuras o sistemas de aislamiento que absorben las vibraciones del suelo, del funcionamiento de los equipos o del entorno externo. Por ejemplo, en interferómetros láser o microscopios de alta resolución, se utilizan bloques de amortiguación de vibraciones de aleación para bases de plataformas o estructuras de soporte para estabilizar la posición de los componentes ópticos. En máquinas de litografía de semiconductores, se utilizan componentes de amortiguación de vibraciones para aislar plataformas y evitar que las vibraciones interfieran en la caracterización de patrones subnanométricos. Los componentes de amortiguación de vibraciones también se pueden utilizar en el sistema de soporte de telescopios astronómicos para garantizar la estabilidad del espejo en un entorno de microvibración.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación proporciona suficiente masa, mejora la inercia de la plataforma y reduce la amplitud de la transmisión de vibraciones. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que los componentes de reducción de vibraciones no se deformen ni se fatiguen bajo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

vibraciones o cargas dinámicas a largo plazo, manteniendo así la integridad estructural de la plataforma. Las características de baja expansión térmica permiten que los componentes mantengan la estabilidad dimensional bajo las diferencias de temperatura del laboratorio o el calor de operación del equipo, evitando pequeños desplazamientos causados por la tensión térmica. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión por productos químicos o la humedad en el entorno de laboratorio, lo que la hace adecuada para un uso prolongado. El ferromagnetismo débil optimizado no interferirá con el sistema electromagnético ni con los sensores de alta sensibilidad de la plataforma óptica, cumpliendo así con los requisitos de alta precisión.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los componentes amortiguadores de vibraciones se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y una microestructura uniforme que optimiza la atenuación de vibraciones. El mecanizado de ultraprecisión (como el micromecanizado láser o el CNC de cinco ejes) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias submicrónicas y superficies con pulido espejo para reducir la amplificación de las vibraciones. El tratamiento térmico optimiza las propiedades mecánicas y los recubrimientos superficiales (como TiN o DLC) mejoran la resistencia al desgaste y la corrosión. El control de calidad requiere la verificación de la uniformidad de la densidad, las propiedades mecánicas y la estructura no porosa, así como pruebas de vibración y análisis de espectro para garantizar el efecto amortiguador de vibraciones de los componentes.

Desafíos técnicos y optimización : La precisión de mecanizado de los componentes de reducción de vibraciones es extremadamente alta, por lo que se requieren equipos avanzados para garantizar tolerancias submicrónicas, lo que incrementa los costos de producción. La microestructura debe estar libre de defectos para evitar la amplificación de las vibraciones, y los parámetros de sinterización y tratamiento térmico deben controlarse estrictamente.

5.5 Otras aplicaciones de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro, con su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica, no solo se utiliza ampliamente en los sectores aeroespacial, militar, médico y de instrumentos de precisión, sino que también muestra un potencial único en las tecnologías emergentes. Gracias a su alta densidad y propiedades mecánicas, la aleación de tungsteno-níquel-hierro ha atraído gradualmente la atención en los campos de la impresión 3D y la energía. Estos campos exigen un alto rendimiento de los materiales, y la aleación de tungsteno-níquel-hierro puede ofrecer soluciones fiables para satisfacer las necesidades de fabricación compleja y entornos extremos. A continuación, se detallará su potencial de aplicación en los campos de la impresión 3D y la energía.

5.5.1 Aplicación de la tecnología de impresión 3D

La aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en la tecnología de impresión 3D (mecanizado aditivo) La fabricación se ha convertido gradualmente en un tema de gran interés en la investigación y la industria. La tecnología de impresión 3D fabrica directamente piezas de formas complejas mediante

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el apilamiento de materiales capa por capa, lo que proporciona flexibilidad para el prototipado rápido de componentes de alto rendimiento. La alta densidad y las propiedades mecánicas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro le otorgan ventajas significativas en piezas impresas en 3D que requieren alta resistencia, resistencia al desgaste y geometría compleja, especialmente para la producción de lotes pequeños y personalizada.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan para fabricar piezas complejas, como contrapesos aeroespaciales, piezas de blindaje médico y bloques de amortiguación para instrumentos de precisión, mediante tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM). En el ámbito industrial, la aleación puede utilizarse para imprimir moldes o piezas de herramientas de alta resistencia al desgaste, como insertos para moldes de inyección o piezas reforzadas para herramientas de corte. En el ámbito de la investigación científica, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro impresas en 3D se utilizan para fabricar piezas personalizadas para dispositivos experimentales, como contrapesos de alta densidad o piezas de blindaje resistentes a la radiación.

Ventajas de rendimiento: La alta densidad de la aleación satisface las necesidades de las piezas impresas en 3D para lograr una distribución de alta calidad en un espacio limitado. Esta característica es especialmente destacada en el campo de la distribución precisa del peso. Por ejemplo, en los componentes de giroscopios de equipos aeroespaciales, es necesario lograr relaciones de peso precisas en un espacio de instalación muy reducido para garantizar el funcionamiento equilibrado del equipo. La aleación se adapta perfectamente a este exigente requisito gracias a su alta densidad. En aplicaciones de blindaje en la industria nuclear, la alta densidad puede bloquear eficazmente la penetración de la radiación y proporcionar una protección fiable para los equipos y el personal. Incluso las piezas de blindaje complejas con formas especiales pueden mantener una distribución uniforme de alta densidad tras su fabricación mediante tecnología de impresión 3D, lo que garantiza la estabilidad del efecto de blindaje. Su combinación de alta resistencia y tenacidad garantiza la fiabilidad de las piezas impresas. En las piezas de transmisión de precisión de los motores de automóviles, las piezas deben soportar cargas dinámicas y tensiones mecánicas complejas durante un largo periodo de tiempo. Las piezas fabricadas con esta aleación no solo resisten impactos de alta frecuencia, sino que también mantienen su integridad estructural en condiciones de trabajo extremas, lo que previene fallos en los equipos causados por deformación o fractura desde la raíz y reduce considerablemente los costes de mantenimiento. Su baja expansión térmica permite que las piezas mantengan su estabilidad dimensional durante el proceso de impresión y los cambios de temperatura posteriores en el entorno de uso. Al imprimir soportes para sensores en hornos industriales de alta temperatura, la temperatura fluctúa drásticamente desde el estado fundido a alta temperatura durante la impresión hasta el entorno de alta temperatura continua durante el uso, y luego al proceso de enfriamiento tras el apagado. El bajo rendimiento de expansión térmica de la aleación evita desviaciones dimensionales de los componentes debido a la expansión y contracción térmica, garantiza la coordinación precisa de los sensores y otros componentes, y mantiene la precisión de los datos de detección.

Requisitos de procesamiento y calidad : La impresión 3D de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro requiere el uso de polvos mixtos de alta pureza (tungsteno, níquel, hierro) o polvos prealeados, que se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

funden capa por capa bajo un aporte de alta energía mediante SLM o EBM. El proceso de impresión debe optimizar la potencia del láser, la velocidad de escaneo y el espesor de la capa para garantizar una alta densidad y la ausencia de poros. Después de la impresión, generalmente se combina el prensado isostático en caliente (HIP) para eliminar los poros minúsculos y mejorar las propiedades mecánicas. El posprocesamiento de precisión (como el mecanizado CNC o el pulido) se utiliza para lograr una alta precisión y un acabado superficial. El control de calidad debe verificar la consistencia de la composición, la uniformidad de la densidad y la microestructura, y garantizar que las piezas impresas cumplan con los estándares aeroespaciales o médicos mediante XRF, SEM-EDS y pruebas de tracción.

Desafíos técnicos y optimización : El alto punto de fusión y la conductividad térmica del tungsteno generan grandes gradientes térmicos durante la impresión, lo que favorece la aparición de grietas o tensiones residuales. Es necesario optimizar los parámetros de impresión (como la densidad energética) para mejorar la calidad. El costo del polvo es elevado y debe reducirse mediante el reciclaje o la mejora del proceso de fabricación. El débil ferromagnetismo de la aleación debe controlarse para evitar interferencias con equipos de alta precisión, lo cual puede solucionarse ajustando la fórmula o el tratamiento superficial.

5.5.2 Potencial en el sector energético

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro han demostrado un gran potencial de aplicación en el sector energético, especialmente en entornos que requieren materiales de alta densidad, resistentes a altas temperaturas y a la corrosión, como la energía nuclear, las energías renovables y los equipos de almacenamiento de energía. Los entornos extremos del sector energético (como altas temperaturas, alta radiación o atmósferas corrosivas) imponen exigentes exigencias al rendimiento de los materiales, y las propiedades únicas de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro les permiten cumplir estos requisitos y contribuir a la eficiencia y fiabilidad de los equipos energéticos.

Escenarios de aplicación : En el campo de la energía nuclear, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan en componentes de blindaje radiológico o contrapesos de barras de control de reactores nucleares para absorber neutrones y rayos gamma y proteger equipos y personal. En el campo de las energías renovables, estas aleaciones se utilizan en contrapesos de palas de aerogeneradores para optimizar el equilibrio rotacional y mejorar la eficiencia de la generación de energía. En dispositivos de almacenamiento de energía, estas aleaciones pueden utilizarse como contrapesos para equipos de prueba de baterías o dispositivos de conversión de energía para estabilizar el funcionamiento del sistema. Además, también pueden utilizarse en la fabricación de componentes resistentes a la corrosión para pilas de combustible de alta temperatura o equipos geotérmicos.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación y el alto número atómico del tungsteno le permiten proteger eficazmente la radiación, adecuada para aplicaciones de blindaje en el campo de la energía nuclear. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que los componentes permanezcan estructuralmente estables bajo alta temperatura o tensión mecánica, adecuado para el entorno dinámico en equipos de energía. Las características de baja expansión térmica permiten que la aleación mantenga

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la estabilidad dimensional en ciclos de alta temperatura (como reactores nucleares u operaciones de celdas de combustible) y evite la deformación causada por la tensión térmica. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión por productos químicos en equipos de energía (como electrolitos ácidos o vapor de alta temperatura), extendiendo su vida útil. El ferromagnetismo débil optimizado no interferirá con el sistema electromagnético de los equipos de energía, adecuado para escenarios de control de alta precisión.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los componentes del sector energético se fabrican mediante pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida) combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y homogeneidad microestructural. El mecanizado de precisión (como la electroerosión o el corte por láser) se utiliza para producir formas complejas con tolerancias micrométricas, y la superficie debe pulirse o recubrirse para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste. El tratamiento térmico optimiza las propiedades mecánicas, y los recubrimientos superficiales (como el CVD WC o el PVD TiN) mejoran la resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. El control de calidad requiere la verificación de la densidad, la composición y la resistencia a la radiación, y la fiabilidad de los componentes se garantiza mediante análisis metalográficos, ensayos de tracción y ensayos de atenuación de la radiación.

Desafíos técnicos y optimización : En entornos de alta temperatura, la aleación debe mejorar aún más su resistencia a la oxidación y su estabilidad térmica, lo cual puede lograrse optimizando la relación níquel-hierro o añadiendo recubrimientos resistentes a altas temperaturas. El coste de procesar piezas complejas es elevado, y es necesario optimizar el proceso de fabricación (como la fabricación aditiva) para aumentar la eficiencia. Las aplicaciones de energía nuclear requieren un control estricto de las impurezas traza (como el oxígeno o el carbono) para evitar la degradación del rendimiento inducida por la radiación.

5.5.3 Pesos de los palos de golf

La aleación de tungsteno-níquel-hierro desempeña un papel importante en el campo de los pesos para palos de golf gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. En los palos de golf, una distribución precisa de la masa es fundamental para optimizar el balance del swing y mejorar la precisión y el control del golpe, y la aleación de tungsteno-níquel-hierro satisface perfectamente esta necesidad.

Su alta densidad ofrece ventajas significativas para proporcionar masa en un espacio limitado. La cabeza del palo de golf tiene una estructura delicada, y el espacio interior disponible para instalar el contrapeso es muy limitado. Los materiales tradicionales suelen requerir un gran volumen para alcanzar la masa requerida, lo que puede afectar fácilmente el diseño general y el rendimiento aerodinámico de la cabeza. La aleación de tungsteno-níquel-hierro, con su altísima densidad, proporciona suficiente masa en un volumen reducido, lo que permite a los diseñadores ajustar con flexibilidad la posición de instalación del contrapeso y optimizar con precisión la distribución del centro de gravedad del palo. Por ejemplo, añadir una pequeña pieza de contrapeso de aleación de tungsteno-níquel-hierro a la parte trasera de la cabeza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del driver puede desplazar eficazmente el centro de gravedad hacia atrás, aumentar la tolerancia al golpear la bola y ayudar a los jugadores a obtener una trayectoria más ideal incluso con un swing imperfecto. Instalar el contrapeso en la parte inferior de la cabeza del palo puede bajar el centro de gravedad, aumentar la altura de la trayectoria del golpe y permitir que la bola vuele más lejos. Esta capacidad de ajustar de forma flexible el centro de gravedad permite a los atletas de diferentes niveles encontrar el punto de equilibrio más adecuado según sus propias características de swing, mejorando así la estabilidad y la precisión del tiro.

Además, las excelentes propiedades mecánicas y la durabilidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro garantizan un funcionamiento estable del contrapeso en entornos complejos. El golf se juega principalmente al aire libre, y el palo experimenta con frecuencia impactos violentos durante el swing, colisiones accidentales contra el suelo y la exposición a diferentes condiciones climáticas. Durante el swing, el contrapeso debe soportar una gran fuerza centrífuga y un par de torsión considerables. Si la resistencia del material es insuficiente, es muy fácil que se deforme, agriete o incluso se caiga, lo que afecta directamente al rendimiento y la vida útil del palo. La aleación de tungsteno-níquel-hierro posee alta resistencia y buena tenacidad, lo que le permite soportar fácilmente estas cargas dinámicas y tensiones mecánicas, manteniendo su integridad estructural durante mucho tiempo. Incluso en días lluviosos, césped mojado y otros entornos, su excelente resistencia a la corrosión es fundamental, resistiendo eficazmente la erosión de los componentes corrosivos del vapor de agua y el suelo, evitando la oxidación y el desprendimiento de la superficie del contrapeso, y garantizando su calidad y rendimiento a largo plazo .

Para los jugadores profesionales que buscan el máximo rendimiento y un equipo de golf de alta gama, las pesas de aleación de tungsteno, níquel y hierro son una opción indispensable. Los jugadores profesionales son extremadamente sensibles a los cambios sutiles en sus swings, e incluso pequeñas variaciones en la calidad de las pesas pueden afectar su rendimiento. La alta densidad de las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro permite ajustar las pesas con precisión de gramos o incluso miligramos, cumpliendo con los requisitos de precisión de los jugadores profesionales. Al mismo tiempo, su rendimiento estable también garantiza que los palos mantengan un rendimiento constante durante entrenamientos y competiciones de alta intensidad a largo plazo, lo que ayuda a los atletas a estabilizar su rendimiento y lograr mejores resultados en el campo.

Escenarios de aplicación : Las pesas de aleación de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en cabezas de palos de golf (como hierros, maderas o putters), especialmente en palos personalizados de alta gama. Las pesas suelen estar incrustadas en la parte inferior o trasera de la cabeza del palo para ajustar la posición del centro de gravedad y optimizar el momento de inercia (MOI) del palo, mejorando así la estabilidad y la tolerancia del golpe. En los hierros, las pesas ayudan a lograr un diseño con centro de gravedad bajo, aumentan el ángulo de lanzamiento de la bola y el control de rotación; en los putters, las pesas se utilizan para mejorar la estabilidad del swing y la precisión del putt. La aleación también se puede utilizar para lastrar la varilla del palo y optimizar el equilibrio general.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación permite una distribución eficiente de la masa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en un volumen pequeño, lo que permite un ajuste más preciso del centro de gravedad del palo en comparación con materiales tradicionales como el acero o el plomo, reduciendo el volumen de la cabeza del palo y mejorando el rendimiento. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que el peso no se deforme ni se rompa durante los golpes de alta frecuencia o los impactos accidentales, lo que prolonga la vida útil del palo. Las características de baja expansión térmica permiten que el peso se mantenga dimensionalmente estable ante los cambios de temperatura exterior (como altas temperaturas en verano o bajas temperaturas en invierno), evitando que se vea afectado el rendimiento del palo. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión por la humedad del césped, la lluvia o los detergentes, lo que la hace adecuada para un uso prolongado en exteriores. Además, la aleación es no tóxica y respetuosa con el medio ambiente, cumpliendo con los requisitos de protección ambiental de los equipos de golf.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los contrapesos se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y uniformidad microestructural, lo que proporciona una distribución estable de la masa. El mecanizado de precisión (como el torneado o fresado CNC) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias controladas en el rango micrométrico, y la superficie debe pulirse hasta obtener un acabado de alta calidad para mejorar la estética y la precisión de incrustación. El tratamiento térmico (como el recocido) puede eliminar las tensiones de procesamiento y mejorar la tenacidad. El tratamiento superficial (como la galvanoplastia de Ni-P) mejora la resistencia a la corrosión y la apariencia. El control de calidad requiere la verificación de la consistencia de la densidad, las propiedades mecánicas y la ausencia de defectos en la estructura, así como el análisis metalográfico para garantizar la uniformidad y la fiabilidad de los contrapesos.

Desafíos técnicos y optimización : La alta densidad y dureza aumentan la dificultad del procesamiento, por lo que se requieren equipos de alta precisión y parámetros de corte optimizados para reducir costos. La microestructura debe controlarse estrictamente para evitar poros o inclusiones que afecten la distribución de la masa. La forma y la posición del bloque de contrapeso deben diseñarse con precisión para adaptarse a diferentes tipos de palos, y la distribución del centro de gravedad puede optimizarse mediante simulación por computadora. En el futuro, la tecnología de fabricación aditiva (como SLM) permitirá la producción de bloques de contrapeso personalizados para satisfacer las necesidades individuales y mejorar la eficiencia de la producción.

5.5.4 Kit de equilibrado de motor de competición

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan como componentes de equilibrado en motores de competición para optimizar el equilibrio dinámico del cigüeñal o del volante, reducir las vibraciones y mejorar el rendimiento y la durabilidad del motor. Los motores de competición (como los de Fórmula 1 o los de resistencia de Le Mans) deben operar a altas velocidades (hasta decenas de miles de revoluciones por minuto) y en condiciones extremas, y tienen requisitos extremadamente altos de control de vibraciones y distribución de masas. La alta densidad y las propiedades mecánicas de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro las convierten en materiales ideales para equilibrar componentes, que pueden

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mantener la estabilidad estructural durante un movimiento intenso, suprimir eficazmente la vibración, mejorar la potencia de salida y extender la vida útil del motor.

Escenarios de aplicación : Los componentes de equilibrado de aleación de tungsteno-níquel-hierro se utilizan en el cigüeñal, el volante o el sistema de pistones de los motores de competición para optimizar la distribución de masas de las piezas giratorias y reducir las vibraciones desequilibradas a altas velocidades. En los motores de F1, se integran bloques de equilibrado de aleación en el cigüeñal o el volante para corregir la inercia rotacional y garantizar un funcionamiento suave. En los vehículos de competición de resistencia, los componentes de equilibrado se utilizan para mejorar la estabilidad a largo plazo del motor y reducir los daños por fatiga en otros componentes (como el sistema de transmisión) causados por la vibración. La aleación también se puede utilizar en los componentes de contrapeso de los turbocompresores para optimizar el equilibrio dinámico de los álabes de la turbina.

Ventajas de rendimiento : La alta densidad de la aleación proporciona suficiente masa en un volumen pequeño, ajusta con precisión el equilibrio del cigüeñal o volante, reduce significativamente la amplitud de vibración a alta velocidad, reduce la pérdida de energía y aumenta la potencia. Su alta resistencia y tenacidad garantizan que los componentes de equilibrio no se deformen ni se rompan bajo la rotación de alta frecuencia y la tensión mecánica, lo que resulta adecuado para las condiciones de trabajo extremas de los motores de competición. Las características de baja expansión térmica permiten que los componentes mantengan la estabilidad dimensional en el entorno de alta temperatura del motor (como las cámaras de combustión de alta temperatura), evitando el desequilibrio causado por la tensión térmica. La resistencia a la corrosión de la aleación le permite resistir la erosión química causada por el combustible, el aceite lubricante o los gases de escape a alta temperatura, lo que prolonga su vida útil.

Requisitos de procesamiento y calidad : Los componentes equilibrados se fabrican mediante pulvimetalurgia combinada con prensado isostático en caliente para garantizar una alta densidad y una microestructura uniforme, lo que proporciona un excelente rendimiento de equilibrado dinámico. El mecanizado de ultraprecisión (como el CNC de cinco ejes o el corte por láser) se utiliza para fabricar formas complejas con tolerancias submicrónicas y superficies con pulido espejo para reducir la fricción y la amplificación de las vibraciones. El tratamiento térmico optimiza las propiedades mecánicas, y los recubrimientos superficiales (como DLC o TiN) mejoran la resistencia al desgaste y la corrosión. El control de calidad requiere la verificación de la consistencia de la densidad, las propiedades mecánicas y la estructura no porosa, así como pruebas de vibración y análisis de espectro para garantizar la estabilidad del componente a altas velocidades.

Desafíos técnicos y optimización : El coste del mecanizado de componentes de balanceo de alta precisión es elevado, por lo que es necesario optimizar el proceso para mejorar la eficiencia. La microestructura debe estar libre de defectos para evitar la amplificación de las vibraciones, y los parámetros de sinterización y tratamiento térmico deben controlarse estrictamente. Las propiedades magnéticas de la aleación deben optimizarse para cumplir con la baja tolerancia del motor a las interferencias electromagnéticas, lo cual puede solucionarse ajustando la fórmula o utilizando un tratamiento superficial no magnético.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 6 Ventajas y desventajas de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

6.1 Análisis de las ventajas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro

La aleación de tungsteno-níquel-hierro ha demostrado tener una amplia gama de aplicaciones en los sectores aeroespacial, militar, médico, de instrumentos de precisión y otros. Esta aleación combina la alta densidad y el alto punto de fusión del tungsteno con la tenacidad y la resistencia a la corrosión del níquel y el hierro, lo que le confiere importantes ventajas en diversas aplicaciones de alto rendimiento. En particular, su alta densidad y resistencia, así como sus excelentes propiedades de procesamiento, la convierten en un material ideal para numerosos componentes clave. A continuación, se analizarán en detalle las ventajas de la aleación de tungsteno-níquel-hierro en términos de alta densidad, resistencia y propiedades de procesamiento.

6.1.1 Alta densidad y resistencia

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se ha convertido en el material predilecto para numerosas aplicaciones exigentes gracias a su alta densidad y excelentes propiedades mecánicas. El alto número atómico y la alta densidad del tungsteno, combinados con el refuerzo de níquel y hierro, hacen que la aleación sea eficaz en entornos que requieren una alta distribución de masa, alta resistencia y durabilidad, siendo especialmente adecuada para contrapesos aeroespaciales, núcleos antiblindaje militares y componentes de blindaje médico.

Ventajas : La alta densidad de la aleación proporciona una masa considerable en un volumen pequeño, superior a la de materiales tradicionales como el plomo o el acero. Por ejemplo, en el sector aeroespacial, los contrapesos necesitan un ajuste preciso del centro de gravedad en espacios reducidos. La alta densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro reduce el tamaño del componente, reduce el peso total del equipo y mejora la flexibilidad de diseño. En el ámbito militar, la alta densidad de la aleación proporciona al núcleo perforante una penetración de energía cinética extremadamente alta, lo que le permite combatir eficazmente objetivos blindados. Su alta resistencia garantiza que la aleación mantenga la integridad estructural en entornos de alta tensión, como piezas de motores que giran a alta velocidad o cargas de impacto. La aleación soporta vibraciones y tensiones mecánicas sin romperse ni deformarse. Su tenacidad moderada reduce la fragilidad de la aleación al impacto, mejora la resistencia a la fatiga de los componentes y la hace adecuada para entornos hostiles y uso prolongado. Además, la baja expansión térmica de la aleación garantiza su estabilidad dimensional ante cambios de temperatura y evita la deformación causada por la tensión térmica, lo cual es especialmente importante en entornos de alta o baja temperatura.

Valor de aplicación : La combinación de alta densidad y resistencia hace que la aleación de tungsteno-níquel-hierro sea insustituible en diversos escenarios. En contrapesos aeroespaciales, la aleación optimiza el equilibrio y la estabilidad de las aeronaves; en el blindaje radiológico médico, su alta densidad absorbe eficazmente los rayos X y gamma; en núcleos antiblindaje militares, la resistencia y la densidad de la aleación garantizan una alta penetración y fiabilidad. Estas características permiten que la aleación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cumpla con los altos requisitos de material de las aplicaciones de alto rendimiento.

SopORTE técnico : Se logra alta densidad y resistencia mediante pulvimetalurgia y sinterización en fase líquida. Mediante un control preciso de la proporción de tungsteno, níquel y hierro, así como de las condiciones de sinterización, la aleación alcanza una alta densidad y una microestructura uniforme. El prensado isostático en caliente elimina aún más la porosidad y mejora la resistencia y la tenacidad. El control de calidad se verifica mediante ensayos de tracción, análisis metalográficos y otros métodos para garantizar que el rendimiento de la aleación cumpla con los estándares aeroespaciales o militares.

6.1.2 Rendimiento del procesamiento

La aleación de tungsteno-níquel-hierro ofrece otra ventaja importante. Si bien el tungsteno en sí mismo posee una alta dureza y es difícil de procesar, la adición de níquel y hierro mejora significativamente su maquinabilidad, lo que permite fabricar piezas de formas complejas mediante diversos procesos. En comparación con el tungsteno puro, la aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta una mayor adaptabilidad al mecanizado, conformado y tratamiento de superficies, satisfaciendo así las necesidades de fabricación de precisión.

Ventajas : El níquel y el hierro actúan como fases aglutinantes, lo que reduce la dureza general de la aleación y permite su conformado mediante procesos de mecanizado convencionales como torneado, fresado, taladrado y rectificado. Su moderada tenacidad reduce el riesgo de agrietamiento durante el procesamiento y es adecuada para la fabricación de piezas de alta precisión, como colimadores para dispositivos médicos o contrapesos para instrumentos de precisión. El proceso de sinterización en fase líquida confiere a la aleación una alta densidad y una microestructura uniforme tras la sinterización, lo que facilita el procesamiento posterior para alcanzar tolerancias micrométricas. La aleación también es compatible con el mecanizado por electroerosión (EDM) y el corte por láser, lo que la hace ideal para la fabricación de geometrías complejas, como bloques de equilibrio para máquinas de litografía o contrapesos para robots quirúrgicos. Además, la aleación presenta un excelente rendimiento en el tratamiento superficial y puede pulirse, niquelarse sin corriente o recubrirse con PVD para mejorar la resistencia a la corrosión y la estética, cumpliendo así con los estrictos requisitos de los sectores médico y de instrumentos de precisión. El tratamiento térmico (como el recocido) puede optimizar aún más el rendimiento del procesamiento, eliminar la tensión interna, mejorar la tenacidad y hacer que la aleación sea más fácil de terminar.

Valor de aplicación : Su excelente rendimiento de procesamiento permite que la aleación de tungsteno-níquel-hierro satisfaga diversas necesidades de fabricación. En el sector médico, la aleación puede procesarse en escudos o colimadores con formas complejas, alta precisión y superficie lisa; en el sector aeroespacial, puede fabricarse en contrapesos de alta precisión para optimizar el rendimiento de las aeronaves; en instrumentos de precisión, puede procesarse en microbloques de amortiguación o componentes de equilibrio para cumplir con los requisitos de precisión submicrónica.

SopORTE técnico : La mejora del rendimiento del procesamiento se basa en la optimización de los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procesos de pulvimetalurgia, como el control preciso de la temperatura y la atmósfera de sinterización para reducir la porosidad y las inclusiones. Los procesos de prensado isostático en caliente y tratamiento térmico mejoran aún más la maquinabilidad de la aleación. Los equipos de procesamiento avanzados garantizan una alta precisión y calidad superficial.

6.2 Limitaciones de la aleación de tungsteno, níquel y hierro

Si bien las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en los sectores aeroespacial, militar, médico y de instrumentación de precisión debido a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión, también presentan algunas limitaciones que restringen su uso en ciertos escenarios. Las limitaciones de costo y recursos, así como el impacto ambiental y en la salud, son las dos principales limitaciones de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, que afectan la sostenibilidad de su producción, procesamiento y aplicación generalizada. A continuación, se analizarán en detalle estas limitaciones y su impacto en las aplicaciones.

6.2.1 Limitaciones de costos y recursos

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro tienen un alto costo y están limitadas por la escasez de materias primas, lo que en cierta medida restringe su amplia aplicación en ciertos campos. Al ser un metal raro, su extracción, refinación y procesamiento son complejos y consumen mucha energía, lo que resulta en un costo total superior al de materiales tradicionales como el acero o el aluminio, lo que representa un desafío para aplicaciones con costos ajustados.

Limitaciones : La escasez de recursos de tungsteno es el principal factor de costos. Las reservas de mineral de tungsteno son limitadas a nivel mundial y se concentran principalmente en unos pocos países. La inestabilidad en las cadenas de suministro puede provocar fluctuaciones de precios. El refinado de tungsteno de alta pureza requiere múltiples procesos químicos y metalúrgicos, lo que incrementa el costo de las materias primas. Si bien el níquel y el hierro son más comunes, los requisitos de alta pureza (especialmente para aplicaciones médicas y aeroespaciales) incrementan aún más los costos de los materiales. Durante el proceso de producción, la pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida) y el prensado isostático en caliente (HIP) requieren equipos de alta temperatura y alta presión, lo que consume mucha energía y tiene altos costos de mantenimiento. El mecanizado de precisión (como el CNC de cinco ejes o la electroerosión) requiere herramientas de alta resistencia al desgaste (como herramientas de CBN o de diamante) debido a la alta dureza de la aleación, que presenta una baja eficiencia de procesamiento y un rápido desgaste de la herramienta, lo que resulta en mayores costos de procesamiento. Además, aunque las tecnologías emergentes como la impresión 3D han mejorado la flexibilidad de diseño, el alto costo de los polvos y equipos de aleación especiales limita las aplicaciones a gran escala.

Impacto en la aplicación : El alto costo limita el uso de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en proyectos de bajo presupuesto. Por ejemplo, en algunos sectores civiles (como la fabricación de maquinaria general), se prefieren materiales más económicos como el plomo o el acero, aunque su rendimiento no es tan bueno como el de la aleación. En los sectores aeroespacial y militar, si bien se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

priorizan los requisitos de alto rendimiento, el control de costos sigue siendo un factor importante en la planificación de proyectos. Las limitaciones de recursos también pueden generar riesgos en la cadena de suministro, especialmente cuando se restringe el comercio internacional o surgen tensiones geopolíticas, lo que afecta al suministro estable de aleaciones.

Dirección de mejora : Para reducir costos, el proceso de refinación de mineral de tungsteno puede optimizarse para optimizar el uso de recursos, por ejemplo, mediante el uso de tecnologías de beneficio más eficientes o el reciclaje de aleaciones de chatarra. Mejorar los procesos de preparación de polvo y sinterización (como la sinterización a baja temperatura) puede reducir el consumo de energía. Desarrollar tecnologías de procesamiento más eficientes (como la optimización de la fabricación aditiva) o materiales de herramientas alternativos puede reducir los costos de procesamiento. La diversificación de la cadena de suministro (como el desarrollo de nuevas fuentes minerales o la cooperación internacional) puede contribuir a aliviar la escasez de recursos y garantizar un suministro estable de materias primas.

6.2.2 Impactos ambientales y en la salud

La producción y el uso de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro conllevan ciertos impactos ambientales y para la salud. Si bien no son tóxicas y son mejores que materiales tradicionales como el plomo, es necesario prestar atención a los posibles riesgos en algunos aspectos. La extracción, el procesamiento y la eliminación de residuos de tungsteno, níquel y hierro pueden tener un impacto ambiental, y los posibles riesgos para la salud del níquel también deben gestionarse estrictamente para garantizar la seguridad de la aleación en los ámbitos médico y civil.

Limitaciones : Los procesos de extracción y refinación de tungsteno tienen un impacto significativo en el medio ambiente, incluyendo la destrucción del suelo, la contaminación del agua y el consumo de energía. En el beneficio del tungsteno se utilizan frecuentemente reactivos químicos (como agentes de flotación), lo que puede generar aguas residuales y relaves. Si no se manejan adecuadamente, contaminan el suelo y las fuentes de agua. La pulvimetalurgia y los procesos de prensado isostático en caliente requieren altas temperaturas y presiones, consumen mucha energía, generan emisiones de carbono y aumentan la carga ambiental. Los fluidos de corte y los residuos de pulido durante el proceso de procesamiento pueden liberar sustancias nocivas si no se manejan adecuadamente. El níquel, como componente de la aleación, presenta riesgos potenciales de sensibilización y toxicidad. Especialmente en el ámbito médico, el contacto prolongado o la implantación pueden causar alergias cutáneas o reacciones tisulares, aunque las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro presentan una buena biocompatibilidad general. Además, el débil ferromagnetismo de la aleación puede causar ligeras interferencias en entornos electromagnéticos de alta sensibilidad (como equipos de resonancia magnética), lo cual debe solucionarse mediante la optimización de la fórmula o el tratamiento de superficies. El reciclaje y tratamiento de aleaciones residuales requiere procesos especiales y su eliminación inadecuada puede generar desperdicio de recursos o contaminación ambiental.

Impacto de la aplicación : El impacto ambiental dificulta la aplicación de aleaciones en industrias con estrictos requisitos ambientales (como la médica o la de energías renovables). El alto consumo de energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y los costos de eliminación de residuos en el proceso de producción pueden incrementar los gastos generales y afectar la competitividad del mercado. Los posibles riesgos para la salud del níquel requieren rigurosas pruebas de biocompatibilidad en aplicaciones médicas (como implantes o instrumental quirúrgico), lo que incrementa los ciclos de desarrollo y los costos. En instrumentos de precisión altamente sensibles, el magnetismo de la aleación requiere un control especial, lo que puede limitar su uso en ciertos escenarios con altos requisitos de compatibilidad electromagnética. La gestión deficiente de residuos puede generar problemas regulatorios, especialmente en zonas con estrictas regulaciones ambientales.

Dirección de mejora : Para reducir el impacto ambiental, se puede utilizar tecnología de procesamiento de minerales verdes (como agentes de flotación no tóxicos) y sistemas de tratamiento de agua de circuito cerrado para reducir la contaminación. La optimización de los procesos de sinterización y tratamiento térmico (como el uso de energía renovable) puede reducir las emisiones de carbono. El desarrollo de una tecnología de reciclaje eficiente para promover el reciclaje de aleaciones de chatarra puede reducir el desperdicio de recursos y la carga ambiental. En términos de salud, el riesgo alérgico potencial se puede reducir reduciendo el contenido de níquel o utilizando recubrimientos biocompatibles (como DLC o TiN) para garantizar la seguridad de las aplicaciones médicas. Para problemas magnéticos, se puede optimizar la fórmula de la aleación (como reducir el contenido de hierro) o se puede desarrollar una tecnología de tratamiento de superficies no magnética para satisfacer las necesidades de equipos altamente sensibles.

6.3 Comparación entre la aleación WNiFe y otros materiales

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente en la industria aeroespacial, militar, médica y de instrumentos de precisión gracias a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Sin embargo, en comparación con otros materiales de alta densidad, presenta ventajas y desventajas en términos de rendimiento, procesabilidad y coste. Para evaluar plenamente su aplicabilidad, es necesario compararla con la aleación de tungsteno-níquel-cobre, la aleación a base de plomo y otros materiales de alta densidad para analizar sus respectivas características y escenarios de aplicación. A continuación, se detallará la comparación entre la aleación de tungsteno-níquel-hierro y estos materiales.

6.3.1 Comparación con la aleación de tungsteno-níquel-cobre

La aleación de tungsteno-níquel-cobre es otra aleación de alta densidad similar a la de tungsteno-níquel-hierro, que se utiliza a menudo en aplicaciones similares, como contrapesos aeroespaciales, piezas de blindaje médico y componentes de instrumentos de precisión. Ambas utilizan tungsteno como componente principal, complementado con níquel y cobre (o hierro) como fase de enlace. Sin embargo, debido a las diferencias en las propiedades del cobre y el hierro, la aleación de tungsteno-níquel-cobre presenta diferencias significativas con respecto a la de tungsteno-níquel-hierro en algunas propiedades.

Comparación de rendimiento : La densidad de la aleación de tungsteno-níquel-hierro (16,5-18,75 g/cm³) es comparable a la de la aleación de tungsteno-níquel-cobre (16,5-18,5 g/cm³), y ambas son adecuadas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para aplicaciones de contrapeso y blindaje de alta densidad. La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia a la tracción (800-1000 MPa) y tenacidad (elongación 10%-20%), y es adecuada para escenas con alto estrés o impacto, como núcleos de proyectiles perforantes militares. La resistencia y tenacidad de la aleación de tungsteno-níquel-cobre son ligeramente inferiores (resistencia a la tracción 700-900 MPa, elongación 5%-15%), pero sus propiedades no magnéticas (el cobre es paramagnético) la hacen más ventajosa en escenas con altos requisitos de compatibilidad electromagnética (como equipos de resonancia magnética). La aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta un ferromagnetismo débil debido a la adición de hierro, lo que puede causar ligeras interferencias en entornos electromagnéticos de alta sensibilidad. En términos de conductividad térmica, la aleación de tungsteno-níquel-cobre (120-150 W/ m·K) es ligeramente superior a la de tungsteno-níquel-hierro (100-130 W/ m·K) y es adecuada para situaciones que requieren una rápida disipación del calor. En cuanto a la resistencia a la corrosión, la aleación de tungsteno-níquel-hierro ofrece un buen rendimiento en entornos húmedos o químicos gracias a la resistencia a la oxidación del níquel, mientras que el componente de cobre de la aleación de tungsteno-níquel-cobre puede causar una ligera corrosión en ciertos entornos ácidos.

Procesamiento y costo : El rendimiento de procesamiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es superior. La fase de unión del níquel y el hierro reduce la dureza general, lo cual facilita el torneado, el fresado y la electroerosión. La maquinabilidad de la aleación de tungsteno-níquel-cobre es ligeramente inferior. Debido a la mayor ductilidad del cobre, puede causar adherencias o rebabas en la superficie mecanizada, lo que requiere una tecnología de procesamiento más precisa. En términos de costo, el hierro es más económico y abundante que el cobre, lo que reduce el costo de la materia prima de la aleación de tungsteno-níquel-hierro, pero los costos de procesamiento y control de calidad son similares.

Escenarios de aplicación : La aleación de tungsteno-níquel-hierro es adecuada para aplicaciones que requieren alta resistencia y tenacidad, como contrapesos aeroespaciales, núcleos de perforación de blindaje militar y colimadores médicos. La aleación de tungsteno-níquel-cobre es más adecuada para entornos sensibles a las interferencias electromagnéticas, como blindajes para resonancias magnéticas o contrapesos de instrumentos de precisión, y su naturaleza no magnética evita interferencias. La aleación de tungsteno-níquel-hierro es más común en el ámbito militar, mientras que la aleación de tungsteno-níquel-cobre se utiliza más ampliamente en los sectores médico y electrónico.

Resumen de ventajas y desventajas : La aleación de tungsteno-níquel-hierro ofrece ventajas en cuanto a resistencia, tenacidad y coste, y es adecuada para aplicaciones de alta tensión. Sin embargo, su débil ferromagnetismo puede limitar su uso en entornos sensibles a las interferencias electromagnéticas. Su naturaleza no magnética y su mayor conductividad térmica la hacen más ventajosa en campos específicos, pero su resistencia es ligeramente inferior y su coste es mayor.

6.3.2 Comparación con aleaciones a base de plomo

Las aleaciones a base de plomo se han utilizado desde hace tiempo en contrapesos, blindaje y ciertas aplicaciones industriales debido a su alta densidad y bajo coste. Sin embargo, en comparación con las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, las aleaciones a base de plomo presentan deficiencias significativas en cuanto a rendimiento y respeto al medio ambiente, especialmente en sectores de alta demanda como el médico y el aeroespacial.

Comparación de rendimiento : La densidad de las aleaciones a base de plomo (11,34 g/cm³) es significativamente menor que la de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro (16,5-18,75 g/cm³), lo que requiere un mayor volumen para lograr el mismo efecto de contrapeso o blindaje, lo cual no es adecuado para un diseño compacto. La resistencia a la tracción (800-1000 MPa) y la tenacidad (elongación 10%-20%) de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro superan con creces las de las aleaciones a base de plomo (resistencia a la tracción <50 MPa, baja tenacidad), lo que les permite soportar altas tensiones o impactos, haciéndolas adecuadas para núcleos perforantes de blindaje militar o contrapesos aeroespaciales. La baja resistencia y fragilidad de las aleaciones a base de plomo las hacen propensas a la deformación o fractura, lo que limita su aplicación en entornos dinámicos. El bajo coeficiente de expansión térmica de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro ($4,5-5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) es mejor que el de las aleaciones a base de plomo (aproximadamente $29 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), y mantienen su estabilidad dimensional ante cambios de temperatura. En cuanto a la resistencia a la corrosión, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se benefician de la resistencia a la oxidación del níquel, superando con creces a las aleaciones a base de plomo, que son susceptibles a la corrosión en ambientes húmedos o ácidos. En cuanto al blindaje contra la radiación, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro son superiores al plomo ($Z=82$) en la absorción de rayos X y rayos gamma debido al alto número atómico del tungsteno ($Z=74$), especialmente en ambientes de radiación de alta energía.

Procesamiento y costo : La baja dureza de las aleaciones a base de plomo las hace fáciles de procesar. Se pueden formar por fundición o procesamiento mecánico simple, y el costo es mucho menor que el de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro deben prepararse mediante pulvimetalurgia, prensado isostático en caliente y mecanizado de precisión (como CNC o EDM). El costo de procesamiento es alto, pero se pueden lograr formas complejas y alta precisión (tolerancia $\pm 0,01$ mm). Las aleaciones a base de plomo tienen baja precisión de procesamiento y mala calidad de superficie, y no son adecuadas para aplicaciones de alta precisión. En términos de protección ambiental, la toxicidad del plomo hace que esté estrictamente restringido en los campos médico y civil (como la directiva RoHS), mientras que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro no son tóxicas y son respetuosas con el medio ambiente, cumpliendo con los estándares de seguridad modernos.

Escenarios de aplicación : Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en piezas de blindaje médico, contrapesos aeroespaciales y componentes militares para cumplir con los requisitos de alto rendimiento y protección ambiental. Las aleaciones a base de plomo se utilizan principalmente en aplicaciones de bajo costo y bajos requisitos, como contrapesos industriales o blindaje de baja precisión, pero su aplicación se ha reducido gradualmente debido a las regulaciones ambientales.

Resumen de ventajas y desventajas : La aleación de tungsteno-níquel-hierro supera ampliamente a la aleación de plomo en densidad, resistencia, resistencia a la corrosión y protección ambiental, y es adecuada para aplicaciones de alto rendimiento, pero su costo es relativamente alto. La aleación de plomo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tiene un bajo costo y un procesamiento sencillo, pero su rendimiento y protección ambiental son insuficientes, por lo que está siendo reemplazada gradualmente por la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

6.3.3 Comparación con otros materiales de alta densidad

Además de las aleaciones de WNiCu y Pb, el WNiFe también debe compararse con otros materiales de alta densidad, como los compuestos de W, las aleaciones de uranio y las cerámicas de alta densidad, para evaluar su competitividad en aplicaciones específicas. Estos materiales presentan características propias en términos de densidad, rendimiento y coste.

Comparación de rendimiento : Los materiales compuestos a base de tungsteno (como los compuestos de tungsteno-polímero) tienen una densidad menor ($10-15 \text{ g/cm}^3$) que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro ($16,5-18,75 \text{ g/cm}^3$), y sus efectos de blindaje y contrapeso son más débiles, pero son ligeros y adecuados para aplicaciones que no requieren alta densidad. La resistencia ($800-1000 \text{ MPa}$) y la tenacidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro son mejores que las de los compuestos de tungsteno-polímero, y son adecuados para escenarios de alta tensión. Las aleaciones de uranio empobrecido (densidad de aproximadamente 19 g/cm^3) tienen una densidad ligeramente mayor que las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, tienen una fuerte penetración y se utilizan a menudo en núcleos de perforación de blindaje militar, pero su radiactividad y toxicidad limitan estrictamente sus aplicaciones, y se requiere una protección especial para su procesamiento.

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro no son radiactivas y son adecuadas para los campos médico y civil. Las cerámicas de alta densidad (como el carburo de tungsteno, con una densidad de aproximadamente $15,6 \text{ g/cm}^3$) tienen una dureza extremadamente alta, pero baja tenacidad y son propensas a la fractura por fragilidad, lo que las hace adecuadas para recubrimientos resistentes al desgaste en lugar de componentes principales. La tenacidad (elongación del 10%-20%) y la procesabilidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro son mejores que las de las cerámicas, y son adecuadas para piezas con formas complejas. En términos de conductividad térmica y resistencia a la corrosión, la aleación de tungsteno-níquel-hierro ($100-130 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) es superior a los compuestos y cerámicas de tungsteno-polímero, pero es ligeramente inferior al tungsteno puro ($173 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$) a altas temperaturas.

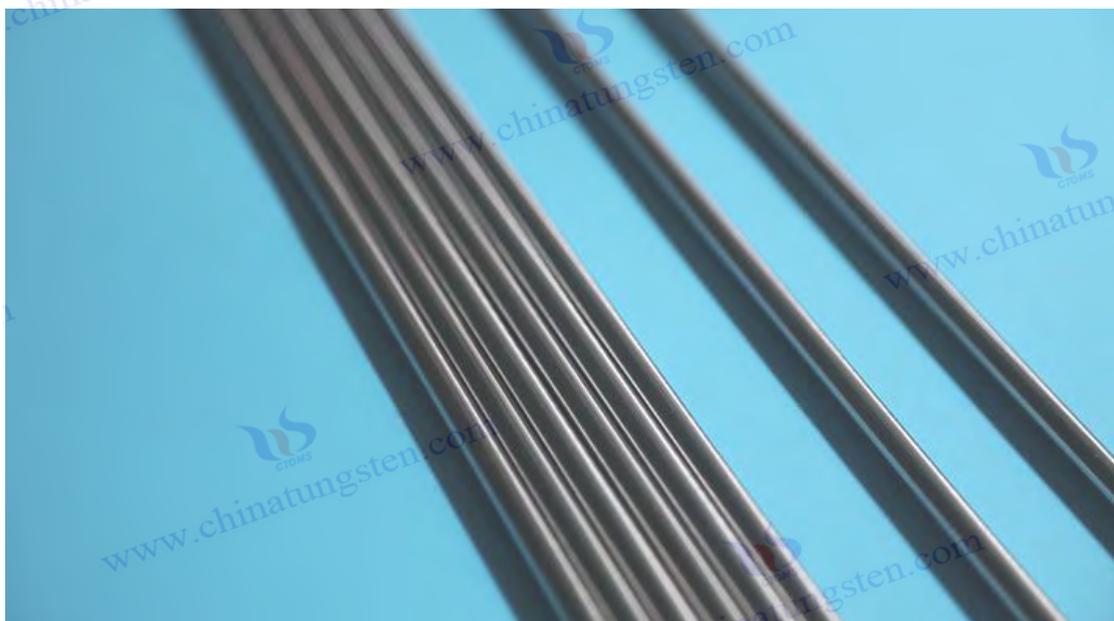
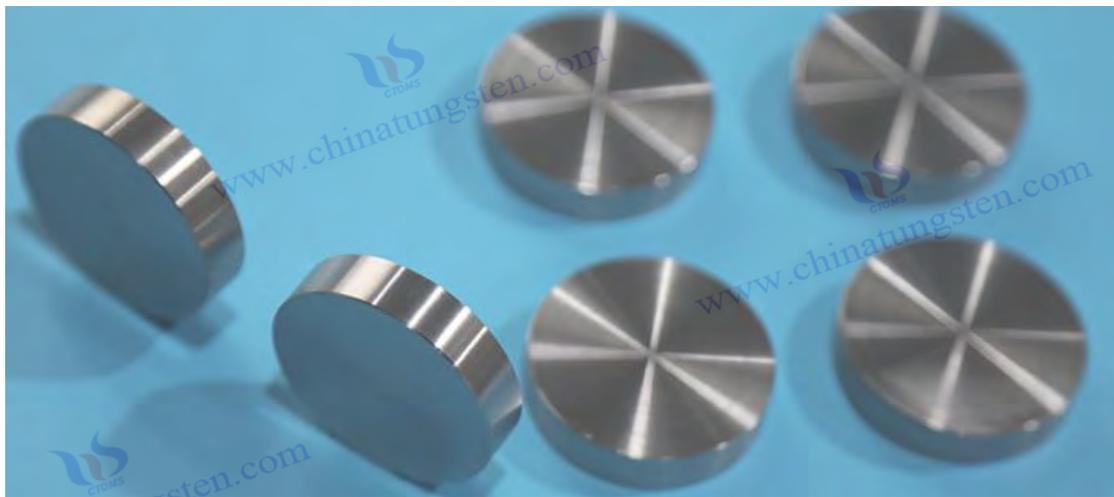
Procesamiento y costo : La aleación de tungsteno-níquel-hierro se forma mediante pulvimetalurgia y mecanizado de precisión. Su costo de procesamiento es mayor que el del compuesto de tungsteno-polímero (que se puede moldear por inyección), pero menor que el del tungsteno puro (de alta dureza y difícil de procesar). El procesamiento de aleaciones de uranio empobrecido requiere equipos especiales y medidas de protección, y los costos y riesgos de seguridad son extremadamente altos. La sinterización y el procesamiento de cerámicas de alta densidad (como el rectificado con diamante) son costosos y de forma limitada.

Escenarios de aplicación : La aleación de tungsteno-níquel-hierro es adecuada para contrapesos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aeroespaciales, blindaje médico y componentes militares, considerando tanto el rendimiento como la procesabilidad. Los compuestos de tungsteno-polímero se utilizan para blindaje ligero o entornos de baja tensión; las aleaciones de uranio empobrecido se limitan a aplicaciones militares especiales; y las cerámicas de alta densidad se emplean para recubrimientos o herramientas resistentes al desgaste. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro logran un equilibrio entre rendimiento, protección ambiental y procesabilidad, y ofrecen una gama más amplia de aplicaciones.

Resumen de ventajas y desventajas : La aleación de tungsteno-níquel-hierro es superior a los compuestos de tungsteno-polímero y a la cerámica en términos de densidad, resistencia y procesabilidad, y es más ecológica que la aleación de uranio empobrecido. Sin embargo, puede ser reemplazada por otros materiales en situaciones específicas (como resistencia extrema al desgaste o densidad ultraalta). Su rendimiento integral la hace más competitiva en el sector de alto rendimiento.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 7 Impacto de la producción y el uso de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro en el medio ambiente

7.1 Impacto ambiental durante la producción

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro implican múltiples procesos, como la extracción de materias primas, el refinado, la pulvimetalurgia, el procesamiento y el tratamiento de superficies, que tienen un cierto impacto ambiental. Si bien estas aleaciones presentan ventajas ambientales en comparación con materiales tradicionales como las aleaciones a base de plomo, su proceso de producción aún presenta problemas ambientales como el consumo de recursos, el uso de energía y las emisiones de residuos, que pueden tener impactos potenciales en el suelo, el agua y la atmósfera. Debido a la demanda de aplicaciones de alto rendimiento (como la industria aeroespacial, militar, médica y de instrumentos de precisión), la optimización de los procesos de producción para reducir el impacto ambiental se ha convertido en un foco de atención de la industria. A continuación, se analizará en detalle el impacto ambiental de la producción de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro en términos de extracción de recursos, consumo de energía, residuos y emisiones.

7.1.1 Extracción de recursos y consumo de energía

Las aleaciones de tungsteno, níquel y hierro dependen de la extracción y refinación de metales como el tungsteno, el níquel y el hierro. Estos procesos consumen una gran cantidad de recursos y energía, y conllevan posibles impactos ambientales. Al ser un metal raro, la extracción y el procesamiento del tungsteno son complejos y consumen mucha energía, mientras que la extracción de níquel y hierro también conlleva perturbaciones ambientales, lo que provoca daños al suelo y cambios en los ecosistemas.

Impacto ambiental : La minería de tungsteno se concentra principalmente en unos pocos países (como China y Rusia), utilizando principalmente métodos de minería a cielo abierto o subterránea. El proceso minero destruye la vegetación superficial, causando erosión y degradación del suelo, lo que puede afectar el ecosistema local. El beneficio del tungsteno requiere el uso de grandes cantidades de agua y reactivos químicos (como agentes de flotación, incluyendo sulfuros o compuestos orgánicos). Si las aguas residuales no se tratan adecuadamente, pueden contaminar las aguas superficiales o subterráneas. La minería de níquel (como el sulfuro de níquel o el mineral de níquel laterítico) también implica la excavación de tierras y la destrucción de la vegetación, y el proceso de fundición del níquel requiere fundición a alta temperatura, alto consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. La minería de mineral de hierro es a gran escala, acompañada de acumulación de relaves y consumo de recursos hídricos, lo que puede conducir a la eutrofización o contaminación de los cuerpos de agua por metales pesados. La producción de aleación de tungsteno, níquel y hierro adopta la metalurgia de polvos. La sinterización en fase líquida (1450-1550 °C) y el prensado isostático en caliente (HIP, 1200-1400 °C, 100-200 MPa) requieren equipos de alta temperatura y alta presión, consumen mucha electricidad o gas natural y aumentan las emisiones de carbono. Además, la preparación de polvos de aleación (como la atomización) requiere equipos de alto consumo energético, lo que incrementa aún más el consumo energético. El consumo energético de estos procesos depende principalmente de combustibles fósiles, lo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que genera una alta huella de carbono.

Evaluación de impacto : Las actividades mineras pueden ocasionar ocupación de tierras y daños ecológicos, especialmente en zonas ecológicamente sensibles, lo que requiere estrictas medidas de restauración ambiental. Si las aguas residuales del procesamiento de minerales no se tratan, pueden verter metales pesados (como tungsteno y níquel) o reactivos químicos en el cuerpo de agua, lo que afecta al ecosistema acuático. En términos de consumo energético, la demanda de electricidad para la sinterización y el prensado isostático en caliente puede representar más del 50 % del consumo energético total de la producción, lo que aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente en zonas que dependen de la generación de energía a partir de carbón. Los recursos mundiales de tungsteno son limitados y la sobreexplotación puede provocar su agotamiento y afectar la sostenibilidad a largo plazo.

Dirección de mejora : La adopción de tecnologías de procesamiento de minerales ecológicos (como agentes de flotación no tóxicos o procesamiento de minerales en seco) puede reducir la contaminación por aguas residuales y el uso de productos químicos. La optimización de los procesos mineros (como la voladura de precisión) puede reducir los daños al suelo. La eficiencia energética puede mejorarse mediante el uso de energías renovables (como la eólica o la solar) o la mejora de los procesos de sinterización (como la sinterización a baja temperatura). El reciclaje de aleaciones de desecho (como contrapesos aeroespaciales o piezas de blindaje médico) puede reducir la demanda de tungsteno y níquel primarios y aliviar la presión sobre los recursos. El fortalecimiento de la gestión de la cadena de suministro y la diversificación de las fuentes de mineral de tungsteno pueden reducir los riesgos ambientales y económicos derivados de la escasez de recursos.

7.1.2 Residuos y emisiones

La aleación de tungsteno-níquel-hierro genera diversos residuos y emisiones, como residuos sólidos, aguas residuales, gases residuales y subproductos del procesamiento. Si estos residuos no se gestionan adecuadamente, pueden contaminar el suelo, el agua y el aire, afectando el medio ambiente y la salud humana. Si bien la aleación en sí no es tóxica, su proceso de producción requiere un estricto control para cumplir con la normativa ambiental.

Impacto ambiental : Durante la etapa de beneficio, los relaves de minerales de tungsteno y níquel contienen metales pesados (como tungsteno, níquel y hierro) y otras impurezas que, si no se apilan correctamente, pueden filtrarse al suelo o a los cuerpos de agua, causando contaminación a largo plazo. Durante el proceso de pulvimetalurgia, la sinterización y el prensado isostático en caliente pueden producir gases residuales como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno (NOx) o compuestos orgánicos volátiles (COV), que pueden contaminar el aire si no se tratan mediante filtración o adsorción. Las etapas de procesamiento (como el torneado, el fresado o el rectificado) generan virutas metálicas, residuos de fluido de corte y residuos de pulido. Los aceites o aditivos químicos presentes en el fluido de corte pueden contaminar los cuerpos de agua o el suelo. El tratamiento de superficies (como la galvanoplastia o la limpieza química) produce líquidos residuales que contienen níquel o sustancias ácidas, que pueden contaminar los cuerpos de agua o liberar gases tóxicos si no se tratan adecuadamente. La posible

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alergenicidad del níquel exige la adopción de medidas de protección durante la producción y el procesamiento para evitar riesgos para la salud derivados del contacto con polvo o líquidos residuales. Además, el reciclaje de piezas de aleación de desecho (como colimadores médicos o núcleos de balas militares) puede generar desperdicio de recursos o contaminación por metales pesados si no está estandarizado.

Evaluación de Impacto : Si los relaves y las aguas residuales no se tratan, pueden generar un exceso de metales pesados en el suelo o la contaminación del agua, lo que afecta a la agricultura y los ecosistemas. Las emisiones de gases residuales aumentan la contaminación atmosférica, especialmente en zonas de alta producción, lo que puede agravar el smog regional o el efecto invernadero. Si los residuos de procesamiento y los líquidos residuales se desechan indiscriminadamente, pueden contaminar las aguas subterráneas o liberar sustancias nocivas, lo que afecta la salud de los residentes de la zona. El tratamiento inadecuado del polvo de níquel o de los líquidos residuales puede causar riesgos para la salud ocupacional, como alergias cutáneas o irritación respiratoria. La baja tasa de reciclaje de las aleaciones de chatarra puede agravar el desperdicio de recursos y aumentar la carga ambiental.

Dirección de mejora : El uso de sistemas de tratamiento de agua de circuito cerrado (como la precipitación por neutralización o la filtración por membrana) puede tratar eficazmente las aguas residuales del procesamiento de minerales y los líquidos residuales de galvanoplastia, reduciendo así las emisiones de metales pesados. Los relaves pueden tratarse mediante solidificación o relleno para evitar la contaminación por fugas. El gas residual puede tratarse con filtros de alta eficiencia o convertidores catalíticos para reducir las emisiones de NOx y COV. Los residuos del procesamiento pueden reciclarse y reutilizarse mediante clasificación (como el retorno de virutas metálicas al horno) para reducir los residuos. Fortalecer el sistema de reciclaje de aleaciones residuales y desarrollar tecnologías de separación eficientes (como la disolución química o la electrólisis) para aumentar la tasa de recuperación de tungsteno y níquel. Se pueden utilizar fluidos de corte ecológicos o procesamiento en seco en el proceso de producción para reducir la generación de líquidos residuales. En vista de los riesgos para la salud que presenta el níquel, es necesario reforzar las medidas de protección (como las operaciones cerradas y el equipo de protección) para reducir el riesgo de exposición de los trabajadores. El cumplimiento de las normas ambientales internacionales (como la ISO 14001) puede estandarizar aún más la producción y reducir el impacto ambiental.

7.2 Tecnología de fabricación ecológica

El desarrollo sostenible de la producción de tungsteno-níquel-hierro se basa en la optimización de los procesos de producción, la reducción del consumo de recursos y la disminución de la contaminación ambiental. El tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente en los sectores aeroespacial, militar, médico y de instrumentos de precisión debido a su alta densidad, excelentes propiedades mecánicas y resistencia a la corrosión. Sin embargo, su proceso de producción implica un alto consumo de energía y una posible contaminación ambiental. La tecnología de fabricación ecológica reduce el consumo de energía, las emisiones de residuos y el impacto ambiental mediante métodos de preparación respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de ahorro energético, a la vez que mejora la eficiencia de la producción y los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

beneficios económicos. A continuación, se detallará la aplicación de métodos de preparación respetuosos con el medio ambiente y tecnologías de ahorro energético en la producción de tungsteno-níquel-hierro.

7.2.1 Método de preparación respetuoso con el medio ambiente

Los métodos de preparación respetuosos con el medio ambiente reducen el impacto ambiental al optimizar el procesamiento de la materia prima, la producción de aleaciones y los procesos de posprocesamiento. En la etapa de procesamiento de la materia prima, se emplean tecnologías eficientes de cribado y purificación para eliminar los ácidos y álcalis fuertes, utilizados en grandes cantidades en los procesos tradicionales, y en su lugar se utiliza la clasificación física combinada con la lixiviación biológica para extraer tungsteno, níquel, hierro y otras materias primas. Esto no solo reduce la contaminación química, sino que también mejora el aprovechamiento de la materia prima y reduce el desperdicio de recursos.

La tecnología de fundición ecológica se introduce en el proceso de producción de aleaciones. Mediante un control preciso de la temperatura, la atmósfera y la proporción de material en el horno, se logra un uso eficiente de la energía y se reducen las emisiones de carbono causadas por el consumo de combustible. Al mismo tiempo, se utiliza un sistema de circulación de circuito cerrado para purificar los gases residuales generados durante el proceso de producción y reutilizarlos. La escoria residual se tritura y muele para luego reutilizarse como material auxiliar en la producción, lo que reduce considerablemente la cantidad de residuos generados.

En el proceso de postratamiento, se utilizan agentes de limpieza ecológicos en sustitución de los agentes de limpieza tradicionales que contienen fósforo y metales pesados, garantizando al mismo tiempo la limpieza de la superficie de la aleación y evitando la contaminación del suelo y los cuerpos de agua por aguas residuales. Estos métodos permiten mantener el alto rendimiento de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, a la vez que reducen el uso de productos químicos, la generación de residuos y las emisiones contaminantes.

Este método de preparación que tiene en cuenta tanto la protección del medio ambiente como el rendimiento le permite satisfacer las necesidades de campos como el aeroespacial y la atención médica que tienen requisitos extremadamente altos en cuanto a rendimiento del material y protección del medio ambiente, sentando una base sólida para la aplicación sostenible de la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

Tecnología de preparación respetuosa con el medio ambiente :

- **Tecnología de beneficio verde** : El beneficio tradicional de minerales de tungsteno y níquel utiliza agentes de flotación orgánicos o con azufre, que tienden a generar aguas residuales nocivas. El beneficio verde utiliza agentes de flotación no tóxicos o de baja toxicidad (como ácidos grasos o reactivos de origen biológico) para reducir los metales pesados y los contaminantes químicos en las aguas residuales. El beneficio seco (como la separación por flujo de aire) puede reducir el consumo de recursos hídricos y la carga del tratamiento de aguas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residuales. El sistema de tratamiento de agua de circuito cerrado recupera iones metálicos en las aguas residuales del beneficio mediante neutralización, precipitación o filtración por membrana para prevenir la contaminación del agua.

- **Preparación eficiente de polvo** : La aleación de tungsteno-níquel-hierro se produce mediante pulvimetalurgia, y la preparación del polvo se realiza mediante atomización o aleación mecánica. La tecnología de atomización, respetuosa con el medio ambiente, utiliza gas inerte (como argón) en lugar de aire para reducir las inclusiones de óxido y el consumo de energía para la purificación posterior. La aleación mecánica prepara el polvo de aleación mediante molienda de bolas de alta energía, lo que reduce el uso de reactivos químicos y mejora la tasa de utilización de las materias primas. El sistema de recuperación de polvo residual puede recolectar y reciclar el polvo durante la producción para reducir el desperdicio de recursos.
- **Proceso de sinterización ecológica** : La sinterización en fase líquida (1450-1550 °C) es el paso fundamental en la producción de aleaciones. El proceso tradicional utiliza combustibles fósiles para el calentamiento, lo que genera importantes emisiones de carbono. La sinterización ecológica utiliza la sinterización por plasma (SPS) o por microondas, que calienta de forma rápida y localizada, reduciendo así la pérdida de calor y las emisiones de escape. El uso de energía limpia (como la solar o la eólica) para alimentar el sistema puede reducir aún más la huella de carbono. La optimización de la atmósfera de sinterización (como el argón de alta pureza) reduce la generación de óxido y la necesidad de tratamiento de gases de escape.
- **Posprocesamiento ecológico** : El procesamiento mecánico y el tratamiento de superficies (como la galvanoplastia o la limpieza química) suelen generar líquidos y materiales residuales. El procesamiento ecológico utiliza fluidos de corte en seco o fluidos de corte ecológicos (como fluidos de corte a base de agua o de origen biológico) para reducir el vertido de líquidos residuales nocivos. El líquido residual de la galvanoplastia se trata mediante intercambio iónico o tecnología de recuperación electroquímica para recuperar níquel u otros metales y reducir la contaminación ambiental. El pulido de superficies puede realizarse mediante pulido láser o ultrasónico para sustituir el pulido químico tradicional y reducir el uso de reactivos químicos.

Beneficios ambientales : El procesamiento de minerales ecológicos reduce los metales pesados y los contaminantes químicos en las aguas residuales, protegiendo así los cuerpos de agua y el suelo. La preparación eficiente del polvo y el reciclaje de residuos de polvo mejoran el aprovechamiento de los recursos y reducen la demanda de minerales primarios de tungsteno y níquel. El proceso de sinterización ecológica reduce las emisiones de carbono y los gases residuales, mejorando así la calidad del aire. El posprocesamiento ecológico reduce los líquidos residuales y la contaminación por residuos, y mejora la sostenibilidad del proceso de producción.

Desafíos técnicos y optimización : La tecnología de preparación ecológica debe equilibrar rendimiento y coste. La inversión inicial en agentes de flotación ecológicos y equipos de energía limpia es elevada, y es necesario reducir los costes mediante la producción a gran escala, como el establecimiento de líneas de producción conjuntas a gran escala para compartir recursos y costes. La sinterización ecológica (como la SPS) requiere equipos de alta precisión y la optimización de los parámetros del proceso para garantizar la densidad de la aleación y la uniformidad de la microestructura. Los modelos de optimización de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetros se pueden construir con la ayuda de múltiples conjuntos de datos experimentales. El sistema de recuperación de líquidos residuales debe funcionar eficientemente y estar equipado con dispositivos de monitorización en tiempo real para evitar la contaminación secundaria y mejorar el reciclaje de recursos. En el futuro, el desarrollo de reactivos ecológicos de bajo coste y sistemas inteligentes de control de la producción puede mejorar aún más la eficiencia y la viabilidad de la preparación ecológica y promover el desarrollo sostenible de la industria.

7.2.2 Tecnologías de ahorro de energía

de energía y emisiones de carbono en la fabricación de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro mediante la optimización del uso de energía en el proceso de producción. La producción de aleaciones implica un alto consumo de energía (como la sinterización, el prensado isostático en caliente y el mecanizado). La aplicación de tecnologías de ahorro energético no solo reduce el impacto ambiental, sino que también reduce los costos de producción y mejora la competitividad económica.

Tecnología de ahorro de energía :

- **Tecnología de sinterización de alta eficiencia** : La sinterización tradicional en fase líquida utiliza hornos de resistencia o de gas, que consumen mucha energía y tienen una baja eficiencia térmica. Las tecnologías de sinterización rápida, como la sinterización por plasma de chispa (SPS) o la sinterización por microondas, calientan el polvo directamente mediante campos eléctricos de alta frecuencia o microondas, acortando el tiempo de calentamiento a unos pocos minutos y reduciendo el consumo de energía entre un 30 % y un 50 % en comparación con la sinterización tradicional (varias horas). La tecnología de sinterización a baja temperatura reduce la temperatura de sinterización a 1300-1400 °C optimizando el tamaño de las partículas del polvo y los aditivos (como el polvo de nanoníquel), lo que reduce el consumo de energía.
- **Optimización del prensado isostático en caliente** : El prensado isostático en caliente (HIP) se utiliza para aumentar la densidad de las aleaciones. Los procesos tradicionales requieren altas temperaturas y presiones (1200-1400 °C, 100-200 MPa), lo que consume mucha energía. El HIP de bajo consumo utiliza materiales aislantes eficientes y un control preciso de la presión para reducir la pérdida de calor y el consumo de energía. Los procesos HIP intermitentes pueden reducir el consumo energético al optimizar el ciclo de presurización, acortando así el tiempo de funcionamiento. El uso de energías renovables (como la eólica o la solar) para alimentar los equipos HIP puede reducir aún más las emisiones de carbono.
- **Tecnología de procesamiento inteligente** : El procesamiento mecánico (como el torneado y el fresado) consume mucha energía debido a la alta dureza de la aleación (dureza Vickers de 350-400 HV). El sistema de procesamiento inteligente monitoriza la fuerza y la temperatura de corte en tiempo real y ajusta dinámicamente los parámetros de corte (como la velocidad y el avance) para mejorar la eficiencia del procesamiento y reducir el consumo energético. La tecnología de procesamiento en seco o lubricación por cantidad mínima (MQL) reduce el uso de fluido de corte y el consumo energético de refrigeración y tratamiento de fluidos residuales. El láser o la electroerosión permiten lograr un micromecanizado de alta precisión, reducir el desperdicio de material y el consumo energético del procesamiento secundario.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- **Recuperación y gestión de energía** : Un sistema de recuperación de calor residual puede utilizarse en el proceso de producción para aprovechar el calor residual del horno de sinterización o del equipo HIP para precalentar las materias primas o la calefacción de la fábrica, reduciendo así el desperdicio de energía. El sistema inteligente de gestión de energía optimiza el tiempo de funcionamiento del equipo mediante sensores y análisis de datos para evitar el funcionamiento en vacío. Las auditorías energéticas a nivel de fábrica permiten identificar los componentes de alto consumo energético y formular medidas específicas de ahorro energético.

Beneficios ambientales : Las tecnologías de sinterización de alta eficiencia y prensado isostático en caliente reducen significativamente el consumo de electricidad y gas, así como las emisiones de gases de efecto invernadero. Las tecnologías de procesamiento inteligente mejoran el aprovechamiento de los materiales, reducen la generación de residuos y el consumo energético del tratamiento de estos. Los sistemas de recuperación de energía mejoran la eficiencia energética general y reducen la huella de carbono del proceso de producción. Estas tecnologías hacen que la producción de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro sea más acorde con las normativas ambientales (como la ISO 14001) y los objetivos de desarrollo sostenible.

Desafíos técnicos y optimización : El coste de inversión en equipos para tecnologías de ahorro energético es elevado. Por ejemplo, los sistemas de procesamiento inteligente (SPS) y los sistemas de procesamiento inteligente requieren equipos de alta precisión, y el coste debe reducirse mediante la producción a gran escala. La sinterización a baja temperatura puede afectar las propiedades de la aleación, por lo que es necesario optimizar la fórmula y los parámetros del proceso para garantizar la resistencia y la densidad. La eficiencia del sistema de recuperación de energía está limitada por el diseño del equipo, por lo que es necesario desarrollar una tecnología de intercambio de calor más eficiente. En el futuro, la combinación de inteligencia artificial e internet de las cosas (IoT) permitirá optimizar el proceso de producción en tiempo real, reduciendo aún más el consumo energético y el impacto ambiental.

7.3 Reciclaje y reutilización

El reciclaje y la reutilización son eslabones importantes en la fabricación ecológica de aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, que pueden reducir significativamente la dependencia de recursos escasos, reducir la contaminación ambiental y los costos de producción. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se utilizan ampliamente en la industria aeroespacial, militar, médica y de instrumentos de precisión debido a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción de 800-1000 MPa) y resistencia a la corrosión. Sin embargo, la escasez de recursos de tungsteno y el alto consumo energético del proceso de producción hacen del reciclaje y la reutilización la clave para lograr un desarrollo sostenible.

7.3.1 Tecnología de recuperación de aleaciones

La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene como objetivo separar y reutilizar metales como el tungsteno, el níquel y el hierro de piezas de desecho, residuos de procesamiento o subproductos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producción para reducir la demanda de materias primas y la contaminación ambiental. El proceso de reciclaje implica una combinación de tecnologías físicas, químicas y metalúrgicas para garantizar que la pureza y las propiedades de los materiales reciclados cumplan con los requisitos de aplicaciones de alto rendimiento (como contrapesos aeroespaciales o piezas de blindaje médico).

Tecnología de reciclaje :

- **Reciclaje físico y clasificación** : Las piezas de desecho de aleación de tungsteno, níquel y hierro (como contrapesos aeroespaciales, colimadores médicos o núcleos de proyectiles militares) se procesan primero mediante trituración y molienda mecánica para producir pequeñas partículas o polvos. Se utilizan técnicas de clasificación (como la separación magnética o la separación por gravedad) para separar el metal de las impurezas no metálicas en la aleación. La separación magnética permite separar el hierro y el níquel aprovechando las débiles propiedades ferromagnéticas de la aleación, mientras que las partículas de tungsteno de alta densidad se pueden extraer por separación por gravedad. Los residuos de procesamiento (como los recortes o el polvo de molienda) se tamizan y se lavan para eliminar los fluidos o aceites de corte, lo que proporciona materias primas limpias para el procesamiento posterior.
- **Recuperación química** : La recuperación química separa el tungsteno, el níquel y el hierro de las aleaciones mediante procesos de disolución ácida o alcalina. Por ejemplo, las soluciones de ácido nítrico o ácido clorhídrico pueden disolver el níquel y el hierro, dejando óxido de tungsteno (WO_3) o tungstato, que posteriormente puede convertirse en polvo de tungsteno de alta pureza mediante un proceso de reducción (como la reducción con hidrógeno). El níquel y el hierro pueden recuperarse de la solución mediante deposición electroquímica o precipitación química para producir sales o polvos metálicos de alta pureza. La recuperación química requiere un control estricto del pH de la solución y de las condiciones de reacción para evitar la contaminación secundaria.
- **Recuperación metalúrgica** : Las técnicas metalúrgicas de alta temperatura (como la fusión en horno de arco o la fusión al vacío) permiten fundir directamente la aleación de chatarra y separar el tungsteno, el níquel y el hierro. La fusión al vacío se realiza en una atmósfera inerte (como argón) para reducir la formación de óxido y mejorar la pureza del metal recuperado. El polvo metálico recuperado puede realzarse mediante pulvimetalurgia (sinterización en fase líquida, 1450-1550 °C) para garantizar que las propiedades (como una densidad >99,5 %) cumplan con los estándares. El prensado isostático en caliente (HIP, 1200-1400 °C, 100-200 MPa) puede mejorar aún más la homogeneidad microestructural de la aleación recuperada.
- **Tecnologías avanzadas de reciclaje** : Tecnologías emergentes como el tratamiento con plasma y el reciclaje electroquímico pueden mejorar la eficiencia del reciclaje. El tratamiento con plasma utiliza un arco de plasma de alta temperatura para descomponer aleaciones, separar rápidamente los componentes metálicos y reducir el uso de reactivos químicos. El reciclaje electroquímico separa el tungsteno, el níquel y el hierro mediante electrólisis, lo que reduce el consumo de energía y la generación de residuos. Estas tecnologías son adecuadas para procesar piezas de desecho de formas complejas o aplicaciones con requisitos de alta pureza.

Beneficios ambientales y económicos : El reciclaje físico reduce la acumulación de residuos y el riesgo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de contaminación del suelo y el agua. El reciclaje químico y metalúrgico aumenta la tasa de recuperación de tungsteno y níquel (hasta más del 90%), reduce la extracción de minerales primarios y protege los recursos naturales. La tecnología avanzada de reciclaje reduce el consumo de energía y las emisiones de residuos, y cumple con las normativas ambientales (como la ISO 14001). En términos económicos, el reciclaje reduce los costos de las materias primas (el tungsteno representa entre el 60 % y el 70 % del costo de la aleación) y mejora la eficiencia de la producción.

Desafíos técnicos y optimización : El proceso de reciclaje debe garantizar la pureza del metal, y las impurezas (como el oxígeno y el carbono) deben eliminarse mediante procesos de filtración y refinación en múltiples etapas para evitar que afecten las propiedades de la aleación. El reciclaje químico puede producir líquidos residuales ácidos, lo que requiere un sistema eficiente de tratamiento de líquidos residuales (como intercambio iónico o neutralización), combinado con monitoreo de pH en línea y control preciso para prevenir la contaminación. El reciclaje de componentes complejos (como piezas de blindaje médico) requiere una tecnología de clasificación eficiente, que utiliza reconocimiento espectral para separar rápidamente las aleaciones de otros materiales. En el futuro, el desarrollo de equipos de reciclaje automatizados y sistemas de clasificación inteligentes puede mejorar la eficiencia y reducir los costos laborales. Optimizar los procesos de reciclaje químico (como el uso de solventes verdes) y combinarlos con dispositivos de reciclaje puede reducir aún más el impacto ambiental y mejorar la eficiencia económica del reciclaje.

7.3.2 Roles en la economía circular

La aleación de tungsteno-níquel-hierro desempeña un papel importante en la economía circular. Mediante el reciclaje, la reutilización y la circulación de recursos, reduce el desperdicio de recursos, la contaminación ambiental y los costos de producción, y promueve el desarrollo sostenible. La economía circular prioriza el uso eficiente de los recursos y la gestión de circuito cerrado. El reciclaje y la reutilización de la aleación de tungsteno-níquel-hierro pueden transformarla de un recurso de un solo uso a un recurso sostenible y cíclico, impulsando el desarrollo verde en los sectores aeroespacial, médico y otros.

Papel de la economía circular :

- **Reciclaje de recursos :** El alto valor de la aleación de tungsteno, níquel y hierro (debido a su escasez y alto costo) la convierte en un candidato ideal para la economía circular. Las piezas de aleación desechadas (como contrapesos de aviación, núcleos de balas militares o colimadores médicos) se convierten en tungsteno, níquel y hierro de alta pureza mediante tecnología de reciclaje, y luego se utilizan para producir nuevas aleaciones, reduciendo así la dependencia del mineral de tungsteno y níquel primarios. Unas tasas de reciclaje más altas pueden reducir significativamente el daño al suelo y la contaminación del agua causados por la minería de recursos.
- **Minimización de residuos :** Las tecnologías de reciclaje, como la clasificación física y el reciclaje químico, convierten los residuos de procesamiento (como los recortes) y las piezas de desecho en materias primas reutilizables, lo que reduce la acumulación de residuos sólidos y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contaminación ambiental. Los sistemas de reciclaje de circuito cerrado maximizan el aprovechamiento de los recursos al devolver los residuos directamente a la producción. Por ejemplo, el reciclaje de contrapesos aeroespaciales puede reprocesarse para obtener piezas similares, lo que reduce los costes de eliminación de residuos.

- **Mayor eficiencia energética** : El proceso de reciclaje consume menos energía que el refinado primario de metales. Por ejemplo, el consumo energético del reciclaje de polvo de tungsteno es entre un 30 % y un 50 % menor que el del refinado a partir de mineral de tungsteno. Al combinar tecnologías de ahorro energético (como el reciclaje por plasma o la sinterización a baja temperatura), la producción de aleaciones en la economía circular reduce aún más las emisiones de carbono y cumple los objetivos de fabricación ecológica.
- **Sostenibilidad de la cadena de suministro** : El reciclaje de la aleación de tungsteno, níquel y hierro promueve la gestión de la cadena de suministro de circuito cerrado en la economía circular. Al establecer una red global de reciclaje y estandarizar los procesos, los fabricantes pueden garantizar un suministro estable de recursos como el tungsteno y el níquel, y reducir los riesgos derivados de las fluctuaciones geopolíticas o del mercado. Esto es especialmente importante para el tungsteno, un recurso escaso, que puede aliviar la presión en la cadena de suministro.

Aplicación e impacto : En el sector aeroespacial, las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro recicladas pueden utilizarse para reparar contrapesos o piezas resistentes a altas temperaturas, lo que reduce los costes de producción y el impacto ambiental. En el sector médico, el reciclaje de piezas de blindaje y colimadores desechados permite producir nuevas piezas de forma circular, cumpliendo con estrictas normas ambientales y de seguridad. En la industria militar, el reciclaje de materiales básicos puede reducir el desperdicio de recursos y el riesgo de manipulación de materiales sensibles. La implementación de la economía circular mejora la sostenibilidad de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, haciéndolas más competitivas en aplicaciones de alto rendimiento.

Desafíos técnicos y optimización : La implementación de la economía circular debe superar los obstáculos que limitan el costo y la eficiencia de la tecnología de reciclaje. La inversión inicial en equipos de reciclaje es elevada, y es necesario reducir los costos mediante la producción a gran escala y el apoyo de políticas.

La composición de las aleaciones de chatarra de diferentes orígenes es compleja, y es necesario desarrollar tecnologías eficientes de clasificación y purificación para garantizar la calidad de los materiales reciclados. La integración de la cadena de suministro debe fortalecer la cooperación intersectorial y establecer un sistema de circuito cerrado desde la recolección de residuos hasta la reutilización. En el futuro, la inteligencia artificial y el big data pueden optimizar el proceso de reciclaje, predecir la composición de los residuos y ajustar los parámetros de reciclaje para mejorar la eficiencia y la pureza del material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Capítulo 8 Preguntas y respuestas frecuentes

La aleación de tungsteno-níquel-hierro se utiliza ampliamente en la industria aeroespacial, militar, médica y de instrumentos de precisión gracias a su alta densidad (16,5-18,75 g/cm³), excelentes propiedades mecánicas (resistencia a la tracción de 800-1000 MPa, elongación del 10% al 20%) y resistencia a la corrosión. Sin embargo, la confusión sobre su rendimiento, producción y aplicación, así como los problemas prácticos tecnológicos, suelen preocupar a usuarios y fabricantes. Este capítulo pretende aclarar malentendidos comunes, responder preguntas frecuentes sobre tecnología y aplicación, y ofrecer asesoramiento y soluciones de expertos para ayudar a los usuarios a comprender y utilizar mejor la aleación de tungsteno-níquel-hierro.

8.1 Malentendidos comunes sobre la aleación de níquel-hierro y tungsteno

El conocimiento sobre las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro suele deberse a percepciones erróneas de sus propiedades, composición o aplicaciones. Estos malentendidos pueden llevar a los usuarios a tomar decisiones incorrectas al seleccionar materiales o diseñar aplicaciones. A continuación, se presentan varios malentendidos comunes y sus aclaraciones:

Concepto erróneo 1: La aleación de tungsteno, níquel y hierro es completamente no magnética

Aclaración: La aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta un ferromagnetismo débil (magnetización de saturación de 0,1-0,3 T) debido a su contenido de hierro (1-5 %), y no es un material completamente amagnético. Esto difiere de la aleación de tungsteno-níquel-cobre (completamente amagnética). El ferromagnetismo débil tiene poco efecto en la mayoría de las aplicaciones (como contrapesos aeroespaciales o componentes de blindaje médico), pero se debe prestar especial atención en entornos electromagnéticos altamente sensibles (como equipos de resonancia magnética). Los usuarios pueden reducir la interferencia magnética reduciendo el contenido de hierro o utilizando recubrimientos amagnéticos (como el DLC).

Malentendido 2: La aleación de tungsteno, níquel y hierro tiene las mismas propiedades que el tungsteno puro.

Aclaración: La aleación de tungsteno-níquel-hierro mejora la fragilidad y la dificultad de procesamiento del tungsteno puro mediante la adición de níquel y hierro. El tungsteno puro (densidad 19,25 g/cm³, alta dureza) es difícil de mecanizar y propenso a la fractura por fragilidad, mientras que la aleación de tungsteno-níquel-hierro presenta mayor tenacidad (elongación 10-20%) y mejor rendimiento de procesamiento, siendo adecuada para la fabricación de piezas con formas complejas.

Mito 3: La aleación de tungsteno, níquel y hierro es completamente no tóxica y no tiene impacto ambiental.

Aclaración: Si bien la aleación de tungsteno, níquel y hierro es más ecológica (no tóxica) que las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aleaciones a base de plomo, el níquel es potencialmente alergénico y el contacto prolongado puede causar reacciones cutáneas o tisulares, lo que requiere pruebas de biocompatibilidad en aplicaciones de implantes médicos. El proceso de producción (minería, sinterización) implica consumo de energía y emisiones de residuos, lo que puede tener un impacto en el medio ambiente.

Mito 4: La aleación de tungsteno, níquel y hierro es de bajo costo y fácil de producir en masa.

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro tienen un alto costo, debido principalmente a la escasez de recursos de tungsteno y a la complejidad de su proceso de refinación. El mineral de tungsteno es difícil de extraer, y su selección y purificación requiere múltiples procesos complejos. Además, durante el proceso de refinación se consume una gran cantidad de energía y reactivos, lo que incrementa aún más el costo de las materias primas. En la etapa de producción y procesamiento, la pulvimetalurgia requiere equipos de alta precisión para garantizar la uniformidad de la mezcla y la calidad de moldeo del polvo, y el mecanizado de precisión (como CNC y EDM) no solo depende de equipos de alto consumo energético, sino que también requiere el uso de herramientas especiales resistentes al desgaste. La pérdida y el reemplazo de estas herramientas también incrementan el costo. Por el contrario, los recursos de acero o plomo son abundantes, la tecnología de refinación y procesamiento es madura y sencilla, y el costo de producción es mucho menor que el de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, lo que limita su aplicación en algunos sectores de bajo presupuesto. Si bien los procesos optimizados (como la fabricación aditiva) pueden reducir el desperdicio de materiales y los pasos de procesamiento, y el reciclaje también puede reducir la dependencia de los recursos primarios, reduciendo así los costos hasta cierto punto, para lograr una producción a gran escala y reducir significativamente los costos, aún se necesitan avances en la formulación de materiales, equipos de producción y tecnología de procesos.

8.2 Problemas comunes en tecnología y aplicación

Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro pueden presentar diversos problemas técnicos durante su producción y aplicación, relacionados con las propiedades del material, la dificultad de procesamiento y el entorno de aplicación. A continuación, se presentan los problemas más comunes y sus causas:

Problema 1: Grietas o defectos superficiales durante el mecanizado.

Causa: La alta dureza (dureza Vickers 350-400 HV) y la tenacidad moderada de las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro dificultan el mecanizado. El corte a alta velocidad o unos parámetros de corte inadecuados pueden provocar concentración de tensiones y microfisuras. Las inhomogeneidades en la microestructura (como poros o inclusiones) también pueden causar defectos superficiales. Impacto: En contrapesos aeroespaciales o colimadores médicos, las grietas pueden reducir la fiabilidad y la precisión de los componentes.

Problema 2: El rendimiento de la aleación es inestable o no cumple con las expectativas.

Causa: Una temperatura de sinterización inadecuada (1450-1550 °C) o un control de la atmósfera

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inadecuados durante la producción pueden provocar un aumento de la porosidad (>1 %) o la segregación de los componentes (como una distribución desigual del níquel y el hierro). La pureza insuficiente de la materia prima (impurezas como el oxígeno y el carbono) también puede reducir la resistencia o la tenacidad. Impacto: En núcleos de perforación de blindaje militares o bloques de amortiguación de instrumentos de precisión, un rendimiento inestable puede provocar fallos o una reducción de la precisión.

Problema 3: Problemas de biocompatibilidad en aplicaciones médicas.

Motivo: La posible alergenidad del níquel puede causar reacciones alérgicas en implantes de larga duración (como pesas para intervenciones) o por contacto con la piel. Un tratamiento superficial inadecuado (como el desprendimiento de la capa de galvanoplastia) puede liberar iones de níquel. Impacto: Puede limitar el uso de aleaciones en implantes médicos o componentes de robots quirúrgicos.

Problema 4: Interferencia magnética en aplicaciones de alta sensibilidad.

Causa: El bajo ferromagnetismo de la aleación (debido al contenido de hierro del 1% al 5%) puede causar ligeras interferencias en entornos electromagnéticos de alta sensibilidad (como equipos de resonancia magnética o fotolitografía), lo que afecta la precisión del equipo. Impacto: Se requiere un procesamiento adicional en instrumentos de precisión o equipos médicos para cumplir con los requisitos de compatibilidad electromagnética.

Problema 5: Costos de producción excesivos.

Motivos: Los recursos de tungsteno son escasos y su refinación es compleja. La pulvimetalurgia y el prensado isostático en caliente (HIP) requieren equipos de alto consumo energético. El mecanizado de precisión requiere herramientas de alta resistencia al desgaste (como el CBN), lo que incrementa los costos generales. Impacto: Limita la promoción de aleaciones en sectores sensibles a los costos, como los bienes de consumo civiles.

8.3 Asesoramiento y soluciones de expertos

En respuesta a los malentendidos y problemas mencionados anteriormente, los expertos propusieron las siguientes sugerencias y soluciones para optimizar la producción y aplicación de la aleación de tungsteno-níquel-hierro:

Para el tratamiento de grietas y defectos.

- Recomendación: Optimice los parámetros de corte (como una velocidad de corte baja y un avance adecuado) y utilice herramientas de alta resistencia al desgaste (como herramientas de CBN o de diamante). Utilice mecanizado en seco o lubricación por cantidad mínima (MQL) para reducir la tensión térmica.
- Solución: Eliminar la porosidad y asegurar una microestructura homogénea mediante prensado isostático en caliente (HIP, 1200-1400 °C, 100-200 MPa) antes de la producción. Realizar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pruebas no destructivas (como ultrasonidos o rayos X) después del procesamiento para identificar posibles defectos.

Para un rendimiento inestable

- Recomendación: Controlar estrictamente los parámetros del proceso de sinterización (como temperatura de 1450-1550 °C y atmósfera de argón) y garantizar una densidad superior al 99,5 %. Utilizar materias primas de alta pureza (pureza de tungsteno superior al 99,9 %) y verificar la composición mediante XRF o ICP-AES.
- Solución: Combinar el análisis metalográfico y el SEM-EDS para comprobar la microestructura, optimizar el tamaño de partícula del polvo y la relación níquel-hierro (como 90W-7Ni-3Fe) para mejorar la consistencia del rendimiento. El tratamiento térmico (como el recocido a 800-1000 °C) puede eliminar la tensión interna.

Respecto a cuestiones de biocompatibilidad

- Recomendación: Reducir el contenido de níquel (al 2-5 %) o utilizar recubrimientos biocompatibles (como DLC o TiN) para reducir la liberación de iones de níquel. Realizar pruebas de biocompatibilidad según la norma ISO 10993 antes de su aplicación médica.
- Solución: Tratamiento superficial con níquel químico o recubrimiento PVD para mejorar la resistencia a la corrosión y la bioseguridad. Desarrollo de fases aglutinantes alternativas al níquel (como aleaciones de tungsteno, níquel y cobre) para aplicaciones médicas sensibles.

Para interferencias magnéticas

- Recomendación: Optimizar la fórmula de la aleación, reducir el contenido de hierro (al 1%-2%) o utilizar en su lugar una aleación de tungsteno, níquel y cobre para reducir el magnetismo.
- Solución: Aplicar un recubrimiento no magnético (como DLC) o un tratamiento de desmagnetización (como recocido a alta temperatura) para reducir la intensidad de la magnetización. Verificar las propiedades magnéticas mediante un magnetómetro de muestra vibratoria (VSM) después de la producción para garantizar el cumplimiento de los requisitos de compatibilidad electromagnética.

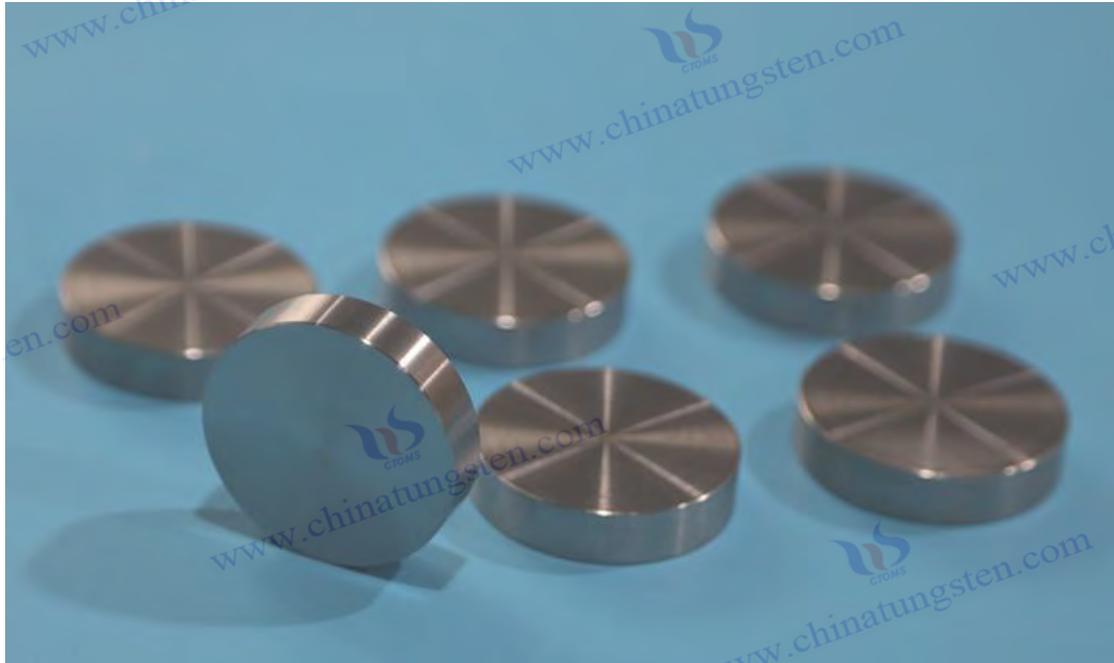
Por alto costo

- Recomendaciones: Utilizar tecnologías de fabricación ecológicas (como la sinterización por plasma o la sinterización por microondas) para reducir el consumo energético. Desarrollar tecnologías de reciclaje eficientes para reciclar aleaciones de desecho (como contrapesos de aviación) y así reducir los costes de las materias primas.
- Solución: Introducir la fabricación aditiva (como SLM) para producir piezas complejas y reducir el desperdicio de material y los costes de procesamiento. Optimizar la cadena de suministro, diversificar las fuentes de tungsteno y reducir los riesgos de volatilidad del mercado.

Sugerencias integrales : Los fabricantes deben establecer un sistema de producción ecológico que cumpla con las normas ambientales ISO 14001 y promover una economía circular mediante la combinación de tecnologías de reciclaje. Los usuarios deben aclarar los requisitos de aplicación (como

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la compatibilidad electromagnética o la biocompatibilidad) al seleccionar aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, y colaborar con los proveedores para optimizar las formulaciones y los procesos y garantizar un equilibrio entre rendimiento y coste.



CTIA GROUP LTD Aleación de hierro y níquel de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD
Tungsten Nickel Iron Alloy Introduction

1. Overview of Tungsten Nickel Iron Alloy

Tungsten-nickel-iron alloy is a high-density material with tungsten as the primary component and nickel and iron added as binder phases. Known for its excellent physical and chemical properties, it is widely used in aerospace, military, medical, nuclear industries, and civilian fields. CTIA GROUP LTD offers tungsten-nickel-iron alloy products, including alloy rods, counterweights, radiation shields, and phone vibrators, tailored for various applications.

2. Features of Tungsten Nickel Iron Alloy

High Density: Typically ranges from 16.5 to 18.75 g/cm³.

High Strength: Tensile strength ranges from 700 to 1000 MPa.

Other Characteristics: Exhibits strong radiation absorption, high thermal conductivity, low thermal expansion coefficient, good electrical conductivity, plasticity, weldability, and processability.

3. Tungsten-Nickel-Iron Alloy Grades

Grade	Class 1	Class 1	Class 2	Class 2	Class 3	Class 3	Class 4
Composition (%)	90W 7Ni3Fe	91W 6Ni3Fe	92W 5Ni3Fe	93W 4Ni3Fe	95W 3Ni2Fe	96W 3Ni1Fe	97W 2Ni1Fe
Density (g/cm³)	17.1	17.25	17.50	17.60	18.10	18.30	18.50
Heat Treatment	Sintering						
Tensile Strength (PSI)	900~1000		900~1100		920~1100		
Elongation (%)	18~29	17~27	16~26	16~24	10~22	8~20	6~13
Hardness (HRC)	24~28	25~29	25~29	26~30	27~32	28~34	28~36

4. Production Methods for Tungsten Nickel Iron Alloy

The powder metallurgy process involves first mixing tungsten powder, nickel powder, and iron powder; then ball milling and sieving; followed by shaping the mixed powder into blanks using hot pressing, hot isostatic pressing, or vacuum sintering techniques; and finally improving the alloy's microstructure and properties through heat treatments such as annealing or quenching.

4. Applications of Tungsten Nickel Iron Alloy

In the medical field, tungsten-nickel-iron alloy serves as radiation shields, radiation source containers, collimators, isotope containers, and syringe shields. In scientific research, tungsten alloy is used as heat sinks and for oil drilling and mineral resource exploration.

5. Purchasing Information

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

Website: www.tungsten-alloy.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice: Glosario de aleaciones de tungsteno, níquel y hierro

A continuación se presenta un glosario de términos relacionados con las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro, presentado en formato de tabla, que cubre términos clave y sus definiciones en los campos de producción, rendimiento, pruebas y aplicación, con el objetivo de ayudar a los lectores a comprender y utilizar con precisión los términos profesionales.

El término	Definición
Aleación de alta densidad	Una aleación con tungsteno como componente principal (generalmente 85-97 %) y adicionada con níquel, hierro y otras fases aglutinantes. Presenta alta densidad (16,5-18,75 g/cm ³) y excelentes propiedades mecánicas. Se utiliza ampliamente en contrapesos, blindaje y aplicaciones militares.
Metalurgia de polvos	La tecnología de preparación de materiales metálicos mediante mezcla de polvos metálicos, prensado y sinterización a alta temperatura se utiliza para producir aleaciones de tungsteno, níquel y hierro, garantizando una alta densidad y una microestructura uniforme.
Sinterización en fase líquida	Durante el proceso de sinterización, la fase aglutinante (como el níquel y el hierro) se funde para formar una fase líquida, lo que favorece la unión de las partículas de tungsteno. Generalmente, se lleva a cabo a 1450-1550 °C para aumentar la densidad de la aleación (>99,5 %).
Prensado isostático en caliente	La densificación de la aleación se realiza a alta temperatura (1200-1400°C) y alta presión (100-200 MPa) para eliminar la porosidad y mejorar las propiedades mecánicas y la homogeneidad microestructural.
Resistencia a la tracción	La capacidad máxima de un material para resistir la fractura bajo tensión. La resistencia a la tracción de la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele ser de 800 a 1000 MPa, lo que refleja sus características de alta resistencia.
Alargamiento	El porcentaje de deformación plástica de un material antes de la fractura por tracción. El alargamiento de la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele ser del 10 % al 20 %, lo que indica su tenacidad.
Dureza Vickers	La dureza Vickers de la aleación de tungsteno-níquel-hierro suele ser de 250 a 400 HV, lo que refleja su resistencia al desgaste.
Coefficiente de expansión térmica	La tasa de cambio dimensional del material bajo el cambio de temperatura, el CTE de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es de $4,5-5,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$, lo que indica su excelente estabilidad dimensional.
Conductividad térmica	La capacidad del material para conducir el calor. La conductividad térmica de la aleación de tungsteno-níquel-hierro es de 100-130 W/ m·K , lo que la hace adecuada para aplicaciones de disipación de calor a alta temperatura.
Resistencia a la corrosión	La capacidad del material para resistir ataques químicos. La aleación de tungsteno-níquel-hierro se beneficia de la resistencia a la oxidación del níquel y presenta un buen rendimiento en ambientes húmedos o ácidos.
Ferromagnetismo	La aleación de tungsteno-níquel-hierro tiene un ligero magnetismo debido a su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

débil	contenido de hierro (1%-5%), con una magnetización de saturación de 0,1-0,3 T, que debe controlarse en aplicaciones sensibles al electromagnetismo.
Fluorescencia de rayos X	Tecnología de pruebas no destructivas para analizar la composición de aleaciones, verificando el contenido de tungsteno, níquel y hierro con una precisión de $\pm 0,2\%$.
Espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente	Análisis de alta precisión de la composición de la aleación, utilizado para detectar trazas de impurezas (como oxígeno, carbono).
Microscopio electrónico de barrido	Una técnica microscópica utilizada para observar la microestructura y la morfología de la superficie de las aleaciones, a menudo combinada con espectroscopia de energía dispersiva (EDS) para detectar la distribución de componentes.
Contrapeso	Los componentes fabricados con materiales de alta densidad se utilizan para ajustar el centro de gravedad o el equilibrio de los equipos, como por ejemplo los contrapesos aeroespaciales o los contrapesos de las articulaciones de los robots quirúrgicos.
Núcleo perforante de armaduras	Materiales de alta densidad y alta resistencia, como el tungsteno-níquel-hierro, utilizados en munición militar para penetrar objetivos blindados.
Blindaje contra la radiación	El uso de materiales de alta densidad para absorber rayos X o rayos gamma para proteger al personal y al equipo es común en los equipos médicos de TC/RM y en los campos de la energía nuclear.
colimador	Se utiliza en equipos de radioterapia para controlar la dirección y el alcance de los haces de radiación debido a su alta densidad y procesabilidad.
Fabricación aditiva	Las tecnologías de fabricación de componentes de formas complejas mediante deposición capa por capa de materiales (por ejemplo, fusión selectiva por láser, SLM) se utilizan para producir componentes WNiFe personalizados.
Economía circular	La tecnología de reciclaje de aleación de tungsteno-níquel-hierro apoya el desarrollo sostenible del modelo de desarrollo económico que reduce los residuos a través del reciclaje, la reutilización y la circulación de recursos.
Fabricación ecológica	Adoptar procesos y tecnologías respetuosos con el medio ambiente (como el procesamiento de minerales verdes y la sinterización a baja temperatura) para producir aleaciones que reduzcan el consumo de energía y la contaminación ambiental.
Biocompatibilidad	No causar reacciones adversas al entrar en contacto con tejido humano. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro se prueban según la norma ISO 10993 para aplicaciones médicas.
Compatibilidad electromagnética	La capacidad de un material o componente para funcionar con normalidad en un entorno electromagnético sin causar interferencias. Las aleaciones de tungsteno-níquel-hierro deben optimizar el ferromagnetismo débil para cumplir con los requisitos de compatibilidad electromagnética (CEM).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Literatura inglesa

- [1] ASTM International. (2015). ASTM B777-15: Especificación estándar para metales de alta densidad con base de tungsteno. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [2] ASTM International. (2018). ASTM E8/E8M-18: Método de ensayo estándar para ensayos de tensión de materiales metálicos. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [3] ASTM International. (2019). ASTM E92-17: Método de ensayo estándar para dureza Vickers y dureza Knoop de materiales metálicos. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [4] ASTM International. (2016). ASTM A927/A927M-11: Método de ensayo estándar para determinar las propiedades magnéticas de corriente alterna de muestras de núcleo toroidal mediante el método voltímetro-amperímetro-vatímetro. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [5] ISO. (2004). ISO 20886:2004: Aviación - Aleaciones de tungsteno de alta densidad. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- [6] ISO. (2015). ISO 9001:2015: Sistemas de Gestión de la Calidad - Requisitos. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- [7] ISO. (2015). ISO 14001:2015: Sistemas de Gestión Ambiental - Requisitos con Guía para su Uso. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- [8] ISO. (2018). ISO 10993-1:2018: Evaluación biológica de dispositivos médicos - Parte 1: Evaluación y pruebas dentro de un proceso de gestión de riesgos. Ginebra: Organización Internacional de Normalización.
- [9] MIL-T-21014D. (1991). Especificación militar: Metal base de tungsteno, alta densidad. Washington, D.C.: Departamento de Defensa de los Estados Unidos.
- [10] EN 10204:2004. (2004). Productos metálicos: tipos de documentos de inspección. Bruselas: Comité Europeo de Normalización.



CTIA GROUP LTD Aleación de tungsteno, níquel y hierro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT