

Carburo cementado de tungsteno

Exploración integral de propiedades físicas y químicas, procesos y aplicaciones (IX)

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

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

Parte 3: Optimización del rendimiento del carburo cementado

Capítulo 9: Multifuncionalización del carburo cementado

La multifuncionalidad del carburo cementado puede satisfacer **las complejas necesidades de la industria aeroespacial** (vida útil $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas), fabricación electrónica (resistividad $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y equipos inteligentes (tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) regulando la conductividad, el magnetismo, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión, la autolubricación y las capacidades de respuesta inteligente. El carburo cementado tradicional es conocido por su alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), pero su conductividad ($\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), magnetismo (intensidad de magnetización de saturación $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) y adaptabilidad son insuficientes, lo que limita su aplicación en escenarios multifuncionales. La optimización debe comenzar desde **la microestructura** (tamaño de grano $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), **control de la composición** ($\text{TiC } 5\%10\% \pm 0,1\%$, $\text{Ni } 8\%12\% \pm 0,1\%$) e **ingeniería de superficie** (profundidad de textura $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para lograr una mejora sinérgica en el rendimiento.

analiza **la ruta multifuncional del carburo cementado** desde los aspectos de **(1) conductividad eléctrica y (2) regulación magnética, (3) rendimiento compuesto conductor resistente al desgaste y a la corrosión, (4) autolubricación y antiadhesión, y (5) carburo cementado biónico e inteligente**. La conductividad eléctrica y la regulación magnética se optimizan mediante el contenido de Co ($10\% \pm 1\%$) y la sustitución de Ni; el rendimiento compuesto conductor resistente al desgaste y a la corrosión se centra en el sistema WCTiCNi (dureza $> \text{HV } 1600 \pm 30$, tasa de corrosión $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$); **la autolubricación y la antiadhesión** introducen MoS_2 ($5\% \pm 0,1\%$) y **textura superficial** (coeficiente de fricción $< 0,2 \pm 0,01$); **El carburo cementado biónico e inteligente** se basa en **una estructura de gradiente** (porosidad del 5% al $20\% \pm 1\%$) y **materiales sensibles** (tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$), y busca aplicaciones inteligentes. Este capítulo se relaciona con el Capítulo 8 (dureza del recubrimiento de $\text{Cr}_3\text{C}_2 > \text{HV } 1500 \pm 30$) y sienta las bases para el Capítulo 10 (Fabricación ecológica).

9.1 Control de la conductividad eléctrica y las propiedades magnéticas del carburo cementado

La conductividad eléctrica (conductividad $\sim 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$) y las propiedades magnéticas (magnetización de saturación $< 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) del carburo cementado afectan directamente su aplicación en **contactos electrónicos** (resistividad $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), **pruebas magnéticas** (sensibilidad $> 95\% \pm 2\%$) y control de calidad. La alta resistividad del WC ($100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) debe optimizarse mediante la fase de enlace de Co o Ni (conductividad $> 15 \text{ MS/m} \pm 0,2 \text{ MS/m}$), mientras que el ferromagnetismo del Co (coercitividad $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) proporciona una base para pruebas no destructivas. La regulación requiere un equilibrio entre conductividad, magnetismo y propiedades mecánicas ($K_{1c} > 1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Esta sección analiza el mecanismo de control y su aplicación desde la perspectiva de la detección de conductividad y magnetismo, así como del control de calidad del carburo cementado,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combinando teoría eléctrica (modelo de Drude), análisis magnético (VSM, precisión $\pm 0,1$ emu/g) y casos de ingeniería. Por ejemplo, el WC10Co (Co 10 % ± 1 %) tiene una conductividad de 10,5 MS/m $\pm 0,1$ MS/m y una magnetización de 8 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, lo que cumple con los requisitos de contactos electrónicos y detección de calidad.

9.1.1 Conductividad eléctrica del carburo cementado (~10 MS/m)

9.1.1.1 Descripción general del principio y la tecnología de conductividad del carburo cementado

La conductividad eléctrica del carburo cementado (objetivo ~ 10 MS/m $\pm 0,1$ MS/m) está determinada por la conductividad de la fase de enlace Co (15 MS/m $\pm 0,2$ MS/m), y las propiedades semiconductoras del WC (resistividad $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) limitan el rendimiento general. La conductividad eléctrica σ sigue el modelo de Drude:

$$\sigma = \frac{n e^2 \tau}{m}$$

Donde n es la densidad de electrones libres ($\sim 10^{28} \text{ m}^{-3} \pm 10^{27} \text{ m}^{-3}$), e es la carga del electrón ($1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$), τ es el tiempo de relajación ($10^{-14} \text{ s} \pm 10^{-15} \text{ s}$) y m es la masa del electrón ($9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$). El alto valor n de Co aumenta σ , mientras que los granos de WC ($0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aumentan la dispersión de la interfaz (tasa de dispersión $10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$), reduciendo la conductividad. El objetivo de optimización es una resistividad de $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ para cumplir con los requisitos de los contactos electrónicos. (El modelo de Drude de conductividad eléctrica (σ) es una teoría clásica que describe el comportamiento del movimiento de los portadores de carga (como los electrones libres) en metales bajo la acción de un campo eléctrico. El modelo fue propuesto por Paul Drude en 1900 y asume que los electrones en los metales se mueven aleatoriamente en la red cristalina como partículas libres y se desplazan direccionalmente bajo la aplicación de un campo eléctrico).

La prueba adopta el método de cuatro sondas (corriente $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$, precisión $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y el tamaño de muestra es de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Por ejemplo, la resistividad de WC10Co (Co 10 % ± 1 %) es de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que es mejor que los $15 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ de WC6Co. La mejora de la conductividad no solo reduce el calor Joule ($< 0,1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,01 \text{ W/cm}^2$), sino que también mejora la eficiencia de transmisión de la señal ($> 99 \% \pm 1 \%$). Esta sección analiza mediante el mecanismo, las pruebas y la optimización. (El método de **cuatro** sondas es una técnica precisa para medir la conductividad eléctrica o resistividad de materiales, especialmente adecuada para la caracterización de semiconductores, películas delgadas y materiales conductores. Este método reduce la influencia de la resistencia de contacto y los factores geométricos mediante el uso de cuatro sondas (generalmente agujas o electrodos de metal) para mejorar la precisión de la medición).

9.1.1.2 Análisis del mecanismo de conductividad eléctrica en carburos cementados

Los carburos cementados, con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(Ni) como fase aglutinante, son materiales compuestos con alta dureza, alta resistencia al desgaste y buena conductividad eléctrica. El mecanismo de su conductividad eléctrica se ve afectado principalmente por la composición del material, la microestructura y las propiedades de transporte de electrones. Con base en la teoría clásica y la investigación moderna, este artículo analiza brevemente el mecanismo de conductividad del carburo cementado:

(1) Contribución de la fase de enlace

Papel dominante del cobalto en la conductividad: Como fase altamente conductora, el cobalto presenta una resistividad de aproximadamente $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y domina la transmisión de corriente mediante la formación de una red continua (fracción volumétrica del $10 \% \pm 1 \%$). Los electrones libres del cobalto se desplazan direccionalmente bajo la acción de un campo eléctrico, que constituye la principal fuente de conductividad del carburo cementado.

Sustitución del níquel

La adición de níquel ($8\%-12\% \pm 0,1\%$, resistividad de aproximadamente $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) puede reemplazar al cobalto y reducir aún más la resistividad a $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. El nivel de Fermi del níquel (aproximadamente $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) es similar al del cobalto, y la conductividad es comparable, pero la resistencia a la corrosión es mejor (densidad de corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), lo que lo hace adecuado para aplicaciones en entornos hostiles.

Efecto del contenido de la fase aglutinante

A medida que aumenta la proporción de la fase de enlace (por ejemplo, del 6% al 15%), la conductividad aumenta significativamente debido al aumento del número de caminos de migración de electrones; por el contrario, a medida que disminuye la fase de enlace, la conductividad disminuye.

(2) Limitación de la fase dura

Baja conductividad eléctrica del carburo de tungsteno

El WC tiene características de enlace covalente (la energía de enlace WC es de aproximadamente $700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), baja movilidad electrónica ($< 10 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 1 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$) y alta resistividad (aproximadamente $100 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), y su contribución a la conductividad general es limitada.

Efecto de partículas

Las partículas de WC se dispersan en la fase aglutinante, lo que dificulta el libre movimiento de electrones y hace que la conductividad disminuya al aumentar el contenido de WC.

(3) Influencia de la microestructura

Tamaño de grano y densidad del límite de grano

El tamaño del grano es de aproximadamente $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, lo que aumenta la densidad del límite de grano ($> 10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$), lo que resulta en una mayor dispersión de la interfaz y un aumento de la resistividad de aproximadamente el $10 \% \pm 2 \%$. Aunque los granos finos aumentan la dureza, no son propicios para la conductividad.

Uniformidad de la distribución de la fase de enlace

La uniformidad de la distribución de Co o Ni (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) es crucial para la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad. La segregación ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$) puede provocar un aumento local de la resistividad de aproximadamente un $20 \% \pm 3 \%$, lo que afecta el rendimiento general.

Continuidad de la red

El análisis SEM mostró que la red Co/Ni en la aleación WC-10%Ni tenía alta continuidad ($> 95\% \pm 2\%$), y EDS confirmó que la distribución de Ni era uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), lo que mejoró significativamente la conductividad.

Porosidad y defectos

La porosidad o las microfisuras en el material aumentan la dispersión de electrones y reducen la conductividad.

(4) Efecto de la temperatura

A bajas temperaturas, la dispersión electrón-fonón se reduce y la conductividad permanece estable. A altas temperaturas ($> 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), las vibraciones térmicas se intensifican, la dispersión aumenta y el tiempo de colisión promedio τ disminuye aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, lo que resulta en un ligero aumento de la resistividad ($< 5 \% \pm 1 \%$), que se manifiesta como una disminución de la conductividad.

(5) Verificación experimental

Método de cuatro sondas

Al medir la resistividad y combinarla con el análisis microestructural (como SEM y EDS), se verifican los efectos de la relación de fases de enlace, el tamaño del grano y la uniformidad de distribución en la conductividad.

Valor típico

WC-10%Co 硬质合金电导率约为 $1 \times 10^8 \text{ S/m}$, 随 Co 含量增加可达 $2 \times 10^8 \text{ S/m}$; La resistividad de la aleación WC-10%Ni se puede optimizar a $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

La conductividad eléctrica del carburo cementado está dominada principalmente por los electrones libres de la fase de enlace (como Co o Ni) y se ve modulada por factores como el contenido de WC, la microestructura (tamaño de grano, uniformidad de distribución, red continua) y la temperatura. Optimizar la relación de la fase de enlace, mejorar la uniformidad de distribución, reducir los defectos y ajustar el tamaño de grano puede mejorar eficazmente la conductividad eléctrica. La introducción de Ni optimiza aún más la resistencia a la corrosión y la conductividad, lo que ofrece nuevas posibilidades para el carburo cementado en aplicaciones como la electroerosión y los recubrimientos conductores. Este análisis de mecanismos proporciona una guía teórica para el diseño de materiales y la optimización del rendimiento.

9.1.1.3 Análisis de los factores que afectan la conductividad del carburo cementado

La conductividad eléctrica es una propiedad eléctrica importante del carburo cementado, que afecta directamente su rendimiento en electroerosión, recubrimientos conductores, dispositivos electrónicos y aplicaciones de respuesta inteligente. Este rendimiento se ve afectado por una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combinación de factores, como la composición del material, la microestructura, el proceso de preparación y el estado de la superficie. Estos factores ajustan significativamente las propiedades eléctricas del carburo cementado al afectar la trayectoria de migración de electrones, el mecanismo de dispersión, las características de contacto y la uniformidad general del material. A continuación, se presenta un análisis detallado de los principales factores influyentes, combinado con datos experimentales, observaciones microscópicas y casos de aplicación de ingeniería, para explorar en profundidad su mecanismo y estrategia de optimización, con el fin de proporcionar soporte teórico y orientación práctica para el desarrollo del carburo cementado en el campo del alto rendimiento.

9.1.1.3.1 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: contenido de Co/Ni

(1) Mecanismo de influencia

El Co o Ni, como fase de enlace del carburo cementado, es el principal contribuyente a la conductividad eléctrica. Su función es formar una red conductora continua y proporcionar densidad de electrones libres. Cuando el contenido de Co/Ni es del 10 % \pm 1 %, la resistividad es de aproximadamente 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, mostrando una excelente conductividad. Esto se debe a que la cantidad apropiada de fase de enlace puede conectar eficazmente las partículas de WC y reducir la trayectoria de dispersión de electrones. El análisis SEM muestra que con este contenido, el Co o Ni se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y la fuerza de enlace es $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, lo que garantiza la estabilidad de la red conductora. Sin embargo, cuando el contenido supera el 12 % $\pm 1 \%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye aproximadamente un 10 % $\pm 2 \%$. Esto se debe principalmente a una relación de fase de enlace excesivamente alta, que debilita los límites de grano, aumenta la dispersión de electrones y la resistividad local, y reduce así la conductividad general. El análisis EDS también mostró que un alto contenido de Co puede inducir segregación (la relación Ni:Co se desvía de 1:1 $\pm 0,1$), lo que agrava la falta de homogeneidad conductiva.

(2) Estrategia de optimización

Al controlar el contenido de Co/Ni en el rango de 8%-12%, es posible equilibrar las propiedades mecánicas (tales como dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) mientras se mantiene una alta conductividad eléctrica ($\pm 0,5$). En aplicaciones prácticas, debido a la segregación de Co, la resistividad de WC12Co puede aumentar a 13 $\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, y la conductividad local disminuye en aproximadamente 15% $\pm 2\%$, mientras que la resistividad de WC10Ni es solo 11 $\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ bajo las mismas condiciones, lo que indica que Ni tiene mejor uniformidad y capacidad antisegregación en ciertas formulaciones. La optimización se puede lograr ajustando la uniformidad de la mezcla de polvo (por ejemplo, ampliando el tiempo de molienda de bolas a 40 horas ± 1 hora) o introduciendo elementos de aleación traza (como Cr, $< 1\%$) para inhibir la segregación y mejorar la continuidad de la red conductora.

9.1.1.3.2 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado - Tamaño del grano

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Mecanismo de influencia

El efecto del tamaño de grano en la conductividad se logra principalmente a través de la densidad del límite de grano y la dispersión de electrones. Cuando el tamaño de grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano es alta ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$) y la resistividad es baja (aproximadamente $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Esto se debe a que los granos finos promueven la red continua de la fase de enlace (como Co o Ni), formando una ruta de migración de electrones eficiente. Las observaciones SEM muestran que el carburo cementado de grano fino (como WC-6Co) mejora la dispersión debido a la alta densidad del límite de grano, pero la optimización de la red de la fase de enlace puede compensar algunos de los efectos. Sin embargo, cuando el tamaño de grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el número de límites de grano disminuye significativamente y la dispersión de electrones disminuye. Sin embargo, debido al aumento de la proporción de fase WC y a la interrupción de la red de fases de enlace, la resistividad aumenta aproximadamente un $15\% \pm 3\%$ y la conductividad disminuye. El análisis XPS muestra que puede haber más capas de óxido en la superficie de los granos gruesos (posición del pico O1s $\sim 532 \text{eV} \pm 0,1 \text{eV}$), lo que aumenta aún más la resistencia de contacto.

(2) El análisis microscópico muestra

que el carburo cementado de grano fino (como WC-6Co, tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m}$) ha mejorado la dispersión debido a la alta densidad del límite de grano ($> 10^{14} \text{m}^{-2}$), pero la resistividad se puede mantener estable optimizando la distribución de la fase de enlace (como Co $10\% \pm 1\%$). El carburo cementado de grano grueso (como WC-10Co, $> 2 \mu\text{m}$) ha reducido la conductividad general debido al predominio de la fase WC (resistividad $\sim 50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). La detección EDS muestra que la fase de enlace está distribuida de forma desigual (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$), lo que agrava la barrera de migración de electrones.

(3) Optimización del proceso

Controlando los parámetros de sinterización (como $1400 \text{°C} \pm 10 \text{°C}$, presión $50 \text{MPa} \pm 1 \text{MPa}$) o añadiendo inhibidores de grano (como VC $0,5\% - 1\%$ o $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), el tamaño de grano se puede estabilizar en el rango de $0,5 - 1 \mu\text{m}$, teniendo en cuenta la conductividad ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y la dureza ($> \text{HV } 1400 \pm 30$). La tecnología de nanogranos ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) puede mejorar aún más la conductividad, pero el coste de producción debe equilibrarse.

9.1.1.3.3 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: temperatura de sinterización

(1) Mecanismo de influencia

La temperatura de sinterización afecta directamente la distribución de la fase de enlace, la uniformidad microestructural y la formación de la red conductora. A $1450 \text{°C} \pm 10 \text{°C}$, el Co o el Ni se funden y se distribuyen uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), lo que garantiza la continuidad de la red de la fase de enlace y mantiene una conductividad estable (resistividad $\sim 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Sin embargo, cuando la temperatura supera los $1500 \text{°C} \pm 10 \text{°C}$, el Co o el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni sufren una segregación obvia, la desviación aumenta aproximadamente un $20\% \pm 3\%$, la resistividad local aumenta ($> 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y la conductividad general disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que la fase de enlace migra al límite del grano a alta temperatura, destruyendo la uniformidad de la red conductora.

(2) Análisis termodinámico

La sinterización a alta temperatura ($> 1500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) provoca que el Co se funda y enriquezca en los límites de grano. El análisis EDS muestra que el contenido de Co en la zona de segregación puede ser tan alto como $15\% \pm 1\%$, la resistividad es 15%-20% más alta y el coeficiente de expansión térmica ($> 6 \times 10^{-6} /\text{°C}$) también puede inducir microfisuras ($< 0,1 \mu\text{m}$). A una temperatura constante de 1450 °C , el calentamiento por pasos (precalentamiento a 1200 °C) puede reducir la tensión térmica ($< 50\text{ MPa}$) y optimizar la conductividad.

(3) Mejora del proceso:

El uso de sinterización gradual o tecnología de enfriamiento rápido (como una velocidad de enfriamiento de $10\text{ °C}/\text{min} \pm 1\text{ °C}/\text{min}$) puede reducir eficazmente la segregación a alta temperatura y mantener la estabilidad del NiTi (temperatura de descomposición $> 1500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$). En combinación con una atmósfera protectora de Ar, puede prevenir la oxidación (posición del pico de $\text{O}_{11} < 0,5\%$) y mejorar la consistencia de la conductividad (desviación $< 5\% \pm 1\%$).

9.1.1.3.4 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado - Aditivos

(1)

La introducción de aditivos modificará significativamente las propiedades eléctricas del carburo cementado. Por ejemplo, añadir un $5\% \pm 0,1\%$ de TiC (resistividad de aproximadamente $50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 2 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) aumentará la resistividad en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$. Esto se debe a que el TiC presenta una baja conductividad y sus características de enlace covalente limitan la migración de electrones. Las observaciones mediante SEM muestran que las partículas de TiC (tamaño de partícula $\sim 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) se dispersan en la matriz de WC, lo que aumenta los puntos de dispersión.

(2) Otros aditivos

como TaC o VC (resistividad $30\text{-}60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) tienen un efecto importante en el refinamiento del grano ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) cuando se añaden en pequeñas cantidades ($< 2\%$), lo que afecta indirectamente a la conductividad; una adición excesiva ($> 3\% \pm 0,1\%$) reduce aún más la conductividad (aumento de la resistividad $> 10\% \pm 2\%$) porque sus propiedades de alta resistencia dominan la red conductora. Añadir Mo_2C ($< 1\%$) puede mejorar la distribución de la fase de enlace y aumentar ligeramente la conductividad ($< 2\% \pm 0,5\%$).

(3) Diseño equilibrado.

En la optimización aditiva, es necesario ponderar la conductividad eléctrica y las propiedades mecánicas (como la resistencia al desgaste $> 10^4$ horas). Normalmente, el contenido de TiC se controla a un nivel bajo, entre el 2% y el 5% , en combinación con VC ($< 1\%$) para refinar los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

granos, mantener la resistividad $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y mejorar $K_{-1} (> 15 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5)$.

9.1.1.3.5 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado - Estado de la superficie

(1) Mecanismo de influencia:

La rugosidad superficial (R_a) afecta directamente la resistencia de contacto y la eficiencia de transferencia de electrones. Cuando $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la superficie es plana, la resistencia de contacto es baja ($< 1 \text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) y la conductividad es óptima; cuando $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la irregularidad de la superficie provoca un aumento de la resistencia de contacto de aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, la eficiencia de transferencia de electrones disminuye y la resistividad local puede alcanzar $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

(2) Influencia del procesamiento

Los procesos de pulido o rectificado (como el uso de abrasivos de diamante) pueden reducir R_a a $0,02 \mu\text{m}$, mejorando significativamente la conductividad (resistividad hasta $10,8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$); por el contrario, el procesamiento basto (como torneado o arenado, $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aumentará los defectos superficiales (como microfisuras o capas de óxido) y la resistividad aumentará en aproximadamente un $15\% \pm 3\%$. La oxidación superficial (aumento de la posición del pico de $O 1s > 0,5\%$) deteriora aún más la conductividad.

(3) Caso real:

Tras el pulido fino ($R_a 0,03 \mu\text{m}$), la resistividad del WC10Co se estabiliza en $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y la resistencia de contacto superficial se reduce en aproximadamente un $20 \% \pm 2 \%$. La resistividad de la superficie rugosa sin tratar ($R_a 0,15 \mu\text{m}$) puede alcanzar los $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, lo que demuestra la importancia de optimizar el estado de la superficie. Tras la limpieza ultrasónica, el espesor de la capa de óxido se reduce ($< 5 \text{nm}$), lo que mejora aún más la consistencia de la conductividad.

9.1.1.3.6 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: ejemplo completo

Tomando WC12Co y WC10Ni como ejemplos, cuando WC12Co se sinteriza a $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la resistividad aumenta a $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ debido a la segregación de Co (desviación $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), la conductividad local disminuye aproximadamente un $15 \% \pm 2 \%$ y la vida útil por fatiga también es limitada ($< 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces). Cuando WC10Ni se sinteriza a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, el Ni se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), la resistividad se mantiene en $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y K_{1c} se mantiene estable a $16 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. En combinación con el tamaño de grano ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la condición de la superficie ($R_a 0,04 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), WC10Ni exhibe mejor conductividad ($< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), dureza ($\text{HV } 1450 \pm 30$) y estabilidad, destacando el efecto sinérgico de la optimización de la composición, el control del proceso y el tratamiento de la superficie. En EDM, la baja resistividad de WC10Ni ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) acorta el tiempo de descarga ($< 0,1 \text{ms} \pm 0,01 \text{ms}$) y mejora la eficiencia del mecanizado ($> 20\% \pm 2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La optimización de la conductividad del carburo cementado requiere una consideración exhaustiva de múltiples factores, como el contenido de Co/Ni (8%-12%), el tamaño de grano (0,5-1 μm), la temperatura de sinterización (alrededor de 1450 $^{\circ}\text{C}$), los aditivos ($\text{TiC} < 5\%$, $\text{VC} < 1\%$) y el estado de la superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$). Al controlar con precisión la relación de la fase de unión, refinar los granos, optimizar los parámetros de sinterización y mejorar la rugosidad de la superficie, se puede mejorar significativamente la conductividad ($< 12 \mu\Omega\cdot\text{cm}$), teniendo en cuenta al mismo tiempo las propiedades mecánicas (como dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Esta optimización proporciona una guía importante para mejorar el rendimiento del carburo cementado en electroerosión, recubrimientos conductores, aplicaciones de respuesta inteligente (tiempo de respuesta $< 1 \text{ms} \pm 0,1 \text{ms}$) y dispositivos electrónicos. Además, su adaptabilidad ambiental (como temperatura $< 100 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ y humedad del 30 % al 50 %), amplía aún más su potencial de aplicación en sensores de aviación (resistencia a la fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) e implantes médicos (compatibilidad $> 95 \% \pm 2 \%$).

9.1.1.4 Optimización de la conductividad del carburo

Para lograr una resistividad $< 12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, la conductividad eléctrica del carburo cementado debe optimizarse desde múltiples aspectos, incluyendo la composición del material, el proceso de preparación, el tratamiento de la superficie y los métodos de prueba. Estas estrategias de optimización tienen como objetivo garantizar que el rendimiento cumpla con los requisitos de las aplicaciones de alta conductividad (como contactos electrónicos, recubrimientos conductores, dispositivos de respuesta inteligente, etc.) mejorando la eficiencia de la migración de electrones, reduciendo las pérdidas por dispersión y mejorando la continuidad y la estabilidad de la red conductora. Combinado con las características microestructurales del carburo cementado (como los granos de WC y la distribución de la fase de enlace) y los requisitos de rendimiento macro (como dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Las siguientes estrategias específicas se recomiendan a través del análisis teórico, la verificación experimental, la caracterización microscópica y los casos de aplicación de ingeniería para mejorar de manera integral la conductividad eléctrica teniendo en cuenta las propiedades mecánicas, la adaptabilidad ambiental y la confiabilidad a largo plazo, sentando una base sólida para la aplicación generalizada del carburo cementado en fabricación de alta gama, campos de tecnología emergente y condiciones de trabajo extremas.

9.1.1.4.1 Optimización de la conductividad del carburo – Optimización de la composición

(1) Control del contenido de Co/Ni.

El contenido de Co o Ni se establece en $10 \% \pm 1 \%$ para proporcionar la red conductora principal como fase de enlace. Esta proporción garantiza una densidad de electrones libres suficiente (aproximadamente $10^{22} \text{cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{cm}^{-3}$), lo que crea una ruta de migración electrónica eficiente y evita la reducción de la tenacidad y la segregación causadas por un contenido excesivo (por ejemplo, $> 12 \% \pm 1 \%$). El análisis SEM muestra que la fase de unión del $10\% \pm 1\%$ se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la resistencia de unión es $> 100 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistividad es estable a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y la conductividad puede alcanzar $9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. Un contenido demasiado alto de Co/Ni aumentará el debilitamiento del límite de grano (densidad de microfisuras $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), agravará la dispersión de electrones y la resistividad puede aumentar a $13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, mientras que la conductividad disminuye aproximadamente un $15\% \pm 2\%$ y K_{1c} disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). La detección EDS muestra además que un alto contenido de Co puede causar segregación (la relación Ni:Co se desvía de $1:1 \pm 0,1$), aumentar la resistividad local ($> 14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y afectar el rendimiento general.

(2) Optimización del tamaño de grano de WC

El tamaño de grano de WC se controla a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y la dispersión de la interfaz se reduce refinando los granos. Los granos finos aumentan la densidad del límite de grano ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), lo que aumenta ligeramente la dispersión. Sin embargo, al optimizar la distribución de la fase de enlace (como Co $10\% \pm 1\%$), la resistividad general se puede reducir significativamente a $< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y la conductividad se puede aumentar a $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. El análisis XPS muestra que el espesor de la capa de óxido en la superficie de los granos finos ($< 5 \text{ nm}$, pico de O $1s \sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) se reduce, lo que mejora la eficiencia de transferencia de electrones y reduce la sección transversal de dispersión a $< 10^{-18} \text{ m}^2$. En comparación con el tamaño de grano $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ Las muestras de grano grueso (resistividad aumentada en un $15\% \pm 3\%$, aproximadamente $13\text{-}14 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y el diseño de grano fino tienen en cuenta tanto la conductividad como la dureza ($\text{HV } 1450 \pm 30$), y también se garantiza la vida útil por fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces).

(3) El microdiseño

suprime el crecimiento excesivo del grano añadiendo trazas de inhibidores de grano (como VC $0,5\%$ - 1% o $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), estabilizando aún más el tamaño del grano en el rango de $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$. Estos inhibidores reducen la energía del límite del grano WC ($< 1 \text{ J/m}^2$), mejoran la conectividad de la red conductora (área de contacto $> 95\% \pm 2\%$) y reducen la resistividad a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. La detección por EDS muestra que los inhibidores se distribuyen uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), evitando la reducción local de la conductividad ($< 1\% \pm 0,5\%$), al tiempo que mejoran K_{1c} ($> 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). El inhibidor excesivo ($> 2\% \pm 0,1\%$) puede introducir una fase de alta resistencia (como VC, resistividad $\sim 60 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y la cantidad agregada debe controlarse estrictamente.

(4) Efecto de ejemplo

Tomando WC10Co como ejemplo, bajo la condición de tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la resistividad es estable a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, y la conductividad es mejor que la de la muestra de grano grueso ($> 2 \mu\text{m}$) (resistividad $\sim 13 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, y la conductividad se reduce a $7,7 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$). Gracias al diseño de respuesta inteligente de NiTi $3\% \pm 0,1\%$, la resistividad de la muestra WC3NiTi se mantiene en $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ con el mismo tamaño de grano, y la tasa de deformación de $0,05\% \pm 0,01\%$ no afecta la conductividad. El tiempo de respuesta de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ demuestra la estabilidad de su conductividad bajo carga dinámica, lo que confirma la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficacia y versatilidad de la optimización de la composición.

9.1.1.4.2 Optimización de la conductividad del carburo - Optimización del proceso de sinterización

(1) Control de temperatura

La temperatura de sinterización se fijó en $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ para evitar la segregación de Co/Ni (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$) causada por la alta temperatura ($> 1500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y asegurar una distribución uniforme de la fase de enlace (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), manteniendo así una baja resistividad ($\sim 11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, conductividad $\sim 9 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$). Las observaciones SEM mostraron que a $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, el Co o el Ni se fundieron y formaron una red continua, la oxidación del límite de grano (posición del pico de O $1s < 0,5\%$) se minimizó y las pérdidas por dispersión se redujeron en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$. Cuando la temperatura supera los $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$, la resistividad en la zona de segregación aumenta a $13\text{-}14\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, la conductividad disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ y la densidad de microfisuras aumenta a $> 10^3\text{ m}^{-2}$, lo que afecta la confiabilidad a largo plazo.

(2)

La presión de sinterización en condiciones de vacío se controla a $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, lo que reduce eficazmente la oxidación y la formación de poros (porosidad $< 0,5\% \pm 0,1\%$) y aumenta la densidad del material a $> 99,5\% \pm 0,1\%$. La alta densidad reduce la trayectoria de dispersión de electrones (sección transversal de dispersión $< 10^{-18}\text{ m}^2$), mejorando significativamente la conductividad, con la resistividad reducida a $10,8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ y la conductividad aumentada a $9,3 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. En comparación con la sinterización a presión atmosférica (densidad $\sim 98\% \pm 0,1\%$, resistividad $\sim 12\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), la conductividad en condiciones de vacío mejora en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ y la vida útil por fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) también mejora debido a la densidad estructural.

(3) La optimización del proceso

utiliza sinterización graduada (presinterización a baja temperatura a $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1 hora y luego aumento a $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) o tecnología de enfriamiento rápido (velocidad de enfriamiento $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) para inhibir el crecimiento anormal del grano ($> 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y la separación de fases (como la segregación de Co $> 0,5\% \pm 0,1\%$), y reducir aún más la resistividad en aproximadamente un $5\%\text{-}8\%$ (a $10,5\text{-}11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$). El análisis de simulación térmica muestra que la sinterización gradual reduce la tensión térmica ($< 50\text{ MPa}$), optimiza la uniformidad microestructural (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), mantiene una densidad de borde de grano $> 10^{14}\text{ m}^{-2}$ y mejora la eficiencia de migración de electrones en aproximadamente un $6\% \pm 1\%$. El enfriamiento rápido también reduce la distorsión de la transformación de fase del NiTi ($< 1\% \pm 0,5\%$), lo que garantiza un rendimiento de respuesta inteligente (tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$).

(4) Fortalecimiento del tratamiento térmico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Después de la sinterización, se realizó un revenido a baja temperatura ($800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2 horas \pm 0,1 horas) para eliminar la tensión interna ($< 30\text{ MPa}$), optimizar la microestructura y mejorar la continuidad de la fase de unión (área de contacto $> 96\% \pm 2\%$). La detección XPS mostró que el espesor de la capa de óxido superficial disminuyó después del revenido ($< 3\text{ nm}$, la posición del pico O 1s aumentó $< 0,3\% \pm 0,01\%$), la resistividad se estabilizó en $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ y la conductividad aumentó a $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. El revenido también mejoró K_{1c} ($> 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y la vida útil por fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces), especialmente adecuado para sensores de aviación (resistencia a altas temperaturas $> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) y herramientas inteligentes (vida útil $> 5000\text{ m} \pm 500\text{ m}$).

9.1.1.4.3 Optimización de la conductividad del carburo - Optimización del tratamiento de superficies

(1) Proceso de pulido:

La rugosidad superficial (R_a) se controla a $< 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ mediante pulido con diamante (tamaño de partícula 1-3 μm) o rectificado de ultraprecisión. La superficie plana reduce la resistencia de contacto en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (de $1,2\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ a $1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$) y mejora la eficiencia de transferencia de electrones (la conductividad aumenta en $> 5\% \pm 1\%$). El análisis SEM muestra que los defectos superficiales (microfisuras $< 0,1\text{ }\mu\text{m}$, densidad $< 10^2\text{ m}^{-2}$) de $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m}$ se reducen significativamente, el área de contacto aumenta a $> 95\% \pm 2\%$ y la pérdida por dispersión se reduce en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$. En comparación con la superficie rugosa de $R_a > 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la conductividad disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$.

(2) Limpieza de la superficie:

utilice etanol anhidro o limpieza ultrasónica (frecuencia de 40 kHz, 5-10 minutos) para eliminar el aceite de la superficie, la capa de óxido (espesor $< 5\text{ nm}$, pico de O 1s $\sim 532\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$) y los contaminantes para garantizar la consistencia de la conductividad de la superficie de contacto (desviación $< 2\% \pm 0,5\%$). Después de la limpieza, la resistencia de contacto disminuyó aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (a $1,1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$), la resistividad se estabilizó en $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ y la conductividad aumentó a $9,1 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. La detección XPS muestra que después de la limpieza, la contaminación de carbono de la superficie (pico C 1s $\sim 284\text{ eV}$) se reduce ($< 5\% \pm 1\%$), lo que mejora la estabilidad de la migración de electrones.

(3) El fortalecimiento posterior al tratamiento

combinado con pulido químico mecánico (CMP) o limpieza con plasma (potencia 100 W, 10 minutos) puede reducir aún más R_a a $0,02\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la resistencia de contacto se puede reducir por debajo de $0,5\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ y la conductividad aumenta a $9,3 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$, lo que es particularmente adecuado para aplicaciones electrónicas de alta precisión (como resistencia de contacto $< 0,1\text{ m}\Omega$). El tratamiento con plasma elimina la capa de óxido residual ($< 2\text{ nm}$, aumento de la posición del pico de O 1s $< 0,2\% \pm 0,01\%$), mejora la conductividad de la superficie en aproximadamente un $8\% \pm 2\%$ y mejora la resistencia a la corrosión (densidad de corriente de corrosión $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), adecuado para entornos marinos (humedad $> 80\% \pm 5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) La verificación real muestra que

después de pulir WC10Ni a Ra 0,04 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la resistividad disminuye de $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, y la conductividad aumenta aproximadamente un $8\% \pm 1\%$ (a $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$). En comparación con la superficie rugosa sin tratar (Ra 0,15 μm , resistividad $12,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductividad $8 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), la optimización de la superficie mejora significativamente la eficiencia de transmisión de electrones, especialmente en la herramienta inteligente (fuerza de corte $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, precisión de mecanizado $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), y la vida útil aumenta a $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

9.1.1.4.4 Optimización de la conductividad del carburo: sustitución de Ni

(1) Optimización del contenido de Ni

El contenido de Ni se establece en $8\%-10\% \pm 0,1\%$, reemplazando parte o la totalidad del Co. La resistividad del Ni (aproximadamente $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) es ligeramente superior a la del Co ($6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), pero su resistencia a la corrosión es mejor (densidad de corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), lo que es adecuado para entornos húmedos o corrosivos (como equipos marinos, implantes médicos). El análisis SEM muestra que el Ni se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la fuerza de unión es $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ y la oxidación del límite de grano (posición del pico de O 1s $< 0,5\%$) es menor que la del Co ($< 1\% \pm 0,1\%$), lo que mejora la estabilidad a largo plazo.

(2) Comparación de rendimiento:

En comparación con WC10Co, la tasa de corrosión de WC10Ni en solución de NaCl al 3,5 % se reduce en aproximadamente un $20\% \pm 2\%$ ($< 0,02 \text{ mm/año}$), la resistividad se mantiene en $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y la conductividad es estable en $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. La detección XPS muestra que se forma una capa de pasivación (NiO, espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) en la superficie de Ni y se mejora la resistencia a la oxidación (la posición del pico de O 1s aumenta $< 0,1\% \pm 0,01\%$). En un entorno de $\text{pH} < 4$ o alta temperatura ($> 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$), la tasa de pérdida de peso de la muestra de Ni ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) es mucho menor que la de Co ($> 0,1 \text{ mg/cm}^2$).

9.1.1.4.5 Optimización de la conductividad del carburo cementado: equilibrio entre conductividad y resistencia a la corrosión

(1) Propiedades eléctricas del Ni

El nivel de Fermi del Ni (aproximadamente $7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) es cercano al del Co ($\sim 6,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), y la capacidad de formación de redes conductoras es comparable. Combinado con una distribución uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la resistividad se puede controlar a $< 11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, la conductividad alcanza $9,2 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, y la K_{1c} se mantiene a $> 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. El punto de fusión más alto del Ni ($1455^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) es más estable que el del Co ($1495^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), lo que reduce la segregación a alta temperatura ($< 0,2\% \pm 0,02\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Escenarios de aplicación:

En entornos corrosivos (como $\text{pH} < 4$, humedad $> 80\% \pm 5\%$ o inmersión en agua de mar), la sustitución de Ni puede extender la vida útil ($> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas), especialmente adecuada para sensores de aviación (resistencia a altas temperaturas $> 400^\circ\text{C}$, vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) e implantes médicos (compatibilidad $> 95\% \pm 2\%$), y reducir la biocorrosión ($< 0,01$ mm/año).

9.1.1.4.6 Optimización de la conductividad del carburo - Diseño de aleaciones

(1) Fase de enlace mixta Co/Ni

A través de la fase de enlace mixta Co/Ni (como Co 5% + Ni 5% $\pm 0,1\%$), la resistencia a la corrosión de Ni y la alta conductividad de Co (resistividad $\sim 6 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$) se optimizan sinérgicamente. La coincidencia del nivel de Fermi de la fase mixta ($\sim 6,7 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) mejora la eficiencia de la migración de electrones y la resistividad se puede reducir aún más a $10,5 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, y la conductividad se incrementa a $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. El análisis SEM muestra que la fase mixta se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la oxidación del límite de grano se reduce (posición del pico de O 1s $< 0,3\% \pm 0,01\%$).

(2) La fase mixta microoptimizada

optimiza la continuidad de la red de la fase de enlace (área de contacto $> 96\% \pm 2\%$), reduce las pérdidas por dispersión a $< 5\% \pm 1\%$ y acorta la longitud de la trayectoria de migración de electrones en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. La detección EDS muestra que la relación Co/Ni (1:1 $\pm 0,1$) es estable, la resistencia del límite de grano ($> 110 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) mejora y K_{1c} aumenta a $16,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

(3) Aplicación práctica

de WC10 (Ni5Co5) En contactos electrónicos de entorno marino, la resistividad es estable a $10,5 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, la conductividad es $9,5 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, la tasa de corrosión es $< 0,01$ mm/año y la vida útil es $> 10^5$ horas $\pm 10^4$ horas, lo que es mejor que la formulación de Co simple (resistividad $12 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, tasa de corrosión $0,02$ mm/año) o Ni (resistividad $11 \mu\Omega\cdot\text{cm}$, resistencia a la corrosión ligeramente mejor). En herramientas inteligentes, el diseño de fase mixta reduce el calor de corte ($< 100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) y aumenta la vida útil a $> 5500 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$.

La conductividad eléctrica del carburo cementado se optimizó ajustando la composición (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, tamaño de grano $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), mejorando el proceso de sinterización (sinterización al vacío a 1450°C , densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$), el tratamiento superficial ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la sustitución de Ni y el diseño híbrido. La resistividad se controló con éxito a $< 12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ y la conductividad se incrementó a $> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$. Tomando como ejemplos WC10Ni y WC10(Ni5Co5), la resistividad es $11 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ y $10,5 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ respectivamente, teniendo en cuenta la conductividad, la resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y las propiedades mecánicas (dureza HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Estas estrategias de optimización sobresalen en herramientas inteligentes (aumento de la eficiencia de corte $> 20\% \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2%), sensores aeroespaciales (tiempo de respuesta $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, resistencia a altas temperaturas $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$), implantes médicos (compatibilidad $> 95\% \pm 2\%$) y equipos marinos (resistencia a la corrosión $> 10^4$ horas), y su potencial de aplicación en entornos extremos (por ejemplo, $> 500 \text{ }^\circ\text{C}$ o alta humedad $> 90\% \pm 5\%$) se puede mejorar aún más mediante nanotecnología (grano $< 0,3 \text{ } \mu\text{m}$ $\pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) o recubrimientos conductores multicapa (espesor $2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$).

9.1.1.4.7 Especificación de prueba para la conductividad del carburo cementado

(1) Aplicación del método de cuatro sondas

El método de cuatro sondas se utiliza para medir la resistividad, aplicando una corriente constante de $1 \text{ mA} \pm 0,01 \text{ mA}$ para garantizar una precisión de medición de $\pm 0,01 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que es adecuada para la caracterización precisa de materiales altamente conductores. El espaciamiento de la sonda se establece en $1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ para reducir los errores geométricos ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), y la distribución de corriente se optimiza mediante una disposición equidistante para mejorar la repetibilidad de los resultados de la prueba. Durante la prueba, la superficie de la muestra debe mantener $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ para evitar la interferencia de la resistencia de contacto ($< 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) causada por la rugosidad de la superficie. Combinado con un sistema de control de temperatura (fluctuación de temperatura $< \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$), el método de cuatro sondas puede capturar con precisión el cambio en la resistividad con la temperatura ($< 0,01 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}/^\circ\text{C}$), lo que es particularmente adecuado para evaluar la estabilidad eléctrica de los carburos cementados de respuesta inteligente (como WC3NiTi) en entornos dinámicos.

(2) Control ambiental

La temperatura de prueba se controla a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad es $< 65\% \pm 5\%$ para evitar factores ambientales (como alta temperatura $> 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ o alta humedad $> 80\% \pm 5\%$) que interfieren con la conductividad. La temperatura excesiva puede causar la transición de fase de NiTi ($A_f \sim 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que lleva a un aumento en la tasa de deformación ($> 0,1\% \pm 0,01\%$) y fluctuación de la resistividad ($> 0,1 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,01 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$); alta humedad puede causar oxidación de la superficie (aumento de la posición del pico de O $1s > 0,5\% \pm 0,1\%$) y aumentar la resistencia de contacto. Se utiliza una cámara de temperatura y humedad constantes (precisión $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $\pm 2\%$ HR), combinada con protección de gas inerte (como Ar), para mantener la estabilidad y repetibilidad del entorno de prueba (desviación $< 1\% \pm 0,5\%$).

(3) Verificación de datos

La medición se repitió 5 veces y se tomó el valor promedio. La microestructura se analizó por SEM para confirmar la continuidad de la red de fase de enlace ($> 95\% \pm 2\%$) y la uniformidad de la distribución de grano (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Las imágenes SEM pueden revelar los efectos de la oxidación del límite de grano (posición del pico O $1s < 0,3\%$) y microfisuras ($< 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) en la conductividad. La detección EDS verifica la relación Co/Ni ($1:1 \pm 0,1$) para garantizar la fiabilidad de los datos. El análisis estadístico utiliza la desviación estándar ($< 0,05 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$) para evaluar la consistencia de la medición. Combinado con la alta precisión del método de cuatro sondas ($\pm 0,01 \text{ } \mu\Omega \cdot \text{cm}$), el efecto de optimización se puede cuantificar con precisión (como la reducción de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistividad > 5% ± 1%).

(4) Resultados de ejemplo

WC10Ni (Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm) se probó mediante el método de cuatro sondas y la resistividad fue estable a 11 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, y la conductividad alcanzó 9,1 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m, lo que cumple plenamente con los requisitos de conductividad de los contactos electrónicos (como relés e interruptores) (resistencia de contacto < 0,1 mΩ). En comparación con el WC12Co no optimizado (resistividad 13 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, conductividad 7,7 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m), la resistividad del WC10Ni disminuyó aproximadamente un 15 % ± 2 % en condiciones de 23 °C ± 2 °C y 50 % ± 5 % de humedad, lo que confirma el efecto sinérgico de la optimización de la composición y el tratamiento superficial. En aplicaciones con herramientas inteligentes, la baja resistividad del WC10Ni permite una electroerosión eficiente (tiempo de descarga < 0,1 ms ± 0,01 ms) y una vida útil de > 5000 m ± 500 m.

9.1.1.4.8 Efecto de optimización integral de la conductividad del carburo cementado

A través de la aplicación integral de las estrategias anteriores, por ejemplo, la resistividad de la aleación WC10Ni se puede optimizar a 10,8 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm en las condiciones de sinterización al vacío a 1450 °C ± 10 °C (presión < 10⁻³ Pa ± 10⁻⁴ Pa), tamaño de grano 0,5 μm ± 0,01 μm y pulido a Ra 0,04 μm ± 0,01 μm, que es inferior al valor objetivo de 12 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, y la conductividad aumenta a 9,3 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m. Este efecto de optimización se debe a la continuidad de la red de fase de enlace (> 96% ± 2%), la optimización de la densidad del límite de grano (> 10¹⁴ m⁻²) y la reducción de la resistencia de contacto superficial (< 1 mΩ·cm²). Además, la sustitución de Ni (8%-10% ± 0,1%) y el tratamiento de superficie mejoran significativamente la resistencia a la corrosión (densidad de corriente de corrosión i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²) y el rendimiento de contacto (área de contacto > 95% ± 2%), lo que lo convierte en un excelente actor en componentes electrónicos de alta confiabilidad (por ejemplo, sensores aeroespaciales, implantes médicos).

En comparación con el WC12Co no optimizado (resistividad 13 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, tasa de corrosión 0,02 mm/año), el WC10Ni optimizado tiene una reducción de resistividad de aproximadamente el 17 % ± 2 %, una mejora de la resistencia a la corrosión de aproximadamente el 20 % ± 2 % (< 0,01 mm/año) y una vida útil extendida a > 10⁴ horas ± 10³ horas.

El carburo cementado optimizado no solo cumple con los requisitos de conductividad eléctrica (resistividad < 12 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, conductividad > 9 × 10⁶ S/m ± 0,1 × 10⁶ S/m) sino que también tiene en cuenta la resistencia mecánica (dureza HV 1450 ± 30, K1c K_{1c} K1c 16 MPa·m^{1/2} ± 0,5) y la vida útil (vida útil por fatiga > 10⁶ veces ± 10⁵ veces).

En herramientas inteligentes, la eficiencia de corte aumentó > 20 % ± 2 % (reducción del tiempo de procesamiento del 15 % ± 2 %), en sensores de aviación, el tiempo de respuesta fue de 0,8 ms ± 0,1 ms, la resistencia a altas temperaturas fue de > 400 °C, la vida útil por fatiga fue de > 10⁶ veces ±

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^{-5} veces; en implantes médicos, la compatibilidad fue $> 95 \% \pm 2 \%$, la biocorrosión fue $< 0,01$ mm/año, lo que proporciona soluciones eficientes y fiables para aplicaciones industriales. Estas estrategias promueven conjuntamente la aplicación generalizada del carburo cementado en electrónica, aviación, fabricación de herramientas, ingeniería médica y naval. En el futuro, se podrá utilizar nanotecnología (grano $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) o revestimiento conductor multicapa (espesor $2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar aún más su rendimiento en entornos extremos (como $> 500 \text{ }^\circ\text{C}$ o humedad alta $> 90 \% \pm 5 \%$).

La optimización de la conductividad del carburo cementado requiere un control preciso de la composición (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, tamaño de grano $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), optimización del proceso (sinterización al vacío a $1450 \text{ }^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$), tratamiento de la superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y sustitución de Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$). La prueba de alta precisión del método de cuatro sondas (precisión $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) garantiza la verificación del efecto de la optimización, combinado con el análisis SEM y EDS de la microestructura (red de fase de enlace $> 95\% \pm 2\%$), proporcionando una base científica para el proceso de optimización.

Estas estrategias no solo mejoran la conductividad eléctrica ($> 9 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), sino que también mejoran la resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y las propiedades mecánicas (dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$), lo que promueve la aplicación innovadora del carburo cementado en la fabricación inteligente, la ingeniería aeroespacial y biomédica. En el futuro, se podrá explorar el diseño de materiales compuestos multifuncionales para cumplir con requisitos más exigentes.

9.1.1.5 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo

Gracias a sus excelentes propiedades eléctricas y mecánicas, el carburo cementado con conductividad optimizada ha demostrado ventajas significativas en diversos campos de la ingeniería. Mediante estrategias como la optimización de la composición (como un contenido de Co/Ni controlado al $10 \% \pm 1 \%$), el control de la microestructura (como un tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el tratamiento superficial (como un $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), se han mejorado significativamente la resistividad y la conductividad eléctrica del carburo cementado, lo que le permite un excelente rendimiento en entornos de alta demanda. Combinado con alta dureza ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), tenacidad a la fractura ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia a la corrosión (densidad de corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), el carburo cementado optimizado presenta amplias posibilidades de aplicación en los campos de la electrónica, la aviación, la fabricación y las tecnologías emergentes. A continuación, se presentan las principales aplicaciones de ingeniería y el rendimiento de la optimización de la conductividad del carburo cementado, complementadas con análisis microscópicos, datos experimentales y casos reales, para explorar a fondo su valor ingenieril.

9.1.1.5.1 Contactos eléctricos de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Escenarios de aplicación:

Los contactos electrónicos de carburo se utilizan ampliamente en componentes electrónicos de alta fiabilidad, como relés, interruptores, disyuntores y dispositivos microelectrónicos. Deben presentar baja resistividad, alta resistencia al desgaste y una larga vida útil para soportar frecuentes conmutaciones mecánicas y arcos eléctricos. En particular, en unidades de control electrónico de automoción, sistemas de automatización industrial y electrónica de consumo, los requisitos de estabilidad eléctrica y durabilidad de los contactos son especialmente estrictos. Los materiales tradicionales (como las aleaciones a base de plata) se oxidan y desgastan con facilidad, lo que limita su aplicación.

(2) Rendimiento

La resistividad de WC10Ni (tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) alcanza $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, la conductividad es estable a $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$, y la resistencia de contacto es menor a $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$, lo que es significativamente mejor que el WC10Co tradicional (la resistencia de contacto es de aproximadamente $0,15 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). Su vida útil supera 10^6 veces $\pm 10^5$ veces, superando ampliamente las 5×10^5 veces $\pm 5 \times 10^4$ veces de WC10Co, y la vida útil aumenta en aproximadamente un $100\% \pm 10\%$. La resistencia a la corrosión de Ni ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) mejora aún más la estabilidad de los contactos en entornos húmedos (como humedad $> 80\% \pm 5\%$) o atmósferas corrosivas (como $\text{pH} < 4$), y el espesor de la capa de óxido superficial ($< 5 \text{ nm}$, pico de O $1\text{s} \sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) es significativamente menor que el de Co ($> 10 \text{ nm}$).

(3) Ventajas técnicas

Los granos pequeños y la distribución uniforme de Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) reducen la dispersión de la interfaz (sección transversal de dispersión $< 10^{-18} \text{ m}^2$), optimizan la continuidad de la red conductora (área de contacto $> 95\% \pm 2\%$) y garantizan la estabilidad eléctrica bajo conmutación de alta frecuencia ($> 1 \text{ kHz}$). Combinado con alta dureza ($\text{HV } 1450 \pm 30$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), los contactos WC10Ni aún mantienen baja resistividad ($< 11,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) bajo impacto de arco (corriente $> 10 \text{ A}$), cumpliendo con los requisitos de baja pérdida de potencia de los dispositivos microelectrónicos (como los módulos de sensores).

(4) Ejemplos de aplicación

En las unidades de control electrónico de automoción, los contactos WC10Ni se utilizan ampliamente debido a su baja resistencia de contacto y larga vida útil, lo que reduce la tasa de fallos ($< 1\% \pm 0,5\%$) causada por el desgaste del arco ($< 0,1 \mu\text{m}/\text{tiempo}$). En comparación con los contactos tradicionales de AgCdO (vida útil de 5×10^5 veces, tasa de fallos $> 5\% \pm 1\%$), la fiabilidad mejora en aproximadamente un $80\% \pm 5\%$. En los interruptores domésticos inteligentes, el tiempo de respuesta de los contactos WC10Ni ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) admite el funcionamiento a alta frecuencia, cumpliendo los requisitos de ahorro de energía y larga vida útil ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces).

9.1.1.5.2 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo: electrodo de carburo para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electroerosión por electroerosión

(1) Escenarios de aplicación:

Los electrodos de carburo se utilizan para el mecanizado por electroerosión (EDM) y son especialmente adecuados para el procesamiento de moldes de precisión, piezas metálicas complejas (como aleaciones de titanio y acero inoxidable) y microcomponentes. Se requiere una alta conductividad eléctrica para mejorar la eficiencia de la descarga y reducir el tiempo de procesamiento y la pérdida de electrodos. La fabricación de álabes de motores de aviación, moldes para dispositivos médicos y piezas de automoción exige mayores requisitos de precisión de procesamiento ($<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y durabilidad de los electrodos.

(2) Rendimiento

La conductividad eléctrica de WC10Co (contenido de Co $10\% \pm 1\%$) alcanza $10,5 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$, y la eficiencia de procesamiento supera el $95\% \pm 2\%$, que es mucho más alta que la del electrodo de grafito tradicional (la eficiencia es de aproximadamente $80\% \pm 2\%$). Su precisión de procesamiento se puede controlar a $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, y la rugosidad superficial (Ra) se reduce a $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, que cumple con los requisitos de alta precisión de las palas de motores de aeronaves y los moldes de dispositivos médicos. El electrodo tiene una excelente resistencia al desgaste y la tasa de pérdida ($<0,5\% \pm 0,1\%$) es menor que la del grafito ($>1\% \pm 0,2\%$). La vida útil supera las $100 \text{ horas} \pm 10 \text{ horas}$, lo que es mucho más largo que los electrodos de grafito ($50 \text{ horas} \pm 5 \text{ horas}$).

(3) Ventajas técnicas

La red conductora continua formada por el alto contenido de Co ($10\% \pm 1\%$) mejora la capacidad de transmisión de corriente (densidad de corriente $> 10 \text{ A/mm}^2$). Combinada con la alta dureza ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) y resistencia al calor ($< 400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ deformación) del WC, el electrodo mantiene la integridad estructural bajo descargas de alta energía ($> 50 \mu\text{J}$). El tamaño de grano fino ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reduce las microfisuras ($< 0,1 \mu\text{m}$), optimiza la uniformidad de la descarga (desviación $< 2\% \pm 0,5\%$) y mejora la eficiencia del procesamiento en aproximadamente un $15\% \pm 2\%$. En comparación con el grafito, la baja resistividad del WC10Co ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) acorta el tiempo de descarga ($< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$) y reduce la pérdida de energía en aproximadamente un $10\% \pm 1\%$.

(4) Ejemplos de aplicación

En la fabricación de moldes, los electrodos WC10Co se utilizan para procesar piezas de acero endurecido (dureza $> \text{HRC } 50$), acortando significativamente el tiempo de procesamiento (reducido en un $20\%-30\% \pm 2\%$), y la calidad de la superficie (Ra $< 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) cumple con los requisitos de precisión. En comparación con los electrodos de grafito (Ra $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), el proceso de acabado se reduce en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$. En el campo de la aviación, los electrodos WC10Co procesan hojas de aleación de titanio con una precisión de $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y una vida útil de $> 120 \text{ horas} \pm 10 \text{ horas}$, lo que respalda la producción de alta eficiencia.

9.1.1.5.3 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo: sustrato de revestimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductor de carburo

(1) Escenarios de aplicación

Como sustrato de recubrimiento conductor, el carburo cementado se usa ampliamente en herramientas resistentes al desgaste (como herramientas de corte), componentes electrónicos (como placas de circuitos) y componentes de aviación (como álabes de turbinas). Es necesario considerar la conductividad, la adhesión y el rendimiento de servicio a largo plazo. En entornos corrosivos (como equipos marinos) o condiciones de alta temperatura ($> 400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$), el sustrato debe proporcionar un soporte eléctrico estable y protección mecánica. La baja conductividad de los sustratos de acero tradicionales ($< 5 \times 10^6\text{ S/m}$) limita su aplicación.

(2) Rendimiento:

El WC8Ni (rugosidad superficial $Ra < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) presenta una resistividad de $10,8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ y una conductividad de $9,3 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$. La adhesión del recubrimiento supera los $50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$ y la vida útil supera los $2\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$. En comparación con WC8Co (adhesión de aproximadamente $45\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$), la matriz de Ni exhibe una tasa de corrosión más baja ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$) y una tasa de pérdida de peso ($< 0,05\text{ mg/cm}^2$) en entornos corrosivos (como una solución de NaCl al 3,5%). $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$) es mucho menor que la de Co ($> 0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,02\text{ mg/cm}^2$). El análisis XPS mostró que la capa de pasivación de la superficie de Ni (NiO, espesor $\sim 10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) mejoró la resistencia a la corrosión.

(3) Ventajas técnicas

La baja rugosidad superficial ($Ra < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) reduce la resistencia de contacto ($< 1\text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$), la distribución uniforme de Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la estructura de grano fino ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) mejoran la unión interfacial entre el recubrimiento y el sustrato (área de contacto $> 96\% \pm 2\%$) y extienden la vida útil. Combinado con alta dureza ($HV 1450 \pm 30$) y resistencia al calor (deformación $< 500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$), el sustrato WC8Ni admite el rendimiento estable de recubrimientos multicapa (como TiN, espesor $2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) en entornos corrosivos o de alta temperatura.

(4) Ejemplos de aplicación

En recubrimientos de palas de turbinas eólicas, el recubrimiento resistente al desgaste soportado por el sustrato WC8Ni no tiene degradación significativa después de $2,5\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$ de servicio en un entorno de niebla salina (concentración de NaCl $5\% \pm 0,5\%$), y su conductividad ($> 9 \times 10^6\text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6\text{ S/m}$) y rendimiento de protección (tasa de desgaste $< 0,03\text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{m}$) son mejores que los del sustrato WC8Co convencional ($1,5\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$ de servicio, tasa de desgaste $> 0,05\text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{m}$). En los álabes de turbinas de aviación, el revestimiento de barrera térmica soportado por el sustrato WC8Ni tiene una resistencia a altas temperaturas de $> 1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, y la estabilidad de la conductividad (resistividad $< 11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) favorece la integración del sensor.

9.1.1.5.4 Aplicaciones de ingeniería de la conductividad del carburo: otras aplicaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

potenciales

(1) Materiales de blindaje electromagnético de carburo cementado.

Las aleaciones WC-Ni con conductividad optimizada permiten fabricar paneles ligeros de blindaje electromagnético. Su conductividad eléctrica ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) blindo eficazmente las ondas electromagnéticas de alta frecuencia ($> 1 \text{ GHz}$) con una eficiencia de blindaje de $> 90 \% \pm 2 \%$. Los granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el contenido de Ni ($8 \%-10 \% \pm 0,1 \%$) mejoran la continuidad de la red conductora (área de contacto $> 95 \% \pm 2 \%$), y su densidad ($\sim 12 \text{ g/cm}^3$) también es muy alta. $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) es aproximadamente un $25 \% \pm 2 \%$ menor que el cobre ($8,9 \text{ g/cm}^3$), lo que lo hace adecuado para el diseño liviano de equipos 5G y aviónica.

(2) El conector conductor de carburo

WC10Ni se ha convertido en una nueva opción para reemplazar a las aleaciones de cobre en conectores de alta corriente debido a su baja resistividad ($11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductividad $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$) y resistencia a altas temperaturas ($> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ sin deformación), con una reducción de peso de aproximadamente $30 \% \pm 2 \%$ (densidad 12 g/cm^3 frente a $8,9 \text{ g/cm}^3$). El análisis SEM muestra que el Ni se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y tiene buena resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) compatible con aplicaciones de cables marinos.

(3) Elementos de sensor de carburo

La aleación WC-Co-Ni de grano fino se utiliza como material de electrodo para sensores de presión y temperatura de alta precisión debido a sus propiedades eléctricas estables (resistividad $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductividad $9,1 \times 10^6 \text{ S/m} \pm 0,1 \times 10^6 \text{ S/m}$), con un tiempo de respuesta de $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ y una precisión de $> 99 \% \pm 0,5 \%$. Las características de respuesta inteligente de NiTi $3 \% \pm 0,1 \%$ (tasa de deformación $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$) admiten la monitorización dinámica y son adecuadas para sensores de aviación y automatización industrial.

9.1.1.5 Beneficios integrales de las aplicaciones de ingeniería de la conductividad del carburo cementado

Estas aplicaciones demuestran que los carburos cementados con conductividad eléctrica optimizada mejoran significativamente la fiabilidad en el sector electrónico. Por ejemplo, la baja resistencia de contacto ($< 0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$) de los contactos electrónicos WC10Ni en conmutación de alta frecuencia ($> 1 \text{ kHz}$) prolonga la vida útil del dispositivo ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) y reduce la tasa de fallos a $< 1 \% \pm 0,5 \%$. La alta eficiencia ($> 95 \% \pm 2 \%$) de los electrodos WC10Co en electroerosión reduce los costes de producción (entre un 20% y un $30 \% \pm 2 \%$) y mejora la calidad superficial ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en aproximadamente un $50 \% \pm 5 \%$. La vida útil a largo plazo ($> 2,5$ años $\pm 0,2$ años) del sustrato de revestimiento WC8Ni en entornos hostiles (como niebla salina, $\text{NaCl } 5 \% \pm 0,5 \%$) satisface las necesidades industriales y la resistencia al desgaste ($< 0,03 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$) es mejor que la de los materiales tradicionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El carburo cementado optimizado tiene baja resistividad ($< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductividad $> 10 \text{ MS/m} \pm 0,1 \text{ MS/m}$), alta conductividad eléctrica y excelentes propiedades mecánicas (dureza $\text{HV } 1450 \pm 30$, $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), ampliando con éxito sus perspectivas de aplicación en contactos electrónicos, electrodos EDM, sustratos de revestimiento conductores, materiales de blindaje electromagnético, conectores conductores y elementos sensores. En la fabricación inteligente, los contactos WC10Ni admiten una conmutación eficiente (tiempo de respuesta $< 0,1 \text{ ms} \pm 0,01 \text{ ms}$), y los electrodos WC10Co mejoran la eficiencia de producción de moldes ($> 20\% \pm 2\%$); En el sector aeroespacial, los sustratos WC8Ni y los sensores WC-Co-Ni garantizan una alta estabilidad de temperatura y alta precisión ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$); en ingeniería marina, los conectores WC10Ni tienen resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) que extiende la vida útil ($> 10^4 \text{ horas} \pm 10^3 \text{ horas}$).

La aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo cementado se beneficia del efecto sinérgico de la optimización de la composición (Co/Ni $10\% \pm 1\%$, tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), control de proceso (sinterización al vacío a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$) y tratamiento de superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Su excelente rendimiento en contactos electrónicos (vida útil $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces), electrodos EDM (eficiencia $> 95\% \pm 2\%$) y sustratos de revestimiento conductor (vida útil > 2 años $\pm 0,2$ años) verifica el valor práctico de la optimización de la conductividad. Además, el potencial de los materiales de blindaje electromagnético (eficiencia de blindaje $> 90\% \pm 2\%$), los conectores conductores (reducción de peso del $30\% \pm 2\%$) y los elementos sensores (tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) demuestra que el carburo cementado optimizado puede ampliarse aún más a los campos de la tecnología 5G, la aviónica y la atención médica inteligente, lo que proporciona una referencia importante para el desarrollo de materiales de alto rendimiento. En el futuro, sus capacidades de aplicación en entornos extremos ($> 500 \text{ }^\circ\text{C}$ o alta humedad $> 90\% \pm 5\%$) pueden mejorarse mediante nanogranos ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) o diseño de gradiente funcional.

9.1.2 Pruebas magnéticas y control de calidad del carburo cementado

Las propiedades magnéticas del carburo cementado y su tecnología de detección desempeñan un papel fundamental en los ensayos no destructivos, el control de calidad y la predicción de propiedades mecánicas. Estas propiedades se deben principalmente al ferromagnetismo de la fase de enlace y se ven afectadas por los efectos combinados de la microestructura, la distribución de la composición y el estado de los defectos. Mediante ensayos y análisis magnéticos precisos, es posible evaluar eficazmente la calidad interna, la uniformidad y la consistencia del rendimiento del carburo cementado, lo que proporciona una garantía fiable para aplicaciones industriales. Esta sección analiza exhaustivamente la base científica y el valor práctico de la detección magnética y el control de calidad del carburo cementado, explorando en profundidad el mecanismo magnético, la tecnología de ensayo y las aplicaciones de ingeniería, combinando datos experimentales y la caracterización microscópica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías magnéticas del carburo cementado

Principio del magnetismo del carburo

Las propiedades magnéticas del carburo cementado están determinadas principalmente por el ferromagnetismo de la fase de enlace. Sus parámetros magnéticos incluyen la magnetización de saturación, que suele ser inferior a $10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, y la coercitividad, que es de aproximadamente $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. Estas propiedades le confieren un gran valor aplicativo en ensayos no destructivos, control de calidad y predicción de propiedades mecánicas, y pueden reflejar la distribución de la fase de enlace, el estado del grano y los defectos internos. Combinado con una alta dureza ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), tenacidad a la fractura ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{m}$), los ensayos magnéticos proporcionan un medio técnico clave para la optimización del rendimiento y la consistencia de la producción del carburo cementado. Esta sección realiza un análisis exhaustivo a través del mecanismo magnético, la tecnología de pruebas y la aplicación de ingeniería, con el objetivo de revelar la relación intrínseca entre las propiedades magnéticas y la microestructura y las propiedades mecánicas.

(1) Contribución del ferromagnetismo del Co

El magnetismo del carburo cementado proviene principalmente del ferromagnetismo del Co, cuyo momento magnético es de aproximadamente $1,7 \mu_B \pm 0,1 \mu_B$ (magnetón de Bohr), que proviene del espín y movimiento orbital de los electrones desapareados de los átomos de Co. El Co forma una red continua como fase de enlace, y su contenido y distribución afectan directamente la magnetización y la fuerza coercitiva. Cuando el contenido de Co es del $10 \% \pm 1 \%$, las propiedades magnéticas alcanzan el equilibrio, la magnetización de saturación es estable a $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la fuerza coercitiva es de aproximadamente $100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, y los dominios magnéticos se distribuyen uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Un contenido de Co demasiado alto ($> 12 \% \pm 1 \%$) provoca un aumento de la magnetización a $> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, pero reduce K_{1c} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) debido al debilitamiento del límite de grano (densidad de microfisuras $> 10^3 \text{ m}^{-2} \pm 0,5$), mientras que un contenido de Co demasiado bajo ($< 8 \% \pm 1 \%$) reduce la magnetización a $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ debido a la interrupción de la red conductora. El análisis SEM muestra que la homogeneidad del Co (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) es la clave para mantener la estabilidad magnética.

(2) Propiedades no magnéticas del WC

El WC en sí es un material no magnético con una intensidad de magnetización inferior a $0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g}$. Su estructura de enlace covalente (energía de enlace WC $\sim 4 \text{ eV}$) limita la contribución del espín del electrón y tiene poco efecto en el magnetismo general. La detección XPS muestra que no hay una señal magnética significativa en la superficie del WC (momento magnético $< 0,01 \mu_B$). Su función principal es proporcionar alta dureza ($> 1500 \text{ HV} \pm 30$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{m}$), mientras que las propiedades magnéticas dependen casi por completo de la fase Co. El tamaño de grano del WC ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) regula indirectamente los parámetros magnéticos al afectar la distribución de Co, pero su propia contribución a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

magnetización es insignificante.

(3) Efecto microestructural La uniformidad de

la fase de Co y la distribución del límite de grano determinan la formación y orientación de los dominios magnéticos. Cuando la desviación de la distribución de Co es $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, la intensidad de magnetización se estabiliza en $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la fuerza coercitiva se mantiene en $100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$ y la consistencia de la respuesta del campo magnético es $(> 95 \% \pm 2 \%)$. La segregación $(> 0,5 \% \pm 0,1 \%)$ provocará inhomogeneidad magnética local, el rango de fluctuación de la intensidad de magnetización aumenta a $\pm 1 \text{ emu/g}$ y la fuerza coercitiva puede ascender a $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, lo que reduce la precisión de detección. El análisis EDS muestra que el contenido de Co en la zona de segregación puede alcanzar el $15\% \pm 1\%$, formando una región de alta magnetización $(> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g})$, mientras que la densidad del límite de grano $(> 10^{14} \text{ m}^{-2})$ afecta aún más la coercitividad al limitar el crecimiento de los dominios magnéticos.

(4) Los defectos que afectan

la porosidad interna (porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ son cruciales para la uniformidad del flujo magnético. La porosidad o las microfisuras $(< 0,1 \mu\text{m}, \text{ densidad } > 10^2 \text{ m}^{-2})$ dispersarán el campo magnético y debilitarán la intensidad de magnetización (reducción $> 5 \% \pm 1 \%$). Las observaciones con microscopio electrónico de barrido (SEM) muestran que, cuando la porosidad es $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, la intensidad de magnetización puede descender a $7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, y la fuerza coercitiva fluctúa en $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$, lo que afecta la sensibilidad de los ensayos no destructivos $(< 90 \% \pm 2 \%)$. Las microfisuras también pueden causar concentración de tensión local $(> 50 \text{ MPa})$, reduciendo aún más K_{1c} $(< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5)$, por lo que es importante controlar el proceso de sinterización (por ejemplo, sinterización al vacío a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para mantener baja la porosidad.

Tecnología de pruebas magnéticas de carburo cementado

(1) Instrumentos y parámetros El

magnetómetro de muestra vibrante (VSM) comúnmente usado para detección magnética tiene una precisión de medición de $\pm 0,1 \text{ emu/g}$ y una sensibilidad de $> 99 \% \pm 0,5 \%$, lo cual es adecuado para la caracterización precisa de materiales magnéticos traza. Durante la prueba, la intensidad del campo magnético aplicado es de $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ y el tamaño de la muestra es de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ para asegurar la representatividad de los resultados de la medición (error $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$). El entorno de prueba debe controlarse a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad $< 65 \% \pm 5 \%$ para evitar la deriva de los parámetros magnéticos $(< 0,1 \text{ emu/g} \pm 0,01 \text{ emu/g})$ causada por la temperatura $(> 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C})$ o la humedad $(> 80 \% \pm 5 \%)$.

(2) Indicadores de medición

La magnetización de saturación y la coercitividad se midieron por VSM para evaluar la uniformidad y los defectos internos de la fase Co. La magnetización está correlacionada positivamente con el contenido de Co ($R^2 > 0,95$), y cada incremento del 1% de Co corresponde a un aumento en la magnetización de aproximadamente $0,8 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$; la coercitividad se ve afectada por el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tamaño de grano y el estado de tensión. Cuando el tamaño de grano es de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la coercitividad es estable a $100\text{-}120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, y cuando el tamaño de grano es $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, se eleva a $> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. Combinado con el análisis del bucle de histéresis, los cambios en la magnetización y la coercitividad pueden reflejar la uniformidad de la microestructura (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(3) Sensibilidad y precisión

La sensibilidad de la detección magnética es $> 95\% \pm 2\%$, y la tasa de defectos se controla a $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Puede detectar poros ($> 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) o microfisuras ($> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Por ejemplo, la intensidad de magnetización de la muestra WC10Co es $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, la fuerza coercitiva es $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, y la precisión de detección supera el $98\% \pm 1\%$, lo que muestra una alta confiabilidad. En comparación con las pruebas de partículas magnéticas tradicionales (sensibilidad $\sim 90\% \pm 2\%$), VSM es más adecuado para el análisis cuantitativo de defectos internos de carburo cementado debido a su alta resolución ($< 0,1 \text{ emu/g}$).

(4) Análisis de datos

Combinando SEM y EDS para analizar la distribución de Co, confirmar el área de segregación ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la porosidad ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), y calibrar aún más la relación entre los parámetros magnéticos y la microestructura. Las imágenes SEM muestran que la intensidad de magnetización en el área de segregación de Co aumenta localmente ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), y la detección EDS verifica la fluctuación del contenido de Co ($< 0,5\% \pm 0,1\%$), lo cual es consistente con los datos VSM. Después de la corrección de datos, la desviación de la intensidad de magnetización se reduce a $\pm 0,2 \text{ emu/g}$, y la fluctuación de la fuerza coercitiva se controla a $\pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$, lo que garantiza la precisión del control de calidad ($> 99\% \pm 0,5\%$).

9.1.2.2 Análisis del mecanismo magnético del carburo cementado

Las propiedades magnéticas de los carburos cementados están determinadas principalmente por el ferromagnetismo de la fase de enlace (como cobalto (Co) o níquel (Ni)), y su mecanismo involucra múltiples factores como el espín electrónico, la microestructura y el proceso de preparación. Combinado con alta dureza ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), tenacidad a la fractura ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$), las propiedades magnéticas proporcionan una base importante para pruebas no destructivas y control de calidad. A continuación se discute el mecanismo del magnetismo del carburo cementado en detalle a través de la fuente de magnetismo, influencia microscópica, interfaz de fase y continuidad de red, detección y correlación de rendimiento, y efectos ambientales y de temperatura, y revela sus leyes internas combinando datos experimentales y análisis microscópicos.

9.1.2.2.1 Fuente de magnetismo de carburo

(1) Espín electrónico tridimensional del Co.

El magnetismo del Co se origina en su capa electrónica tridimensional vacía. El momento magnético

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

generado por el espín es de aproximadamente $1,7 \mu\text{B} \pm 0,1 \mu\text{B}$ (magnetón de Bohr), que forma un orden ferromagnético mediante el acoplamiento espín-órbita. La magnetización de saturación (Magnetización de saturación, M_s) es proporcional a la fracción de volumen del Co (f_{Co}), que puede calcularse mediante la siguiente ecuación:

$$M_s \approx f_{\text{Co}} \cdot M_{\text{Co}}$$

Donde f_{Co} es la fracción volumétrica de Co ($10 \% \pm 1 \%$) y M_{Co} es la magnetización del Co puro (aproximadamente $160 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$). Por lo tanto, con un contenido de Co del 10% , el M_s teórico es de aproximadamente 16 emu/g , pero en realidad se reduce a $8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ debido a limitaciones microestructurales (dispersión del límite de grano, efectos de defectos). La detección por XPS muestra que la posición del pico 3d de Co ($\sim 778 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) confirma su contribución de electrones desapareados, y la estabilidad magnética depende de la continuidad de la red de Co ($> 95 \% \pm 2 \%$).

(2) Ferromagnetismo débil de Ni

Cuando se añade Ni (contenido $8\%-10\% \pm 0,1\%$) como fase de enlace, su momento magnético es solo $0,6 \mu_{\text{B}} \pm 0,1 \mu_{\text{B}}$, que es un material ferromagnético débil, lo que resulta en una disminución significativa de la magnetización ($< 5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Ni tiene un alto grado de apareamiento de electrones 3d (alrededor de $0,6 \mu_{\text{B}} / \text{átomo}$), un orden ferromagnético débil y una magnetización de saturación de aproximadamente $55 \text{ emu/g} \pm 5 \text{ emu/g}$ (Ni puro), pero en carburo cementado cae a $4-5 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ debido al efecto de dilución. Aunque la introducción de Ni mejora la resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), debilita el magnetismo general y es adecuado para aplicaciones que requieren bajo magnetismo pero alta resistencia a la corrosión (como equipos marinos).

9.1.2.2.2 Efecto de la microestructura en las propiedades magnéticas del carburo cementado

(1) Tamaño de grano y coercitividad

el tamaño de grano es de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano es alta ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), lo que dificulta la conmutación de dominios magnéticos. La energía de conmutación es de aproximadamente $10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$, lo que resulta en un aumento de la coercitividad a $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, y la respuesta magnética es más sensible a los cambios en el campo magnético externo. Los granos más gruesos ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reducen la dispersión del límite de grano, reducen la resistencia a la conmutación del dominio magnético y la coercitividad puede caer a $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, pero la fluctuación de la intensidad de magnetización aumenta a $\pm 0,5 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$. El análisis SEM mostró que las muestras de grano fino tenían una orientación de dominio magnético consistente ($> 95\% \pm 2\%$), mientras que las muestras de grano grueso tenían una distribución magnética desigual (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$).

(2) Temperatura de sinterización y distribución de Co

La temperatura de sinterización de $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ garantiza una distribución uniforme de la fase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), manteniendo estable la magnetización ($8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) y la coercitividad ($100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Sin embargo, cuando la temperatura supera los $1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, se produce segregación de Co ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), el contenido local de Co aumenta al $15 \% \pm 1 \%$, formando un área de alta magnetización ($> 10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), la desviación de la magnetización aumenta aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$ y la fluctuación de la coercitividad se intensifica ($> 130 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). La detección de EDS confirmó que la oxidación del límite de grano (posición máxima de O $1s \sim 532 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) en la zona de segregación aumentó ($> 0,5 \% \pm 0,1 \%$), lo que afectó la consistencia magnética.

(3) Defectos y poros

Los defectos internos (p. ej., poros $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, densidad $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) aumentan la coercitividad en aproximadamente un $5 \% \pm 1 \%$ (hasta $125 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) al dispersar el campo magnético. Las muestras de alta densidad con porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ tienen propiedades magnéticas más estables y una consistencia de magnetización mejorada (desviación $< \pm 0,2 \text{ emu/g}$), mientras que cuando la porosidad $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, la magnetización cae a $7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ y la uniformidad del flujo disminuye ($< 90 \% \pm 2 \%$). Las microfisuras también pueden inducir tensión local ($> 50 \text{ MPa}$), reduciendo K_{1c} ($< 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), que debe controlarse mediante sinterización al vacío (presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$).

9.1.2.2.3 Continuidad de la interfaz y red de fase magnética de carburo cementado

(1)

Los análisis SEM y EDS de la red de fase de Co muestran que la continuidad de la fase de Co en WC10Co supera el $95 \% \pm 2 \%$, lo que forma una ruta de conductividad magnética eficiente. La uniformidad de la red de Co determina directamente la distribución espacial de la intensidad de magnetización. Las propiedades magnéticas son óptimas cuando la desviación es $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ (M_s $8-9 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, fuerza coercitiva $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). Una interrupción de la red de Co (como una porosidad $> 0,1 \% \pm 0,02 \%$) provocará una pérdida de flujo magnético ($> 5 \% \pm 1 \%$), y la intensidad de magnetización disminuirá aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$.

(2) Efecto de sustitución de Ni

En la muestra WC10Ni, el magnetismo débil de la fase Ni reduce M_s a $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, y la coercitividad es de aproximadamente $110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, pero su uniformidad de distribución (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) compensan la pérdida de magnetismo, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren bajo magnetismo pero alta resistencia a la corrosión (como implantes médicos). La estructura de grano fino de la fase Ni ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la estabilidad del dominio magnético y el rango de fluctuación se reduce a $\pm 0,1 \text{ emu/g}$.

(3)

Dispersión de interfaz El desajuste de red ($\sim 5\% \pm 1\%$) en la interfaz WC/Co induce dispersión adicional, lo que afecta la orientación del dominio magnético, lo que resulta en un aumento de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

coercitividad de aproximadamente $5\% \pm 1\%$ (a $125 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$). La optimización del proceso de sinterización (p. ej., sinterización graduada, presinterización a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y luego aumento a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) puede reducir los defectos de interfaz ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), mejorar la estabilidad magnética (desviación $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$) y mejorar K_{1c} ($> 15,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.2.2.4 Correlación entre las pruebas magnéticas y el rendimiento del carburo cementado

(1) Medición VSM

El magnetómetro de muestra vibrante (VSM) tiene una precisión de medición de $\pm 0,1 \text{ emu/g}$. Cuando el campo magnético aplicado es de $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, el M_s de WC10Co es de $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ y la coercitividad es de $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$; el M_s de WC10Ni cae a $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ y la coercitividad es de aproximadamente $110 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. El bucle de histéresis muestra que WC10Co tiene una saturación de magnetización rápida ($< 0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), mientras que WC10Ni requiere un campo magnético más alto ($> 0,7 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), lo que refleja la influencia del contenido de Co/Ni y la microestructura.

(2) Identificación de defectos

Las pruebas magnéticas pueden identificar grietas ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, densidad $> 10^2 \text{ m}^{-2}$) y desviación del contenido de carbono ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$). El exceso de carbono ($> 6,13\%$ en peso $\pm 0,01\%$) o la cantidad insuficiente de carbono ($< 6,13\%$ en peso $\pm 0,01\%$) cambia las propiedades de la interfaz WC/Co, lo que afecta la intensidad de magnetización (disminución $> 5\% \pm 1\%$) y la coercitividad (aumento $> 10\% \pm 2\%$). Las imágenes SEM muestran que el Co se distribuye de forma desigual en el área de desviación del carbono (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$), y la fluctuación de los parámetros magnéticos se agrava.

(3) Correlación mecánica

La coercitividad está correlacionada negativamente con la tenacidad a la fractura (K_{1c}) (coeficiente de correlación $> -0,9 \pm 0,05$). Las muestras de alta coercitividad (como $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) generalmente corresponden a una K_{1c} más baja ($< 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) porque la dispersión del límite de grano limita la energía de inversión del dominio magnético ($> 10^{-19} \text{ J} \pm 10^{-20} \text{ J}$). Las muestras de baja coercitividad (como $80 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) corresponden a una K_{1c} más alta ($> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), lo que proporciona una referencia para la evaluación de la propiedad mecánica.

9.1.2.2.5 Efectos ambientales y de temperatura sobre las propiedades magnéticas del carburo cementado

(1) Efecto de la temperatura

En el rango de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $200 \text{ }^\circ\text{C}$, la intensidad de magnetización disminuye ligeramente con el aumento de la temperatura ($< 5\% \pm 1\%$) debido a la vibración térmica que mejora la dispersión del dominio magnético (aumento de la sección transversal de dispersión $> 10\% \pm 2\%$). Por encima de $300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la fase Co comienza a ablandarse (punto de fusión $1495 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), el magnetismo decae significativamente (M_s cae a $< 6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) y la coercitividad fluctúa en $\pm 20 \text{ Oe} \pm 2 \text{ Oe}$. La fase Ni (punto de fusión $1455 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) es ligeramente más estable a altas temperaturas,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con una disminución de aproximadamente $3\% \pm 1\%$, lo que es adecuado para entornos de alta temperatura (como componentes de aviación).

(2) Efecto de corrosión

La baja tasa de corrosión de la fase Ni en un entorno húmedo (como 3,5% NaCl, humedad $> 80\% \pm 5\%$) ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) hace que su estabilidad magnética sea mejor que la del Co ($i_{\text{corr}} \sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), y prolonga la vida útil ($> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas). La detección XPS muestra que se forma una capa de pasivación (NiO, espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) en la superficie del Ni, y el aumento de la posición del pico de O 1s es $< 0,1\% \pm 0,01\%$, lo que reduce la atenuación magnética.

El mecanismo magnético del carburo cementado se origina a partir del espín de los electrones de Co 3d, M_s es proporcional al contenido de Co (el valor teórico se reduce a $8-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ debido a limitaciones microscópicas), y el tamaño de grano ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la temperatura de sinterización ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) regulan la coercitividad ($100-120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) a través de la densidad del límite de grano y la uniformidad de la distribución de Co (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$). La sustitución de Ni reduce M_s (a $4 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$) pero mejora la resistencia a la corrosión, y los defectos microscópicos (porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la dispersión de la interfaz (desajuste de red $\sim 5\% \pm 1\%$) afectan aún más las propiedades magnéticas. La detección VSM (precisión $\pm 0,1 \text{ emu/g}$) combinada con el análisis SEM y EDS optimiza la composición (Co $10\% \pm 1\%$) y el proceso (sinterización al vacío), proporcionando una base para la calibración de parámetros magnéticos (desviación de $M_s < \pm 0,2 \text{ emu/g}$, fluctuación de la fuerza coercitiva $< \pm 5 \text{ Oe} \pm 1 \text{ Oe}$).

En el futuro, las propiedades magnéticas y el potencial de aplicación del carburo cementado se pueden mejorar aún más mediante el control del grano fino ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la reducción de la segregación ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), especialmente en altas temperaturas ($> 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) o entornos corrosivos ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$).

9.1.2.3 Análisis de los factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado

Las propiedades magnéticas de los carburos cementados se ven afectadas por una combinación de factores, incluyendo el contenido de la fase de enlace, parámetros microestructurales, proceso de preparación y composición química. Estos factores regulan significativamente la magnetización de saturación (M_s) y la coercitividad al afectar la distribución de la fase ferromagnética, el comportamiento de los dominios magnéticos y el estado de los defectos. Combinado con alta dureza ($> \text{HV } 1400 \pm 30$), tenacidad a la fractura ($K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0.5$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0.05 \text{ mm}^3 / \text{m} \pm 0.01 \text{ mm}^3 / \text{m}$), las propiedades magnéticas proporcionan una base clave para pruebas no destructivas y control de calidad. El siguiente es un análisis detallado de los principales factores de influencia y su papel se verifica por ejemplos, con el objetivo de proporcionar una guía científica para el diseño de procesos de optimización magnética.

9.1.2.3.1 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - Contenido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobalto

(1) Mecanismo de influencia:

El Co es una fase ferromagnética, y su contenido determina directamente la intensidad de magnetización. Cuando el contenido de Co es del $10\% \pm 1\%$, el M_s es de aproximadamente $8 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, lo que permite que las propiedades magnéticas sean estables y que la conectividad de la red magnética ($> 95\% \pm 2\%$) y la uniformidad (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) estén equilibradas. Cuando el contenido de Co supera el $12\% \pm 1\%$, el M_s aumenta aproximadamente un $20\% \pm 3\%$ (hasta $9,6-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$). Esto se debe a que una mayor fracción de volumen de Co mejora la trayectoria de permeabilidad magnética, pero al mismo tiempo puede provocar un debilitamiento del límite de grano (densidad de microfisuras $> 10^3 \text{ m}^{-2}$) y reducir K_{1c} ($< 13,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). $\pm 0,5$). Cuando el contenido de Co es inferior al $8\% \pm 1\%$, la magnetización disminuye a $< 7 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$ debido al aumento de las pérdidas de flujo ($> 5\% \pm 1\%$) debido a la interrupción de la red de Co.

(2) Intercambio de rendimiento:

Si bien un alto contenido de Co ($> 15\% \pm 1\%$) mejora la M_s ($> 12 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$), puede causar segregación ($> 0,5\% \pm 0,1\%$), aumentar la inconsistencia magnética local (desviación $> 1 \text{ emu/g}$) y reducir la tenacidad y la resistencia al desgaste (velocidad de desgaste $> 0,1 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$). La segregación debe evitarse mediante el control del proceso (como la sinterización graduada) para garantizar la optimización coordinada de las propiedades magnéticas y mecánicas.

(3) Análisis de ejemplo:

Debido al alto contenido de Co ($12\% \pm 1\%$), el M_s de la muestra WC12Co aumentó a $9,6 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, mostrando una fuerte respuesta magnética (saturación del campo magnético $< 0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$), pero el análisis SEM reveló microfisuras en los límites de grano (densidad $> 10^3 \text{ m}^{-2}$), y K_{1c} cayó a $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que indica que un alto contenido de Co debe combinarse con la optimización de la microestructura.

9.1.2.3.2 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado: tamaño del grano

(1) Mecanismo de influencia:

El tamaño de grano afecta la densidad del límite de grano y el movimiento de la pared del dominio. Cuando el tamaño de grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano es alta ($> 10^4 \text{ m}^{-2}$), lo que dificulta el movimiento de la pared del dominio, mantiene una alta coercitividad (aproximadamente $120 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$) y mejora la sensibilidad de la respuesta magnética ($> 95\% \pm 2\%$). Si el tamaño del grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la cantidad de límites de grano disminuye, la resistencia al movimiento de la pared del dominio disminuye y la coercitividad disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (a $108 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$), pero la fluctuación de la intensidad de magnetización aumenta a $\pm 0,5 \text{ emu/g} \pm 0,1 \text{ emu/g}$ debido a la concentración desigual del flujo magnético.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Efectos microscópicos

La estructura de grano fino ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la dispersión de la fase Co (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y aumenta la dispersión magnética (sección transversal de dispersión $< 10^{-18} \text{m}^2$), pero aumenta la dureza del material ($\text{HV } 1450 \pm 30$) y K_{1c} ($> 15 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$); los granos gruesos ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) favorecen la concentración del flujo magnético y son adecuados para aplicaciones de baja coercitividad (como el blindaje electromagnético), pero la dureza disminuye ($< \text{HV } 1400 \pm 30$).

(3) Optimización del proceso:

Al agregar inhibidores de grano (como VC 0,5%-1% o $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1\%$), los granos se pueden estabilizar en el rango de $0,5\text{-}1 \mu\text{m}$, se puede reducir la energía del límite del grano ($< 1 \text{J/m}^2$), se puede reducir la dispersión magnética y se puede controlar la fluctuación de la fuerza coercitiva dentro de $\pm 5 \text{Oe} \pm 1 \text{Oe}$, teniendo en cuenta las propiedades magnéticas y mecánicas.

9.1.2.3.3 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado: adición de níquel

(1) Mecanismo de influencia

El Ni es una fase ferromagnética débil (momento magnético de $0,6 \mu_{\text{B}} \pm 0,1 \mu_{\text{B}}$). Cuando su cantidad de adición es del $8\%\text{-}10\% \pm 0,1\%$, M_s disminuye aproximadamente un $40\% \pm 5\%$ (a $4\text{-}5 \text{emu/g} \pm 0,5 \text{emu/g}$) en comparación con WC-Co, porque la intensidad de magnetización del Ni (aproximadamente $55 \text{emu/g} \pm 5 \text{emu/g}$) es mucho menor que la del Co ($160 \text{emu/g} \pm 5 \text{emu/g}$). Cuando el contenido de Ni supera el $12\% \pm 0,1\%$, K_{1c} disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ ($< 13,5 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), lo que está relacionado con los límites de grano débiles (densidad de microfisuras $> 10^3 \text{m}^{-2}$) causados por el exceso de Ni, y la conectividad de la red magnética ($< 90\% \pm 2\%$) también se ve afectada.

(2) Ventajas y limitaciones

El Ni mejora la resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{A/cm}^2$), y la tasa de pérdida de peso en un entorno húmedo (como NaCl al 3,5%) ($< 0,05 \text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{mg/cm}^2$) es mucho menor que la del Co ($> 0,1 \text{mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{mg/cm}^2$), pero su magnetismo débil limita sus aplicaciones de alta intensidad de magnetización (como el blindaje electromagnético que requiere $M_s > 10 \text{emu/g} \pm 0,5 \text{emu/g}$).

(3) Efecto de distribución: La distribución uniforme de

Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) puede reducir las fluctuaciones magnéticas (desviación $M_s < 0,2 \text{emu/g}$). El análisis SEM muestra que la continuidad de la red de Ni de WC10Ni es $> 95\% \pm 2\%$, lo que la hace más estable que la de WC10Co (segregación de Co $> 0,5\% \pm 0,1\%$).

9.1.2.3.4 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - Proceso de sinterización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Mecanismo de influencia

La temperatura de sinterización de $1450\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ garantiza una distribución uniforme de Co o Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), una magnetización estable ($8-9\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$) y una coercitividad ($100-120\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$). Cuando la temperatura supera los $1500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, la segregación de la fase de enlace aumenta aproximadamente un $15\% \pm 3\%$ (contenido local de Co/Ni $> 15\% \pm 1\%$), lo que resulta en una inconsistencia magnética local (desviación de $M_s > 1\text{ emu/g}$) y la coercitividad puede fluctuar en $\pm 10\text{ Oe} \pm 1\text{ Oe}$.

(2) Detalles del proceso

La sinterización al vacío (presión $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$) reduce la oxidación (pico de O $1s < 0,3\% \pm 0,01\%$) y la densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$ contribuye a la uniformidad del flujo magnético (desviación $< 2\% \pm 0,5\%$). La sinterización graduada (presinterización a $1200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante 1 hora y luego aumento a $1450\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) suprime la segregación ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), reduce el estrés térmico ($< 50\text{ MPa}$) y mejora la estabilidad de los parámetros magnéticos.

(3) Efecto del tratamiento térmico

El revenido a baja temperatura después de la sinterización ($800\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, 2 horas $\pm 0,1$ horas) elimina la tensión interna ($< 30\text{ MPa}$), optimiza la orientación del dominio magnético (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), estabiliza M_s ($8-9\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$) y la coercitividad ($120\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$) y mejora K_{1c} ($> 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

9.1.2.3.5 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado: contenido de carbono

(1) Mecanismo de influencia

La desviación del contenido de carbono ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$) cambia las propiedades de la interfaz WC/Co y afecta la estructura del dominio magnético. Un carbono insuficiente (p. ej., $0,2\% \pm 0,01\%$ menor que el valor teórico de $6,13\%$ en peso $\pm 0,01\%$ en peso) conduce a una fase WC incompleta y aumenta la coercitividad en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (a $105-110\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$); un carbono excesivo (p. ej., $0,3\% \pm 0,01\%$) forma carbono libre, debilita la red magnética de Co (disminución de $M_s > 5\% \pm 1\%$) y la coercitividad fluctúa en $\pm 10\text{ Oe} \pm 1\text{ Oe}$.

(2)

La detección por EDS mediante microanálisis muestra que cuando la desviación del contenido de carbono es $< 0,1\% \pm 0,01\%$, la pureza de la fase Co es alta ($> 99\% \pm 0,5\%$) y la intensidad de magnetización es constante ($M_s 8-9\text{ emu/g} \pm 0,5\text{ emu/g}$). Cuando la desviación es $> 0,2\% \pm 0,01\%$, la distribución de Co es desigual (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$) y la fluctuación de la fuerza coercitiva se agrava ($> 130\text{ Oe} \pm 10\text{ Oe}$). El SEM confirma que el área de carbono libre ($< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) afecta al flujo magnético.

(3) La estrategia de control

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantiza un contenido de carbono estable y reduce las anomalías magnéticas (desviación de $M_s < \pm 0,2$ emu/g) mediante una mezcla precisa de carbono (relación molar WC:Co 6,13:1 $\pm 0,01$), y combina la sinterización al vacío (presión $< 10^{-3}$ Pa) para controlar la volatilización del carbono ($< 0,05\% \pm 0,01\%$).

9.1.2.3.6 Ejemplo completo de factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado

Tomando WC12Co y WC10Ni como ejemplos, WC12Co tiene una fuerza coercitiva de 140 Oe ± 10 Oe y M_s de 9,6 emu/g $\pm 0,5$ emu/g debido a un contenido de carbono insuficiente ($0,2\% \pm 0,01\%$), mostrando una respuesta magnética más alta pero se detectó inhomogeneidad magnética (desviación $> 0,5$ emu/g) y microfisuras (densidad $> 10^3$ m⁻²) mediante SEM. Por el contrario, WC10Ni se sinterizó al vacío a 1450 °C ± 10 °C, con una desviación del contenido de carbono de $< 0,1\% \pm 0,01\%$, una fuerza coercitiva de 100 Oe ± 10 Oe y un M_s estable de 4 emu/g $\pm 0,5$ emu/g, lo que refleja el efecto sinérgico de la adición de Ni y la optimización del proceso. El análisis SEM confirmó además que la tasa de defectos ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) y la uniformidad de la distribución de Co/Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) de WC10Ni son mejores que las de WC12Co, y su resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²) también es más adecuada para entornos húmedos.

Las propiedades magnéticas del carburo cementado están reguladas por factores como el contenido de Co ($10\% \pm 1\%$), el tamaño de grano ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la adición de Ni ($8\%-10\% \pm 0,1\%$), el proceso de sinterización (sinterización al vacío a 1450 °C ± 10 °C) y el contenido de carbono ($\pm 0,1\% \pm 0,01\%$). El contenido de Co y la temperatura de sinterización dominan M_s ($8-10$ emu/g $\pm 0,5$ emu/g) y la uniformidad, el tamaño de grano y el contenido de carbono afectan a la coercitividad ($100-120$ Oe ± 10 Oe), y la adición de Ni equilibra las propiedades magnéticas (hasta $4-5$ emu/g $\pm 0,5$ emu/g) y la resistencia a la corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}$ A/cm²).

Al optimizar estos parámetros, se puede lograr un control preciso de los parámetros magnéticos (desviación de $M_s < \pm 0,2$ emu/g, fluctuación de la coercitividad $< \pm 5$ Oe ± 1 Oe), cumpliendo con los altos requisitos de las pruebas no destructivas (sensibilidad $> 95\% \pm 2\%$) y el control de calidad (tasa de defectos $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y proporcionando soporte técnico para el carburo cementado en aplicaciones de alta gama (como la aviación y la medicina). En el futuro, la consistencia magnética se puede mejorar aún más mediante nanogranos ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el diseño multifase.

9.1.2.4 Estrategia de optimización de las propiedades magnéticas del carburo cementado

Para lograr una magnetización de saturación (M_s) por debajo de 10 emu/g $\pm 0,5$ emu/g y una coercitividad (Coercitividad) estable en aproximadamente 100 Oe ± 10 Oe, la optimización magnética del carburo cementado requiere una consideración integral del diseño de la composición, el proceso de preparación, la regulación de la microestructura y las especificaciones de prueba. Estas estrategias están dirigidas a mejorar la uniformidad magnética, reducir el impacto de los defectos y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantizar que las propiedades magnéticas cumplan con los escenarios de aplicación de alta demanda, como las pruebas no destructivas y el control de calidad. El plan de optimización específico incluye los siguientes aspectos clave: Primero, a través de la optimización de la composición, el contenido de Co se controla al $10\% \pm 1\%$, lo que proporciona la principal contribución de magnetización como fase ferromagnética, mantiene M_s en el rango de 8-10 emu/g y evita la disminución de la tenacidad causada por un contenido excesivo; Al mismo tiempo, se introduce un contenido de Ni del $8\%-10\% \pm 0,1\%$ como fase de enlace auxiliar. El ferromagnetismo débil del Ni (momento magnético $0,6 \mu_B$) reducirá M_s a $< 5 \text{ emu/g}$, pero su excelente resistencia a la corrosión ($i_{corr} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) mejora la estabilidad del material en un entorno corrosivo. La fase de enlace mixta Co/Ni (como Co 6% + Ni 4%) puede lograr el mejor equilibrio entre magnetismo y durabilidad. Además, agregar una pequeña cantidad de inhibidores de grano (como VC o Cr_3C_2 , $< 1\%$) ayuda a optimizar la distribución de Co/Ni, reducir la segregación ($< 0,1\%$) y estabilizar aún más los parámetros magnéticos.

En cuanto al proceso de sinterización, la temperatura se establece en $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ para evitar la segregación de Co/Ni (desviación $> 0,5 \%$) causada por altas temperaturas ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$). A esta temperatura, el Co se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y se mejora la consistencia de la intensidad de magnetización. Mediante la sinterización al vacío (presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), se garantiza que la densidad del material supere el $99,5 \% \pm 0,1 \%$ y se reduce la porosidad ($< 0,05 \%$), mejorando así la uniformidad del flujo magnético y manteniendo una baja coercitividad. El uso de sinterización gradual (presinterización a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y posterior aumento a $1450 \text{ }^\circ\text{C}$) o tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) puede eliminar la tensión interna, inhibir el crecimiento anormal del grano y reducir las fluctuaciones magnéticas a $\pm 2 \%$. El revenido a baja temperatura ($800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) posterior a la sinterización también puede optimizar la orientación del dominio magnético y estabilizar aún más M_s y la coercitividad.

En términos de control de la microestructura, el tamaño de grano de WC se controla a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. La alta densidad del límite de grano ($> 10^{-14} \text{ m}^{-2}$) se utiliza para dificultar la inversión del dominio (movimiento de la pared del dominio) y mantener la coercitividad estable a $100 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$. La estructura de grano fino también mejora la dispersión de la fase Co y mejora la trayectoria de conductividad magnética. Se añade VC (0,5%-1%) o TaC como inhibidor para evitar el crecimiento del grano que exceda $1 \mu\text{m}$ para evitar una disminución de la coercitividad ($< 90 \text{ Oe}$). El análisis SEM muestra que la continuidad de la red de Co de la muestra de grano de $0,5 \mu\text{m}$ es $> 95\%$ y la fluctuación del parámetro magnético es inferior a $\pm 0,2 \text{ emu/g}$. En comparación con la muestra de grano grueso ($> 2 \mu\text{m}$), la coercitividad de los granos finos aumenta entre un 10% y un 15% y la consistencia de la intensidad de magnetización mejora significativamente.

El control de carbono es otro eslabón clave. La desviación del contenido de carbono debe controlarse dentro de $< 0,1\% \pm 0,01\%$ para evitar la deficiencia de carbono ($< 6,0\%$) que resulta en una fase WC incompleta o un exceso de carbono ($> 6,2\%$) formando carbono libre. El contenido de carbono estable puede reducir la fluctuación de la coercitividad ($< 5\% \pm 1\%$) y la desviación de M_s . La distribución uniforme del carbono puede garantizarse mediante una correspondencia precisa de carbono

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(relación molar WC:Co 6,13:1 ± 0,01) o el control de la atmósfera del horno de carbonización (relación CO/CO₂ 1:1 ± 0,1). La coercitividad de las muestras con carbono insuficiente puede aumentar a 110 Oe, y Ms disminuirá en un 5%-10%. El exceso de carbono debilitará la red magnética de Co, lo que requiere un monitoreo estricto para mantener la estabilidad magnética.

En cuanto a las especificaciones de prueba, se utilizó un magnetómetro de muestra vibrante (VSM) para la prueba magnética. La intensidad del campo magnético aplicado fue de 1 T ± 0,01 T y la precisión de la medición fue de ± 0,1 emu/g para garantizar la fiabilidad de los datos. El tamaño de la muestra fue de 10 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm. La temperatura de prueba se controló a 23 °C ± 2 °C y la humedad fue < 65 % para evitar interferencias ambientales. La medición se repitió 5 veces y se tomó el valor promedio. Se utilizaron SEM y EDS para analizar la distribución de Co/Ni y la tasa de defectos (< 0,1 %). Por ejemplo, WC10Co se sinterizó a 1450 °C ± 10 °C, con Ms de aproximadamente 8 emu/g ± 0,5 emu/g y una coercitividad de 100 Oe ± 10 Oe. La precisión de detección superó el 98% ± 1%, lo que cumplió plenamente con los requisitos de las pruebas no destructivas.

En condiciones de sinterización de WC10CoNi (Co 6% + Ni 4%) a 1450 °C, con un tamaño de grano de 0,5 μm y una desviación de carbono < 0,1%, el Ms se optimiza a 7,8 emu/g ± 0,5 emu/g, y la coercitividad se estabiliza a 98 Oe ± 10 Oe, lo cual es mejor que el valor objetivo. El pulido superficial (Ra < 0,05 μm) reduce aún más las fluctuaciones magnéticas, y la resistencia a la corrosión del Ni mejora la aplicabilidad del material en ambientes húmedos. Estas optimizaciones permiten que el carburo cementado tenga un buen rendimiento en la detección magnética y la evaluación de propiedades mecánicas, sentando las bases para ensayos no destructivos y aplicaciones de fabricación de alta gama.

Las propiedades magnéticas del carburo cementado se optimizan equilibrando las propiedades magnéticas y la resistencia a la corrosión mediante el contenido de Co (10 % ± 1 %) y la adición de Ni (8 %-10 %). La sinterización a 1450 °C garantiza una densidad (> 99,5 %) y una distribución uniforme. Los granos de 0,51 μm y la desviación de carbono (< 0,1 %) estabilizan la coercitividad. Las pruebas VSM proporcionan una verificación de alta precisión. Las muestras optimizadas de WC10Co o WC10Ni cumplen con los requisitos de Ms < 10 emu /g y coercitividad ~ 100 Oe, lo que proporciona un soporte fiable para ensayos no destructivos y aplicaciones de fabricación de alta gama.

9.1.2.5 Aplicación de ingeniería del magnetismo de carburo cementado

Las propiedades magnéticas del carburo cementado presentan ventajas significativas en el campo de la ingeniería, especialmente en ensayos no destructivos y control de calidad. Su excelente magnetización por saturación (Ms) y coercitividad lo convierten en una herramienta ideal para detectar defectos internos y evaluar las propiedades de los materiales. Al optimizar la composición (como Co 10 % ± 1 %, Ni 8 %-10 % ± 0,1 %) y el proceso (como la sinterización al vacío a 1450 °C ± 10 °C), la tecnología de detección magnética del carburo cementado ofrece un excelente rendimiento en múltiples aplicaciones, como el control de calidad de herramientas, la inspección de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

componentes de aviación, la fabricación de moldes, los medios de grabación magnética y los materiales de blindaje electromagnético. Estas aplicaciones demuestran plenamente el potencial de la detección magnética para mejorar la eficiencia y la confiabilidad del control de calidad del carburo cementado, combinado con alta dureza ($> HV 1400 \pm 30$), tenacidad a la fractura ($K_{Ic} > 15 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 mm^3 / m \pm 0,01 mm^3 / m$), brindando soporte técnico para industrias de alta gama.

Control de calidad de herramientas

En el campo del control de calidad de herramientas, WC10Co (contenido de Co $10\% \pm 1\%$) se ha convertido en el material preferido para detectar defectos internos en herramientas de corte debido a su coercitividad de $120 Oe \pm 10 Oe$. Las muestras de alta coercitividad pueden identificar con precisión grietas menores de $0,1 mm \pm 0,01 mm$. El magnetómetro de muestra vibrante (VSM) analiza los cambios del campo magnético con una tasa de paso de más del $99\% \pm 1\%$, reduciendo significativamente el riesgo de fallo de la herramienta causado por grietas. La estructura de grano fino ($0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$) mejora la red de permeabilidad magnética de la fase Co, combinada con una distribución uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), asegurando una alta sensibilidad de detección ($> 95\% \pm 2\%$), mejorando en gran medida la eficiencia de cribado de productos no calificados en el proceso de producción, especialmente en el corte de alta velocidad y la fabricación de herramientas resistentes al desgaste. En comparación con las pruebas de partículas magnéticas tradicionales (sensibilidad $\sim 90\% \pm 2\%$), la alta resolución de VSM ($< 0,1 emu/g$) mejora aún más la precisión de la identificación de defectos.

Inspección de piezas de aviación

Para la aplicación de componentes aeroespaciales, WC8Ni (M_s es de aproximadamente $4 emu/g \pm 0,5 emu/g$) tiene baja magnetización y excelente resistencia a la corrosión ($i_{corr} < 10^{-6} A/cm^2 \pm 10^{-7} A/cm^2$) se utiliza ampliamente para la inspección de calidad de piezas estructurales clave. Ni como una fase ferromagnética débil reduce la interferencia magnética, mientras que su distribución uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) garantiza la estabilidad de la inspección magnética y puede identificar poros menores de $0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$, lo cual es crucial para los requisitos de alta fiabilidad de los componentes de aviación como las palas de turbinas. La vida útil de las muestras de WC8Ni tras la sinterización optimizada ($1450^\circ C \pm 10^\circ C$) supera las 10^4 horas $\pm 10^3$ horas, superando ampliamente la de los materiales tradicionales (como el WC10Co, cuya vida útil es de aproximadamente 5×10^3 horas $\pm 10^2$ horas). La inspección magnética también puede combinarse con tecnología ultrasónica para mejorar aún más la tasa de reconocimiento de defectos hasta $> 99\% \pm 0,5\%$, garantizando así la seguridad de los componentes de aviación en entornos extremos (como altas temperaturas $> 300^\circ C \pm 10^\circ C$).

Fabricación de moldes

En el campo de la fabricación de moldes, WC10Co (temperatura de sinterización $1450^\circ C \pm 10^\circ C$) se usa ampliamente en la producción e inspección de calidad de moldes de precisión con un excelente rendimiento magnético de M_s de aproximadamente $8 emu/g \pm 0,5 emu/g$ y una desviación del contenido de carbono de $< 0,1\% \pm 0,01\%$. La intensidad de magnetización estable y la baja tasa de defectos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0,05 % ± 0,01 %) le permiten lograr una precisión de >98 % ± 1 % a través de la inspección VSM, identificar microgrietas internas (<0,1 mm ± 0,01 mm) y contenido de carbono anormal, y garantizar que la precisión de procesamiento del molde alcance el nivel de micras (<1 μm ± 0,1 μm). Esta tecnología de detección magnética de alta precisión no solo acorta el ciclo de producción del molde (reducido en un 20 % ± 2 %), sino que también reduce la tasa de desperdicios causados por defectos de material (<1 % ± 0,5 %). Funciona especialmente bien en moldes de estampación de precisión para piezas de automoción y componentes electrónicos, mejorando significativamente la eficiencia de fabricación.

Medios de grabación magnéticos

En el campo de los medios de grabación magnética, las aleaciones WC-Co-Ni se utilizan en la fabricación de dispositivos de almacenamiento de datos gracias a su permeabilidad magnética ajustable (> 1000 ± 50). Ajustando el contenido de Co (10 % ± 1 %) y Ni (8 %-10 % ± 0,1 %), se puede controlar la intensidad de magnetización (4-8 emu/g ± 0,5 emu/g). Combinado con una estructura de grano fino (0,5 μm ± 0,01 μm), se logra una grabación de datos de alta densidad (> 10¹² bit/pulg²). El análisis SEM muestra que la continuidad de la red Co-Ni (> 95% ± 2%) garantiza la homogeneidad magnética, y la precisión de detección VSM (±0,1 emu/g) respalda el control de calidad y reduce el riesgo de desmagnetización de los medios de grabación magnética (< 0,1% ± 0,01%), lo que lo hace adecuado para la producción de discos duros y dispositivos de almacenamiento en cinta.

Materiales de blindaje electromagnético

En la aplicación de materiales de blindaje electromagnético, el WC8Ni con bajo M_s proporciona un eficaz blindaje contra las ondas electromagnéticas y es adecuado para estaciones base 5G y equipos de aviónica. Su M_s es de aproximadamente 4 emu/g ± 0,5 emu/g, lo que reduce la interferencia magnética y, en combinación con la resistencia a la corrosión del Ni (icorr < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²), la eficiencia de blindaje supera el 90 % ± 2 % (frecuencia > 1 GHz). La densidad (> 99,5% ± 0,1%) y la distribución uniforme (desviación < 0,1% ± 0,02%) de WC8Ni después de la sinterización optimizada (1450 °C ± 10 °C) mejoran la estabilidad de la trayectoria magnética y la tasa de defectos (< 0,05% ± 0,01%) confirmada por SEM es baja, lo que prolonga la vida útil (> 10⁴ horas ± 10³ horas) y funciona bien en entornos electromagnéticos de alta frecuencia.

Las aplicaciones de ingeniería magnética del carburo cementado se benefician de su magnetización optimizada (4-8 emu/g ± 0,5 emu/g) y coercitividad (100-120 Oe ± 10 Oe), mostrando un excelente desempeño en control de calidad de herramientas, inspección de componentes aeroespaciales, fabricación de moldes, medios de grabación magnética y materiales de blindaje electromagnético. La alta coercitividad del WC10Co garantiza la precisión en la detección de grietas (> 99 % ± 1 %), la baja magnetización del WC8Ni permite una larga vida útil de los componentes aeroespaciales (> 10⁴ horas ± 10³ horas) y un blindaje electromagnético (eficiencia > 90 % ± 2 %), las propiedades magnéticas estables del WC10Co mejoran la calidad de la fabricación de moldes (precisión < 1 μm ± 0,1 μm), y la aleación WC-Co-Ni amplía las aplicaciones de almacenamiento de datos (densidad > 10¹² bit/in² ± 10¹¹ bit/in²). En conjunto, estas aplicaciones demuestran el papel clave de la detección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

magnética en la mejora de la fiabilidad y la eficiencia de producción del carburo cementado. En el futuro, optimizando aún más la composición (por ejemplo, nanogranos $< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el proceso (por ejemplo, diseño multifásico), el potencial de aplicación magnética del carburo cementado se ampliará en campos más tecnológicos (por ejemplo, computación cuántica, tecnología 6G).

9.2 Propiedades compuestas de carburo cementado resistentes al desgaste, a la corrosión y conductoras

El desarrollo multifuncional del carburo cementado requiere una excelente resistencia al desgaste, a la corrosión y conductividad eléctrica para satisfacer las crecientes necesidades de las aplicaciones de ingeniería. En concreto, la resistencia al desgaste debe alcanzar una tasa de desgaste inferior a $0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ para garantizar la estabilidad del material durante un uso prolongado; la resistencia a la corrosión requiere una pérdida de peso inferior a $0,08 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$ para resistir la influencia de entornos corrosivos; y la conductividad eléctrica requiere una resistividad inferior a $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$ para garantizar un rendimiento eléctrico eficiente. Estas características determinan conjuntamente el potencial de aplicación del carburo cementado en escenarios como moldes electrónicos (vida útil superior a 10^6 veces $\pm 10^5$ veces), equipos marinos (vida útil superior a 5 años $\pm 0,5$ años) y piezas conductoras (resistencia de contacto inferior a $0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$). El sistema WCTiCNi introduce TiC (dureza superior a $\text{HV } 2000 \pm 50$) como fase dura y Ni (densidad de corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A}/\text{cm}^2$) $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$) como fase de unión resistente a la corrosión, optimizando eficazmente estas propiedades compuestas.

Teoría de las propiedades compuestas de resistencia al desgaste, a la corrosión y conductividad del carburo cementado

Desde una perspectiva teórica, el mecanismo de rendimiento de los compuestos WCTiCNi se puede explicar mediante diagramas de fases, estructuras electrónicas e interacciones microscópicas en la ciencia de los materiales. En primer lugar, el análisis del diagrama de fases muestra que la solubilidad entre WC y TiC es baja ($< 5\% \pm 0,1\%$), lo que limita la difusión en la interfase, pero durante la sinterización a alta temperatura, el efecto sinérgico de la alta dureza de TiC (aproximadamente $\text{HV } 2200$) y WC (aproximadamente $\text{HV } 1800$) forma un esqueleto duro fuerte, que mejora significativamente la resistencia al desgaste. Según la ecuación de desgaste de Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (donde V es el volumen de desgaste, k es el coeficiente de desgaste, F es la carga, L es la distancia de deslizamiento y H es la dureza), la adición de la fase de alta dureza reduce el valor k, controlando así la tasa de desgaste por debajo de $0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. En segundo lugar, como fase de enlace, Ni tiene una excelente resistencia a la corrosión debido a su alta estabilidad electroquímica. La baja densidad de corriente de corrosión indica que tiene una fuerte capacidad de pasivación en entornos ácidos o de niebla salina, y la pérdida de peso se puede mantener por debajo de $0,06 \text{ mg}/\text{cm}^2$, lo que está relacionado con el hecho de que el nivel de Fermi de Ni (aproximadamente 7 eV) está cerca de Co (aproximadamente 7,1 eV) pero tiene una menor tendencia a la oxidación. Además, la realización de la conductividad depende de las características

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de migración de electrones de las fases Ni y WC/TiC. El modelo de Drude muestra que la conductividad $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (donde n es la densidad del portador, e es la carga del electrón, τ es el tiempo de colisión, m es la masa efectiva), la alta densidad electrónica de Ni (aproximadamente 10^{22} cm^{-3}) combinada con la conductividad parcial de WC (aproximadamente 10^5 S/m) hace que la resistividad del material compuesto sea estable en aproximadamente $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, lo que cumple con los requisitos de las piezas conductoras. Microscópicamente, se verificó mediante SEM la distribución uniforme de partículas de WC y TiC (desviación $< 0,1\%$) y la continuidad de la red de Ni ($> 95\%$) redujo aún más la resistencia de contacto.

Esta sección comienza con la prueba de rendimiento de materiales compuestos WCTiCNi (resistividad $< 12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), combinada con un análisis de diagrama de fases (solubilidad de WCTiC $< 5\% \pm 0,1\%$), normas de prueba (ASTM G65, G59) y casos prácticos, para explorar el mecanismo y la aplicación del rendimiento de los compuestos. Por ejemplo, dureza WC10TiC10Ni $> \text{HV } 1600 \pm 30$, pérdida de peso $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, resistividad $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$.

9.2.1.1 Principio y descripción general de la tecnología de los materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El compuesto WCTiCNi es un carburo cementado multifuncional que mejora significativamente la resistencia al desgaste mediante la introducción de TiC (dureza sobre HV 2000 ± 50 , contenido $5\% - 10\% \pm 0,1\%$) como fase dura, mientras que Ni (contenido $8\% - 12\% \pm 0,1\%$) como fase aglutinante mejora la resistencia a la corrosión y la conductividad, con el objetivo de lograr objetivos de rendimiento integrales: dureza sobre HV 1600 ± 30 , pérdida de peso por debajo de $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y resistividad inferior a $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Estas propiedades le permiten cumplir con los escenarios de aplicación de alta demanda, como moldes electrónicos (vida útil más de 10^6 veces), equipos marinos (vida útil más de 5 años) y piezas conductoras (resistencia de contacto inferior a $0,1 \text{ m}\Omega$). La alta dureza de TiC proviene de su estructura de enlace covalente (la energía de enlace de TiC es de aproximadamente $500 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), que mejora significativamente la resistencia al desgaste a través del fortalecimiento de la red; mientras que la capa de pasivación NiO de Ni (el espesor es de aproximadamente $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) reduce la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) a través de la estabilidad electroquímica y mejora la resistencia a la corrosión. Además, la energía de interfaz entre WC y TiC es de aproximadamente $1,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, combinada con una baja solubilidad ($< 5\% \pm 0,1\%$), asegura una buena compatibilidad y estabilidad estructural entre fases. En comparación con el sistema tradicional WC-Co, la optimización sinérgica de los materiales compuestos WCTiCNi en resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y conductividad le da ventajas únicas.

9.2.1.2 Tecnología de preparación y rendimiento de los materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El proceso de preparación de materiales compuestos WCTiCNi incluye varios pasos clave: primero, la dosificación del polvo, el tamaño de partícula de TiC se controla a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantizar una dispersión uniforme y un efecto de fortalecimiento; luego, se utiliza molienda de bolas (que dura 40 horas \pm 1 hora) para lograr una mezcla completa y el refinamiento del polvo y optimizar el contacto entre partículas; finalmente, se utiliza sinterización al vacío (temperatura $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, presión $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$) para obtener una estructura densa con alta densidad ($> 99,5\% \pm 0,1\%$) y baja porosidad ($< 0,1\% \pm 0,02\%$). Por ejemplo, la muestra WC10TiC10Ni muestra una dureza de HV 1650 ± 30 y una pérdida de peso de $0,06\text{ mg/cm}^2$ bajo el proceso anterior. $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, resistividad $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, en comparación con WC10Co (dureza HV 1500 ± 30 , pérdida de peso $0,09\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$) tiene una mejora significativa del rendimiento. Esto demuestra que la introducción de TiC y Ni no solo mejora las propiedades mecánicas y electroquímicas del material, sino que también optimiza sus propiedades conductoras, haciéndolo más adecuado para aplicaciones multifuncionales. Esta sección explorará sistemáticamente las ventajas de rendimiento de los compuestos WCTiCNi y sus métodos de realización a través del análisis de mecanismos, la optimización de procesos y las pruebas de rendimiento.

9.2.1.3 Análisis del mecanismo de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Desde una perspectiva mecánica, la alta dureza del TiC ($> \text{HV } 2000 \pm 50$) mejora significativamente la resistencia al desgaste mediante el refuerzo reticular, y su constante reticular es de aproximadamente $4,3\text{ }\text{Å} \pm 0,01\text{ }\text{Å}$, formando una red de enlaces covalentes compacta. Según la ecuación de desgaste de Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (donde V es el volumen de desgaste, k es el coeficiente de desgaste, F es la carga, L es la distancia de deslizamiento y H es la dureza), el alto valor H del TiC reduce eficazmente k y controla la tasa de desgaste a $0,06\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ o menos. Ni como fase aglutinante tiene una estabilidad electroquímica (el potencial de corrosión E_{corr} es de aproximadamente $0,1\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$ frente a SCE) y forma una capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) en la superficie, lo que reduce significativamente la densidad de corriente de corrosión a $10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$, controlando así la pérdida de peso por debajo de $0,06\text{ mg/cm}^2$, que es particularmente prominente en entornos marinos o medios ácidos. La resistencia de unión de la interfaz entre WC y TiC supera los $120\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, lo que previene eficazmente el desprendimiento de partículas (tasa $< 0,05\% \pm 0,01\%$), y el valor moderado de la energía de la interfaz ($1,5\text{ J/m}^2 \pm 0,1\text{ J/m}^2$) mejora aún más la unión entre las fases.

En términos de conductividad, la red de Ni (fracción de volumen $10\% \pm 1\%$) es el principal contribuyente. Su alta densidad electrónica (aproximadamente 10^{22} cm^{-3}) proporciona una ruta de migración de electrones eficiente según el modelo de Drude $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ (donde n es la densidad del portador, e es la carga del electrón, τ es el tiempo de colisión y m es la masa efectiva). Aunque la mayor resistividad de TiC (aproximadamente $50\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 2\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) aumenta ligeramente la resistencia general, debido a la continuidad de la red de Ni ($> 95\% \pm 2\%$), la resistividad del material compuesto se mantiene en $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, cumpliendo con los requisitos de las piezas conductoras. El análisis microestructural muestra que las imágenes de SEM indican que las partículas de TiC en WC10TiC10Ni están distribuidas uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y que la fase de Ni forma una red conductora continua y resistente a la corrosión. La EDS

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

confirma que el contenido de TiC es del $10\% \pm 0,1\%$, y la detección por XPS verifica la formación de la capa de NiO (el pico de Ni 2p es de aproximadamente $854\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), lo que confirma aún más el mecanismo de resistencia a la corrosión.

El control del tamaño de grano ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) mejora la resistencia al desgaste al reducir la tasa de desgaste en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$, pero cuando el contenido de TiC supera el $10\% \pm 0,1\%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que el contenido excesivo de TiC conduce a la concentración de tensiones en el límite de grano, y el rendimiento debe equilibrarse optimizando la relación. La temperatura de sinterización de $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ garantiza una alta densidad y una baja tasa de defectos (porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$) del material. A través del entorno de vacío y el control preciso de la temperatura, se garantiza la uniformidad de las fases de TiC y Ni, evitando la separación o segregación de fases causada por la sinterización a alta temperatura ($> 1500\text{ }^\circ\text{C}$), manteniendo así la estabilidad general del rendimiento del material compuesto.

9.2.1.4 Análisis de los factores que afectan el rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Las propiedades integrales de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi, incluyendo la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la conductividad eléctrica, se ven significativamente afectadas por múltiples factores que, en conjunto, determinan su rendimiento en aplicaciones prácticas al modificar la microestructura, la distribución de fases y la interacción entre el material y el entorno. Estos factores clave incluyen el contenido de TiC y Ni, el tamaño de grano, la temperatura de sinterización y las condiciones ambientales de uso. Cualquier desequilibrio en un solo factor puede provocar una desviación del rendimiento. A continuación, se presenta un análisis detallado del impacto de diversos factores en el rendimiento de los compuestos, basado en mecanismos teóricos, datos experimentales y casos de aplicación, y se explora su optimización para garantizar su fiabilidad en escenarios como moldes electrónicos, equipos marinos y componentes conductores.

(1) Contenido de TiC

El contenido de TiC es el parámetro principal que afecta la resistencia al desgaste y las propiedades mecánicas. Cuando el contenido de TiC es del $10\% \pm 0,1\%$, la dureza puede superar los $1600 \pm 30\text{ HV}$. Esto se debe a que la alta dureza del TiC ($> 2000 \pm 50$) proporciona un efecto de fortalecimiento reticular a través de enlaces covalentes (la energía de enlace del TiC es de aproximadamente 500 kJ/mol). Según la ecuación de desgaste de Archard $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ (donde V es el volumen de desgaste, k es el coeficiente de desgaste, F es la carga, L es la distancia de deslizamiento y H es la dureza), el alto valor H del TiC reduce efectivamente k y mantiene la tasa de desgaste a un nivel bajo. Sin embargo, cuando el contenido de TiC supera el $15\% \pm 0,1\%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye aproximadamente un $15\% \pm 3\%$, lo que se atribuye a la concentración de tensiones en el límite de grano y al debilitamiento de la unión entre fases causado por el exceso de partículas de TiC. El análisis SEM muestra que la aglomeración de partículas de TiC ($> 0,1\%$) agrava aún más

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

este efecto, lo que resulta en un aumento en la tasa de desprendimiento de partículas ($> 0,05\%$). Por ejemplo, la K^{-1-2} de la muestra WC15TiC10Ni es de tan solo $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ debido a su alto contenido de TiC. $\pm 0,5$, mientras que la de WC10TiC10Ni alcanza $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que indica que un contenido moderado de TiC es clave para optimizar el rendimiento. En el futuro, la dureza y la tenacidad se podrán equilibrar reduciendo el contenido de TiC al 8-10 % y optimizando la distribución de partículas.

(2) Contenido de Ni

El contenido de Ni juega un papel dominante en la conductividad y la resistencia a la corrosión. Cuando el contenido de Ni es de $10\% \pm 1\%$, la resistividad permanece por debajo de $12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$. Esto se debe a que la red de Ni (fracción de volumen $10\% \pm 1\%$) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ proporciona una ruta de migración de electrones eficiente según el modelo de Drude, y la densidad de electrones (aproximadamente 10^{22} cm^{-3}) asegura que la conductividad satisfaga las necesidades de las piezas conductoras. Al mismo tiempo, la capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm}$) de Ni reduce la densidad de corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) a través de la estabilidad electroquímica. Sin embargo, cuando el contenido de Ni excede el $12\% \pm 1\%$, la dureza disminuye en aproximadamente $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que un contenido excesivo de Ni debilita la función de soporte de la fase dura, lo que resulta en una disminución de la resistencia del límite de grano. El análisis EDS muestra que la segregación de la fase de Ni ($> 0,5\%$) afecta aún más la uniformidad del material y aumenta la sensibilidad a la corrosión local. Por lo tanto, la optimización del contenido de Ni debe buscar un equilibrio entre la conductividad, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión. Generalmente, se considera que un rango ideal es del 8 % al 12 %. Un contenido de Ni demasiado alto puede requerir la combinación con otros elementos de aleación (como Co, $< 5\%$) para mantener la dureza.

(3) Tamaño del grano

El tamaño del grano tiene un efecto significativo en la resistencia al desgaste y la estabilidad general. Cuando el tamaño del grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano es alta ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), lo que mantiene baja la tasa de desgaste al obstaculizar la invasión de partículas abrasivas y reducir el desprendimiento de partículas (tasa $< 0,05\%$). Esta estructura de grano fino también mejora la dispersión uniforme de TiC y WC. La observación SEM muestra que la fuerza de unión del límite de grano es $> 120 \text{ MPa}$, lo que reduce la probabilidad de formación de microfisuras. Sin embargo, cuando el tamaño del grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la tasa de desgaste aumenta aproximadamente un $15\% \pm 3\%$. Esto se debe a que los granos gruesos reducen el número de límites de grano, reducen la resistencia al desgaste y aumentan el riesgo de formación de microfisuras, lo que afecta la durabilidad a largo plazo del material. El control del tamaño de grano suele lograrse añadiendo inhibidores (como VC, $< 1\%$) y optimizando el tiempo de molienda de bolas ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) para mantener la estabilidad del rendimiento. En el futuro, se podrán explorar granos de tamaño nanométrico ($< 0,3 \mu\text{m}$) para reducir aún más la tasa de desgaste.

(4) Temperatura de sinterización

La temperatura de sinterización es crítica para la densidad del material y la distribución de fases. A

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450 °C ± 10 °C, los compuestos WCTiCNi alcanzan una alta densidad (> 99,5 % ± 0,1 %) y una baja porosidad (< 0,1 % ± 0,02 %), asegurando una distribución uniforme de las fases de TiC y Ni (desviación < 0,1 %), lo cual se logra mediante sinterización al vacío (presión < 10⁻³ Pa), reduciendo eficazmente la oxidación y los defectos. Sin embargo, cuando la temperatura de sinterización supera los 1500 °C ± 10 °C, la segregación aumenta aproximadamente un 10 % ± 2 %, la migración de la fase de Ni aumenta la sensibilidad a la corrosión local y la dureza y la conductividad pueden disminuir entre un 5 % y un 8 %. El análisis SEM muestra que la zona de segregación (> 0,5 %) afecta significativamente la consistencia del rendimiento y aumenta la porosidad (> 0,15 %). Por lo tanto, se considera que 1450 °C es la temperatura de sinterización óptima, y la microestructura se puede optimizar aún más combinando sinterización graduada o prensado isostático en caliente (HIP), y el riesgo de separación de fases se puede reducir mediante un control preciso de la temperatura (± 5 °C) en el futuro.

(5) Condiciones ambientales

Las condiciones ambientales tienen un impacto significativo en la resistencia a la corrosión. En un entorno fuertemente ácido con un pH de < 2 ± 0,1, la estabilidad de la capa de pasivación de NiO disminuye, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) aumenta en aproximadamente un 20% ± 5%, y la pérdida de peso puede ascender a 0,10 mg/cm², lo cual está relacionado con el desplazamiento del potencial de corrosión (E_{corr}) de Ni en la prueba de polarización electroquímica (ASTM G59). Las observaciones SEM muestran que la profundidad de la picadura de corrosión puede alcanzar 0,5 μm. En un entorno de niebla salina con una concentración de NaCl superior al 5% ± 0,1%, la pérdida de peso aumenta en aproximadamente un 15% ± 3%, lo cual se debe a que los iones cloruro aceleran la corrosión local y la capa de pasivación de la fase Ni se daña. El análisis XPS muestra que el espesor de la capa de NiO se reduce (< 5 nm). La optimización de los factores ambientales requiere un recubrimiento superficial (como CrN, espesor 2 μm) o una aleación (como la adición de Mo, <2 %) para mejorar la resistencia a la corrosión y prolongar la vida útil. Especialmente en aplicaciones de equipos marinos, una mejor resistencia a la corrosión permite controlar la pérdida de peso por debajo de 0,05 mg/cm².

9.2.1.5 Estrategia de optimización del rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Para lograr una dureza de más de HV 1600 ± 30, la pérdida de peso debe ser menor de 0,08 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², y teniendo en cuenta la conductividad eléctrica para satisfacer las necesidades de aplicaciones multifuncionales, la optimización del rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi requiere una consideración integral del diseño de la composición, el proceso de preparación, la regulación de la microestructura y el tratamiento de la superficie. Estas estrategias tienen como objetivo garantizar el excelente rendimiento de los materiales en escenarios como moldes electrónicos (vida útil > 10⁶ veces), equipos marinos (servicio > 5 años) y piezas conductoras (resistencia de contacto < 0,1 mΩ) al mejorar la sinergia de la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la conductividad eléctrica. La siguiente es una explicación detallada del esquema de optimización y su efecto de implementación basado en la base teórica, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimización del proceso y la verificación de pruebas.

(1) Optimización de la composición de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Optimizar la composición es un paso clave para mejorar el rendimiento de los compuestos WCTiCNi. El contenido de TiC se establece en el rango de 5%-10% \pm 0,1%. La alta dureza de TiC ($>$ HV 2000 \pm 50) proporciona fortalecimiento reticular $V = k \cdot \frac{F \cdot L}{H}$ a través de enlaces covalentes (la energía de enlace de TiC es de aproximadamente 500 kJ/mol). Según la ecuación de desgaste de Archard (donde V es el volumen de desgaste, k es el coeficiente de desgaste, F es la carga, L es la distancia de deslizamiento y H es la dureza), el alto valor de H reduce efectivamente la tasa de desgaste. Este rango garantiza que la dureza alcance por encima de HV 1600, al tiempo que evita la disminución de la tenacidad a la fractura (K_{1c}) causada por un exceso de TiC ($>$ 15%). El contenido de Ni se controla en 8%-10% \pm 1%. La capa de pasivación de NiO (espesor \sim 10 nm) de Ni reduce la pérdida de peso por corrosión por debajo de 0,06 mg/cm² mediante estabilidad electroquímica ($i_{corr} < 10^{-6}$ A/cm²), mientras que su alta densidad electrónica (aproximadamente 10^{22} cm⁻³) $\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ admite una resistividad inferior a 12 $\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ según el modelo de Drude. La adición apropiada de elementos de aleación traza (como VC, $<$ 1%) puede optimizar aún más la distribución uniforme de TiC y Ni (desviación $<$ 0,1%) y mejorar la fuerza de enlace de la interfase ($>$ 120 MPa), logrando así un equilibrio integral de rendimiento.

(2) Proceso de sinterización de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El proceso de sinterización afecta directamente la densidad y la distribución de fases del material. La temperatura de sinterización se establece en 1450 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$ para evitar la segregación de Ni ($>$ 0,5 %) causada por altas temperaturas ($>$ 1500 $^{\circ}\text{C}$). El análisis SEM muestra que a esta temperatura, las fases de TiC y Ni se distribuyen uniformemente (desviación $<$ 0,1 % \pm 0,02 %) y la porosidad es baja ($<$ 0,1 % \pm 0,02 %). La sinterización al vacío (presión $<$ 10^{-3} Pa \pm 10^{-4} Pa) garantiza una densidad superior al 99,5 % \pm 0,1 %, reduce la oxidación y los defectos, y mejora la resistencia al desgaste y a la corrosión. En teoría, la alta densidad reduce la penetración de medios corrosivos y puede reducir aún más la pérdida de peso. El uso de sinterización graduada (presinterización a 1200 $^{\circ}\text{C}$ y luego aumento a 1450 $^{\circ}\text{C}$) o tecnología de prensado isostático en caliente (HIP) puede optimizar la microestructura, inhibir el crecimiento anormal de grano, reducir la tasa de desgaste en aproximadamente un 5%-8% y eliminar la tensión interna a través del revenido a baja temperatura (800 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$), estabilizar la capa de pasivación de NiO y extender la vida útil.

(3) Control de grano de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El control preciso del tamaño de grano es un medio importante para mejorar la resistencia al desgaste y las propiedades mecánicas. El tamaño de grano de WC y TiC se controla a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. La alta densidad del límite de grano ($>$ 10^{14} m⁻²) dificulta la invasión de partículas abrasivas y el desprendimiento de partículas (tasa $<$ 0,05%). Según la teoría de fortalecimiento del límite de grano, los granos finos mejoran la dispersión uniforme de las fases duras. La observación SEM muestra que la fuerza de unión del límite de grano es $>$ 120 MPa, manteniendo así la tasa de desgaste a un nivel bajo mientras se equilibra la dureza y la tenacidad ($K_{1c} >$ 10 MPa \cdot m^{1/2}). Si el tamaño de grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el número de límites de grano disminuye, la tasa de desgaste

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puede aumentar en un $15\% \pm 3\%$ y la tenacidad disminuye. Es necesario asegurar el refinamiento del grano mediante la adición de inhibidores (como VC, 0,5-1%) y la prolongación del tiempo de molienda de bolas (40 ± 1 hora). En el futuro, se podrán explorar granos nanométricos ($< 0,3 \mu\text{m}$) para reducir aún más la tasa de desgaste y aumentar la dureza, pero se debe prestar atención a los costos de producción y la complejidad del proceso.

(4) Tratamiento superficial de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El tratamiento de superficies es un medio eficaz para optimizar la resistencia al desgaste y a la corrosión. El pulido con diamante o pulido químico-mecánico (CMP) se utiliza para controlar la rugosidad de la superficie (R_a) a $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reducir los defectos superficiales y las microfisuras, y teóricamente aplanar la superficie para reducir la adhesión de partículas abrasivas y la intrusión de medios corrosivos. Según la mecánica de contacto, una reducción del $10\% \pm 2\%$ en la rugosidad de la superficie puede reducir la tasa de desgaste en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$, y la resistencia de contacto también disminuirá ($< 0,1 \text{ m}\Omega$), mejorando el rendimiento de las piezas conductoras. Después del pulido, se combina la limpieza ultrasónica para eliminar residuos, mejorar aún más la integridad de la capa de pasivación de NiO (espesor $> 10 \text{ nm}$) y la pérdida de peso puede estabilizarse por debajo de $0,06 \text{ mg/cm}^2$. En el futuro, se podrán desarrollar recubrimientos resistentes a la corrosión (como TiN, espesor $1,5\text{-}2 \mu\text{m}$) o tratamientos de nitruración de plasma para mejorar aún más la resistencia a la corrosión en entornos extremos (como $\text{pH} < 2$).

(5) Especificaciones de prueba para compuestos de carburo cementado WCTiCNi

La verificación del rendimiento se lleva a cabo de acuerdo con las normas internacionales para garantizar la fiabilidad y repetibilidad de los datos. La prueba de resistencia al desgaste se basa en ASTM G65 (prueba de desgaste de rueda de caucho/arena seca) para evaluar la tasa de desgaste. La prueba de resistencia a la corrosión se basa en ASTM G59 (prueba de polarización electroquímica) para medir la pérdida de peso e i_{corr} . El método de cuatro sondas se utiliza para medir la resistividad (precisión $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). El tamaño de la muestra de prueba es de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. Las condiciones ambientales se controlan a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad es $< 65 \%$. El valor medio se toma después de repetir la medición 5 veces. La microestructura y la distribución de fases se analizan combinando SEM y EDS (desviación $< 0,1 \%$). Por ejemplo, después de sinterizar WC10TiC10Ni a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la dureza alcanza HV 1650 ± 30 y la pérdida de peso es de $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y la resistividad $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que son mejores que los valores objetivo, lo que demuestra la eficacia de la estrategia de optimización.

(6) Efecto de optimización integral y perspectivas de aplicación

Gracias al efecto sinérgico de las estrategias anteriores, la muestra WC10TiC10Ni sinterizada a $1450 \text{ }^\circ\text{C}$, con un tamaño de grano de $0,51 \mu\text{m}$ y $R_a < 0,05 \mu\text{m}$, presenta una dureza de HV 1650, una pérdida de peso de $0,06 \text{ mg/cm}^2$ y una resistividad de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, valores superiores al objetivo inicial. La resistencia al desgaste cumple con los requisitos de los moldes electrónicos (vida útil $> 10^6$ veces), la resistencia a la corrosión es compatible con equipos marinos (servicio > 5 años) y la conductividad es adecuada para piezas conductoras (resistencia de contacto $< 0,1 \text{ m}\Omega$). En comparación con WC10Co (dureza HV 1500, pérdida de peso de $0,09 \text{ mg/cm}^2$), el sistema

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WCTiCNi ofrece ventajas evidentes en cuanto a versatilidad. En el futuro, la dureza se puede aumentar aún más hasta superar los 1700 HV y la pérdida de peso se puede reducir a 0,05 mg/cm² introduciendo tecnología nano-TiC (< 100 nm) o sinterización de plasma (SPS), ampliando su potencial de aplicación en los campos de la aviación y la electrónica de alta gama.

La optimización del rendimiento del carburo cementado WCTiCNi equilibra la dureza y la resistencia a la corrosión mediante el contenido de TiC (5%-10%) y el contenido de Ni (8%-10%). La sinterización al vacío a 1450 °C garantiza la densidad (> 99,5%) y la uniformidad. El control de grano de 0,51 μm mejora la resistencia al desgaste. El pulido superficial (Ra < 0,05 μm) reduce la tasa de desgaste. Las pruebas de la norma ASTM verifican que el rendimiento cumple con las normas. Por ejemplo, WC10TiC10Ni presenta una dureza HV de 1650, una pérdida de peso de 0,06 mg/cm² y una resistividad de 11 μΩ·cm que satisfacen las necesidades multifuncionales. En el futuro, la nanotecnología y la modificación de superficies pueden mejorar aún más su aplicabilidad en entornos extremos.

9.2.1.6 Aplicaciones de ingeniería de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Los compuestos de carburo cementado WCTiCNi han demostrado un excelente rendimiento en diversos campos de la ingeniería gracias a su excelente resistencia al desgaste y a la corrosión, y a su conductividad eléctrica. Gracias a la optimización de la proporción de TiC y Ni, y a un sofisticado proceso de preparación, el material ha satisfecho las necesidades de aplicaciones de alta demanda, como moldes electrónicos, equipos marinos y contactos conductores. Estas aplicaciones no solo confirman las propiedades multifuncionales de los compuestos WCTiCNi, sino que también sientan las bases para su uso generalizado en entornos extremos y en la fabricación de precisión. A continuación, se detalla su valor en las aplicaciones de ingeniería y su papel en el desarrollo de la industria, basándose en escenarios de aplicación, ventajas de rendimiento y casos reales.

(1) Molde electrónico compuesto de carburo cementado WCTiCNi

En el campo de los moldes electrónicos, el WC10TiC10Ni es la opción ideal gracias a su excelente resistencia al desgaste y alta dureza. Este material se basa en un tamaño de grano fino y posee una dureza muy alta. La adición de TiC reduce significativamente el desgaste y garantiza la estabilidad a largo plazo del molde en el estampado de alta frecuencia. Su vida útil supera el millón de veces, superando ampliamente el rendimiento de los materiales tradicionales. Además, la distribución uniforme y la protección anticorrosiva de la fase de Ni reducen el riesgo de fallo del molde debido a la corrosión en un entorno industrial húmedo, lo que lo hace ampliamente utilizado en la fabricación de componentes electrónicos de precisión, como la producción de carcasas de teléfonos móviles y moldes de conectores, mejorando significativamente la eficiencia de la producción y la calidad del producto.

(2) Piezas de equipos marinos compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Para aplicaciones en equipos marinos, el WC8TiC10Ni ofrece un excelente rendimiento gracias a su excelente resistencia a la corrosión y al desgaste. El pulido de la superficie permite obtener una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficie muy lisa, lo que reduce la penetración de medios corrosivos y mantiene una baja pérdida de peso, cumpliendo con los requisitos de servicio en entornos de niebla salina, con una vida útil de más de cinco años. El Ni, como fase de unión, proporciona una fuerte resistencia a la erosión del agua de mar, mientras que el contenido de TiC mejora la dureza del material, garantizando la durabilidad a largo plazo de los equipos de perforación marina y los componentes de los buques. Además, el contenido moderado de Ni también mantiene la conductividad del material, lo que facilita las conexiones eléctricas, como sensores y sistemas de control para plataformas marinas, demostrando su fiabilidad en entornos hostiles.

(3) Contactos conductores compuestos de carburo cementado WCTiCNi

En la aplicación de contactos conductores, el WC10TiC10Ni es el preferido por sus excelentes propiedades eléctricas. La resistividad se mantiene a un nivel muy bajo y la red de Ni garantiza un flujo de corriente eficiente. La resistencia de contacto también es muy baja, lo que cumple con los requisitos de interruptores de alta frecuencia y equipos microelectrónicos. Su vida útil supera el millón de veces gracias a la alta dureza del TiC, que reduce el desgaste, y la resistencia a la corrosión del Ni proporciona protección adicional en ambientes húmedos o ácidos, lo que le confiere un excelente rendimiento en unidades de control electrónico de automoción y relés industriales, reduciendo significativamente el desgaste por arco eléctrico y los fallos de contacto.

(4) Recubrimiento de piezas de aviación compuesto de carburo cementado WCTiCNi

Los compuestos WCTiCNi también presentan un gran potencial en los recubrimientos de componentes de aviación. Por ejemplo, el WC10TiC8Ni se utiliza para recubrimientos resistentes al desgaste de álabes de turbinas y motores. Su alta dureza y resistencia a altas temperaturas (capaz de soportar temperaturas superiores a 800 °C) prolongan significativamente la vida útil de los componentes. El TiC proporciona protección adicional a la superficie, reduciendo el desgaste causado por el flujo de aire a alta velocidad y la erosión por partículas, mientras que la resistencia a la corrosión del Ni garantiza la estabilidad del recubrimiento en entornos de alta humedad y niebla salina, lo que prolonga los ciclos de mantenimiento. Este recubrimiento también posee cierto grado de conductividad, lo que facilita la conexión a tierra de los equipos de aviónica, y ofrece un excelente rendimiento en motores de aeronaves y componentes de hélices, mejorando la seguridad general del vuelo.

(5) Herramientas de perforación petrolera compuestas de carburo cementado WCTiCNi

En la industria de la perforación petrolera, el WC12TiC10Ni se utiliza ampliamente en brocas y herramientas de corte gracias a su excelente resistencia al desgaste y a la corrosión. El TiC mejora la resistencia al desgaste del material, permitiéndole funcionar durante largos periodos en formaciones rocosas de alta dureza, mientras que la adición de Ni mejora significativamente la resistencia a la corrosión de la herramienta en entornos con azufre y cloro, manteniendo la pérdida de peso a un nivel muy bajo, garantizando la eficiencia de la perforación y la vida útil de la herramienta. El pulido de la superficie reduce aún más el riesgo de desgaste y corrosión, lo que le permite un buen rendimiento en operaciones de perforación en aguas profundas y en tierra firme, reduciendo la frecuencia de reemplazo y los costos operativos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

(6) Dispositivos médicos compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El WC8TiC5Ni también está ganando terreno en el campo de los dispositivos médicos, como en la fabricación de bisturíes ortopédicos y fresas dentales. La alta dureza del TiC garantiza que el filo se mantenga afilado y satisface las necesidades de la cirugía de precisión. La biocompatibilidad y la resistencia a la corrosión del Ni reducen el riesgo de corrosión en el entorno fluido del cuerpo humano, y la pérdida de peso es muy baja, lo que prolonga la vida útil del instrumento. Además, su baja resistividad cumple con los requisitos de conductividad de ciertas herramientas electroquirúrgicas, ofrece un buen rendimiento en entornos estériles y húmedos, y mejora la seguridad y la eficiencia de la cirugía.

(7) Beneficios integrales y aplicaciones extendidas de los materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Estas aplicaciones demuestran plenamente la optimización sinérgica de los materiales compuestos WCTiCNi en términos de resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y conductividad eléctrica. En moldes electrónicos, su alta dureza y baja tasa de desgaste prolongan la vida útil del molde; en equipos marinos, la resistencia a la corrosión del níquel garantiza un servicio a largo plazo; en contactos conductores, su baja resistividad y larga vida útil cumplen con los altos requisitos de confiabilidad; en recubrimientos de componentes de aviación, su resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste mejoran la vida útil de los componentes; en herramientas de perforación petrolera, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión mejoran la eficiencia del trabajo; en dispositivos médicos, la biocompatibilidad y alta dureza garantizan la seguridad. En comparación con los materiales tradicionales de WC-Co, el sistema WCTiCNi presenta ventajas obvias en cuanto a versatilidad. Por ejemplo, la pérdida de peso del WC10Co es mayor que la del WC10TiC10Ni, y la resistencia a la corrosión mejora significativamente.

Además, el WCTiCNi también muestra potencial para aplicaciones más amplias. Por ejemplo, en la capa resistente al desgaste de las vías ferroviarias, su alta dureza puede reducir el desgaste; en dispositivos electrónicos portátiles, su baja resistividad permite el uso de componentes conductores flexibles. En el futuro, mediante la adaptación de la composición del material y la tecnología de tratamiento de superficies, su gama de aplicaciones en los campos de la energía, la medicina y el transporte podrá ampliarse aún más.

Los compuestos de carburo cementado WCTiCNi ofrecen un excelente rendimiento en moldes electrónicos, equipos marinos, contactos conductores, recubrimientos de componentes de aviación, herramientas de perforación petrolera y dispositivos médicos. La alta dureza, la baja tasa de desgaste y la larga vida útil del WC10TiC10Ni cumplen con los requisitos del molde; la baja pérdida de peso y la larga vida útil del WC8TiC10Ni son compatibles con aplicaciones marinas; la baja resistividad y el buen rendimiento de contacto del WC10TiC10Ni garantizan la fiabilidad del contacto; la resistencia a altas temperaturas del WC10TiC8Ni prolonga la vida útil de los componentes de aviación; la resistencia al desgaste y a la corrosión del WC12TiC10Ni optimiza la eficiencia de la perforación; y la biocompatibilidad del WC8TiC5Ni es compatible con dispositivos médicos. Estas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aplicaciones demuestran las amplias ventajas del WCTiCNi en cuanto a resistencia al desgaste, a la corrosión y conductividad. En el futuro, mediante la mejora de procesos y la innovación de materiales, se podrá ampliar aún más su potencial de aplicación en diversos campos de la ingeniería.

9.2.2 Prueba de rendimiento de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2.1 Principio de la prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Las pruebas de rendimiento son el método principal para evaluar el rendimiento integral de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi. Cuantifican la dureza (valor objetivo $> HV 1600 \pm 30$), la tasa de desgaste (valor objetivo $< 0,06 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$), la pérdida de peso (valor objetivo $< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) y la resistividad (valor objetivo $< 12 \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega\cdot\text{cm}$), y examinan sistemáticamente su resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la conductividad. Estos indicadores reflejan directamente la fiabilidad y la durabilidad del material en aplicaciones prácticas. Las normas de prueba incluyen la ASTM G65 (ensayo de desgaste en arena seca) para evaluar la resistencia al desgaste, la ASTM G59 (ensayo de corrosión electroquímica) para evaluar la resistencia a la corrosión y el método de cuatro sondas para medir la conductividad. Esto busca garantizar el excelente rendimiento de los materiales WCTiCNi en el campo de la electrónica (como resistencia de contacto $< 0,1 \text{ m}\Omega \pm 0,01 \text{ m}\Omega$) y en entornos marinos (como vida útil $> 5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$). El proceso de prueba no solo proporciona datos cuantitativos, sino que también proporciona una base científica para la optimización de materiales y la mejora de procesos.

9.2.2.2 Métodos y equipos de prueba de rendimiento del material compuesto de carburo cementado WCTiCNi

Las pruebas de rendimiento se basan en equipos de prueba avanzados y procedimientos estandarizados. El durómetro Vickers realiza mediciones de indentación en la superficie del material con una carga de $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$ para evaluar con precisión el valor de dureza, lo que refleja la contribución de la alta dureza ($> HV 2000$) de la fase de TiC a la resistencia al desgaste. El probador de desgaste simula condiciones de trabajo reales con una carga de $130 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ y cuantifica la tasa de desgaste mediante la prueba de desgaste en arena seca (ASTM G65). La abrasión y la fricción de las partículas de arena bajo las condiciones de prueba simulan entornos de alto desgaste, como los escenarios de uso de moldes electrónicos y herramientas de perforación petrolera. La estación de trabajo electroquímica realiza pruebas de corrosión (ASTM G59) con una precisión de potencial de $\pm 0,001 \text{ V}$ y evalúa la resistencia a la corrosión de la fase de Ni y la estabilidad de su capa de pasivación de NiO midiendo la pérdida de peso y la densidad de corriente de corrosión en una solución de NaCl al 3,5 %. La regla de las cuatro sondas determina con precisión la resistividad mediante la aplicación de una corriente constante y la medición de la caída de tensión, lo que refleja la contribución conductiva de la red de níquel. El tamaño de la muestra suele ser de $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, y el entorno de prueba se controla a $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad $< 65 \%$ para reducir la interferencia de factores ambientales. La prueba se repite cinco veces y se calcula el valor promedio

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para garantizar la fiabilidad y la significancia estadística de los datos.

(1) Análisis de datos y verificación del rendimiento

Los datos de prueba revelan las ventajas de rendimiento de los materiales WCTiCNi a través de un análisis exhaustivo. Tomando WC10TiC10Ni como ejemplo, su dureza alcanza $HV 1650 \pm 30$, lo que indica que el contenido de TiC ($10\% \pm 0,1\%$) y la estructura de grano fino ($0,51 \mu m$) mejoran efectivamente la resistencia al desgaste, con una tasa de desgaste de $0,05 \text{ mm}^3 / N \cdot m \pm 0,01 \text{ mm}^3 / N \cdot m$ Mejor que el valor objetivo, mostrando superioridad en punzonado y corte de alta frecuencia. La pérdida de peso $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ es menor que $0,08 \text{ mg/cm}^2$, lo que demuestra que el contenido de Ni ($10\% \pm 1\%$) proporciona una buena protección contra la corrosión a través de la capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm}$), cumpliendo con los requisitos de servicio a largo plazo de equipos marinos y dispositivos médicos. La resistividad es de $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ e inferior a $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, lo que indica que la continuidad de la red de Ni ($> 95\%$) garantiza una conductividad eficiente y facilita la aplicación de contactos conductores y aviónica. Los análisis SEM y EDS confirman además la distribución uniforme de partículas de TiC (desviación $< 0,1\%$) y la estabilidad de la fase de Ni. La detección XPS verifica la formación de la capa de NiO (posición del pico de Ni 2p $\sim 854 \text{ eV}$), lo que respalda microscópicamente los datos de rendimiento.

(2) Verificación extendida y orientada a aplicaciones

Los resultados de las pruebas guían directamente la aplicación de materiales WCTiCNi en escenarios de ingeniería específicos. En moldes electrónicos, la dureza y la baja tasa de desgaste garantizan una vida útil de más de un millón de veces; en equipos marinos, la baja pérdida de peso respalda una vida útil de más de cinco años; en contactos conductores, la baja resistividad cumple con los altos requisitos de confiabilidad. Además, las pruebas de rendimiento también se han extendido a otros campos, como los recubrimientos de componentes de aviación. La alta dureza y la resistencia a altas temperaturas ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) de WC10TiC8Ni han verificado su aplicabilidad en álabes de turbinas mediante pruebas de resistencia al desgaste y la corrosión; las herramientas de perforación petrolera, la baja tasa de desgaste y la resistencia a la corrosión de WC12TiC10Ni han confirmado sus ventajas en entornos que contienen azufre mediante pruebas de simulación; los dispositivos médicos, la baja pérdida de peso y la biocompatibilidad de WC8TiC5Ni respaldan el uso de herramientas ortopédicas mediante pruebas de corrosión. Los datos de las pruebas también proporcionan una base para la optimización. Por ejemplo, un tamaño de grano demasiado grande ($> 2 \mu m$) provocará un aumento del 15% en la tasa de desgaste, y una temperatura de sinterización demasiado alta ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C}$) puede aumentar la segregación en un 10% , lo cual debe controlarse mediante ajustes del proceso. En el futuro, se podrán implementar pruebas de desgaste dinámico y simulaciones de corrosión a largo plazo para verificar con mayor precisión el rendimiento de los materiales en condiciones extremas.

9.2.2.3 Análisis del mecanismo de prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

El análisis del mecanismo de prueba de rendimiento de los materiales compuestos de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cementado WCTiCNi tiene como objetivo revelar en profundidad los mecanismos microscópicos detrás de su dureza, tasa de desgaste, rendimiento de corrosión y resistividad. Estas características determinan conjuntamente el rendimiento de los materiales en aplicaciones de ingeniería como la electrónica, los océanos y la conductividad. Mediante la combinación de datos experimentales y la observación microscópica, se analiza el efecto de fortalecimiento de TiC, la contribución de Ni a la tenacidad y la resistencia a la corrosión, y la influencia del tamaño de grano y la distribución de fases para proporcionar soporte teórico para optimizar el rendimiento del material y expandir las aplicaciones. Esta sección discutirá en detalle los aspectos de las pruebas de dureza, el mecanismo de desgaste, el comportamiento de corrosión y las características de resistividad, y verificará su mecanismo en combinación con los resultados de pruebas reales.

(1) Mecanismo de prueba de dureza

La prueba de dureza refleja principalmente el efecto de fortalecimiento del TiC en los materiales compuestos WCTiCNi. La dureza inherente del TiC supera los $HV 2000 \pm 50$, lo que se debe a su estrecha estructura de enlace covalente. Esta alta dureza mejora significativamente el rendimiento general del material a través del fortalecimiento reticular. Tomando WC10TiC10Ni como ejemplo, su dureza alcanza $HV 1650 \pm 30$, que se logra mediante la contribución sinérgica de WC (aproximadamente $HV 1800 \pm 30$) y TiC. WC proporciona dureza básica como la fase dura principal, y la adición de TiC mejora aún más la resistencia a la compresión de la superficie. En la prueba, se utilizó un probador de dureza Vickers (carga $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$) para medir la indentación de la superficie. La estructura de grano fino ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora aún más la resistencia a la deformación al aumentar la densidad del límite de grano ($> 10^{14} \text{ m}^{-2}$), lo que permite una distribución uniforme de la dureza y reduce el ablandamiento local. Las observaciones mediante SEM mostraron que las partículas de TiC estaban uniformemente incrustadas en la matriz de WC (desviación $< 0,1 \%$), lo que mejoró la resistencia de la unión entre fases ($> 120 \text{ MPa}$), lo que contribuyó a la alta dureza.

(2) Análisis del mecanismo de desgaste

La prueba de tasa de desgaste cuantifica la resistencia al desgaste del material simulando las condiciones de trabajo reales. La tasa de desgaste de WC10TiC10Ni es inferior a $0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, que se ve afectada por la alta dureza de TiC y la tenacidad de Ni. El proceso de desgaste implica pérdida de masa (Δm , precisión $\pm 0,01 \text{ mg}$), densidad del material (ρ aproximadamente $14,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), carga aplicada ($F 130 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) y distancia de deslizamiento ($L 1436 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$), granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reducen la tasa de desgaste en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ al reducir la intrusión abrasiva y la propagación de grietas. La tenacidad del Ni (K_{1c} aproximadamente $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) redujo aún más la formación de grietas por desgaste (tamaño $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), y la morfología del desgaste observada por SEM mostró que la profundidad de la ranura era inferior a $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que indica una superficie con una alta resistencia al desgaste. Por el contrario, un contenido de TiC demasiado alto ($> 15 \%$) puede reducir la tenacidad y aumentar el riesgo de microfisuras, por lo que es necesario mantener un equilibrio optimizando la relación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Mecanismo de comportamiento de la corrosión

La prueba de corrosión evalúa la resistencia a la corrosión de WCTiCNi por método electroquímico. Con Ni como fase de enlace, su densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es de aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, que es significativamente mejor que la de los materiales tradicionales a base de Co (i_{corr} es de aproximadamente $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$), gracias a la capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm}$) formada en la superficie de Ni. En una solución de NaCl al 3,5%, la pérdida de peso se controla a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, menor que el valor objetivo de $0,08 \text{ mg/cm}^2$. El análisis EDS verificó la composición química de la capa de NiO (relación Ni:O de aproximadamente 1:1 $\pm 0,1$), lo que indica que la estabilidad electroquímica del Ni (potencial de corrosión $E_{corr} \sim 0,1 \text{ V}$ frente a SCE) ralentizó eficazmente la velocidad de corrosión. Por el contrario, la fase de Co es más propensa a formar óxidos en las mismas condiciones, y la pérdida de peso puede alcanzar los $0,09 \text{ mg/cm}^2$. La adición de Ni mejora significativamente la durabilidad del material en entornos marinos o medios ácidos. Las observaciones mediante SEM muestran que la profundidad de la picadura de corrosión es $< 0,5 \mu\text{m}$, lo que confirma aún más su superioridad.

(4) Análisis de las características de resistividad

La prueba de resistividad mide la conductividad eléctrica de WCTiCNi por el método de cuatro sondas. La resistividad de WC10TiC10Ni es estable a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que es inferior al valor objetivo de $12 \mu\Omega \cdot \text{cm}$. Esto se debe principalmente a la continuidad de la red de Ni ($> 95\% \pm 2\%$). Ni proporciona una ruta de migración de electrones eficiente como fase de enlace. TiC, como fase dura no metálica, tiene una alta resistividad intrínseca (aproximadamente $50 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), que aumenta ligeramente la resistencia general del material compuesto (contribución $< 5\% \pm 1\%$), pero debido a la distribución uniforme de la fase de Ni (desviación $< 0,1\%$), la conductividad general sigue siendo excelente, lo que respalda la aplicación de contactos conductores y aviónica. El análisis SEM muestra que la fase Ni forma una red tridimensional y el EDS confirma que el contenido de Ni ($10\% \pm 1\%$) está correlacionado negativamente con la resistividad, lo que indica que un aumento moderado en el contenido de Ni puede reducir aún más la resistividad, pero la dureza y la resistencia a la corrosión deben equilibrarse.

(5) Observación microscópica y mecanismo integral.

El análisis microscópico proporciona evidencia intuitiva del mecanismo de rendimiento mediante SEM y EDS. La morfología del desgaste muestra ranuras y marcas de desgaste claras. El tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ limita eficazmente la extensión del desgaste. La presencia de la capa de NiO reduce la penetración del medio corrosivo. EDS detecta la correlación entre el contenido de TiC ($10\% \pm 0,1\%$) y la dureza y la tasa de desgaste. El análisis XPS verifica aún más el estado químico de la capa de NiO (pico de $\text{Ni}2p \sim 854 \text{ eV}$), lo que respalda el mecanismo de resistencia a la corrosión. El efecto combinado del refuerzo del límite de grano y la unión entre fases ($> 120 \text{ MPa}$) reduce la porosidad ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la tasa de defectos ($< 0,05\%$), y mejora la estabilidad general del rendimiento del material. En comparación con WC10Co, WCTiCNi tiene ventajas obvias en tenacidad y resistencia a la corrosión, y los datos de tasa de desgaste y pérdida de peso son mejores que los de los materiales tradicionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Dirección de verificación y optimización de aplicaciones

El análisis del mecanismo de prueba guía el rendimiento de WCTiCNi en aplicaciones de ingeniería. En moldes electrónicos, la alta dureza y la baja tasa de desgaste respaldan una vida útil de más de un millón de veces; en equipos marinos, la baja pérdida de peso garantiza una vida útil de más de cinco años; en contactos conductores, la baja resistividad cumple con los altos requisitos de confiabilidad. La optimización futura puede centrarse en la reducción del tamaño de grano a $0,3\ \mu\text{m}$ para reducir aún más la tasa de desgaste, aumentando el contenido de Ni al 12% para mejorar la resistencia a la corrosión, pero preste atención al riesgo de reducción de la dureza; la introducción de recubrimientos superficiales (como TiN) puede mejorar la resistencia a la corrosión y extender la vida útil en entornos de $\text{pH} < 2$; el uso de la tecnología de sinterización de plasma (SPS) puede mejorar la densidad y la uniformidad para cumplir con los requisitos más altos en los campos de la aviación y la medicina.

El mecanismo de prueba de rendimiento del material compuesto de carburo cementado WCTiCNi revela el efecto sinérgico del TiC que refuerza la dureza ($\text{HV } 1650 \pm 30$), el Ni que mejora la tenacidad y la resistencia a la corrosión (pérdida de peso de $0,06\ \text{mg}/\text{cm}^2$), la red de Ni que favorece la conductividad (resistividad de $11\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$), y una tasa de desgaste inferior a $0,06\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ gracias a los granos finos y la unión entre fases. El SEM y el EDS proporcionan evidencia microscópica, y su rendimiento en diversas aplicaciones puede mejorarse aún más mediante la optimización del grano y el tratamiento superficial en el futuro.

9.2.2.4 Métodos de prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

Para garantizar la precisión y consistencia de las pruebas de rendimiento del material compuesto de carburo cementado WCTiCNi, se requieren métodos de prueba estandarizados y equipos de precisión que cubran indicadores clave como dureza, índice de desgaste, resistencia a la corrosión y resistividad. Estos métodos de prueba no solo deben reflejar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la conductividad del material, sino que también deben garantizar la aplicabilidad de los datos en escenarios de aplicación como moldes electrónicos, equipos marinos y contactos conductores. Al optimizar las condiciones de prueba y el proceso de preparación de muestras, los resultados pueden proporcionar una base confiable para la evaluación del rendimiento del material, la mejora de procesos y la aplicación en ingeniería. A continuación, se detallan los métodos de prueba, los parámetros del equipo y la preparación de muestras para garantizar la precisión y repetibilidad de las pruebas, cumpliendo con los requisitos de rendimiento multifuncional.

(1) Prueba de dureza

La prueba de dureza se realiza con un durómetro Vickers. Aplicando una carga de $10\ \text{kg} \pm 0,1\ \text{kg}$ para formar una indentación en la superficie del material, se mide la longitud diagonal para calcular el valor de dureza con una precisión de ± 30 , lo que refleja la contribución de la fase TiC (dureza $> \text{HV } 2000$) al refuerzo general. Antes de la prueba, es necesario asegurar que la superficie sea plana

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y libre de defectos obvios, y que las posiciones de la indentación estén espaciadas al menos 2,5 veces la longitud diagonal de la indentación para evitar la influencia mutua. Cada prueba se repite 5 veces y se toma el valor promedio para reducir el error. La dureza de la muestra WC10TiC10Ni generalmente alcanza $HV 1650 \pm 30$. Este método de prueba de alta precisión es adecuado para evaluar la durabilidad de los materiales en el estampado y corte de alta frecuencia, asegurando los requisitos de aplicación de moldes electrónicos y herramientas de perforación petrolera.

(2) Prueba de desgaste

Las pruebas de desgaste se realizaron de acuerdo con ASTM G65 utilizando un probador de desgaste de rueda de caucho/arena seca con una carga aplicada de $130 N \pm 1 N$ y una distancia de deslizamiento de $1436 m \pm 1 m$ para simular el comportamiento del desgaste en condiciones de trabajo reales. Durante la prueba, las partículas de arena se lavaron sobre la superficie de la muestra a un caudal constante y la pérdida de masa se midió utilizando una balanza de precisión (precisión $\pm 0,01 mg$). La tasa de desgaste se calculó en función de la densidad del material (aproximadamente $14,5 g/cm^3$), con un valor objetivo inferior a $0,06 mm^3/N \cdot m \pm 0,01 mm^3/N \cdot m$. El entorno de prueba se controla a $23 ^\circ C \pm 2 ^\circ C$, humedad $< 65 \%$, y cada prueba se repite 3 veces; se toma el valor promedio para garantizar una repetibilidad $> 95 \% \pm 2 \%$. Por ejemplo, la tasa de desgaste de WC10TiC10Ni alcanza $0,05 mm^3/N \cdot m \pm 0,01 mm^3/N \cdot m$, lo que indica que su estructura de grano fino ($0,5 \mu m$) y distribución uniforme de TiC (desviación $< 0,1\%$) mejoran eficazmente la resistencia al desgaste y son adecuados para recubrimientos de componentes de aviación y capas resistentes al desgaste de ferrocarriles.

(3) Prueba de corrosión

La prueba de corrosión se realizó utilizando una estación de trabajo electroquímica utilizando el estándar ASTM G59, con una velocidad de escaneo de $0,1 mV/s \pm 0,01 mV/s$, y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y la pérdida de peso se midieron en una solución de NaCl al 3,5%. Después de sumergir la muestra durante 24 horas, se registró la curva de polarización utilizando un sistema de tres electrodos (electrodo de trabajo, electrodo de referencia y electrodo auxiliar), y la pérdida de peso se determinó mediante pesaje (precisión $\pm 0,01 mg/cm^2$), con un valor objetivo inferior a $0,08 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$. La temperatura de prueba se controló a $25 ^\circ C \pm 1 ^\circ C$, el pH se estabilizó a 6,5-7,0 y se tomó el valor promedio después de 3 repeticiones. La pérdida de peso de WC10TiC10Ni es de $0,06 mg/cm^2 \pm 0,01 mg/cm^2$, i_{corr} es de aproximadamente $10^{-6} A/cm^2$, lo que es mejor que los materiales a base de Co, lo que demuestra la ventaja de resistencia a la corrosión de la capa de pasivación de NiO de Ni (espesor $\sim 10 nm$) en equipos marinos y dispositivos médicos.

(4) Prueba de resistividad

La prueba de resistividad adopta el método de cuatro sondas. Se utiliza una fuente de corriente constante para aplicar $1 mA \pm 0,01 mA$ y se mide la caída de tensión para calcular la resistividad. La precisión es de $\pm 0,01 \mu\Omega \cdot cm$ y el valor objetivo es inferior a $12 \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1 \mu\Omega \cdot cm$. La distancia entre sondas es de 1 mm y la superficie de la muestra debe estar libre de óxido o suciedad. La prueba se repite 5 veces y se calcula el valor promedio para garantizar la contribución conductiva de la red de níquel ($> 95 \%$ de continuidad). La resistividad de WC10TiC10Ni es estable a $11 \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\Omega\cdot\text{cm}$, lo que refleja la alta densidad electrónica y la distribución uniforme de la fase Ni (desviación $< 0,1\%$), lo que respalda los requisitos de baja resistencia de contacto ($< 0,1\text{ m}\Omega$) de contactos conductores y electrónica portátil.

(5) Preparación de la muestra

La preparación de la muestra es un paso clave para garantizar la precisión de la prueba. El pulido con diamante o pulido químico-mecánico (CMP) se utiliza para controlar la rugosidad superficial (Ra) a $< 0,05\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$, reducir los defectos superficiales y las microfisuras, y aplanar la superficie para ayudar a reducir la tasa de desgaste y la penetración de medios corrosivos. Después del pulido, se utiliza una limpieza ultrasónica para eliminar los residuos. El tamaño de la muestra es de $10 \times 10 \times 5\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, y el bisel del borde es de $0,2\ \text{mm}$ para evitar la concentración de tensiones. La uniformidad de la superficie de la muestra preparada se verifica mediante SEM (desviación $< 0,1\%$), lo que proporciona una base consistente para pruebas posteriores. Por ejemplo, la tasa de desgaste de la muestra WC10TiC10Ni bajo la preparación anterior es de $0,05\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ y una repetibilidad de $> 95\% \pm 2\%$, lo que indica que el proceso de pulido mejora significativamente la confiabilidad y la consistencia de los resultados de la prueba.

(6) Control ambiental y verificación de datos

Durante la prueba, las condiciones ambientales deben controlarse estrictamente, con la temperatura mantenida a $23\ ^\circ\text{C} \pm 2\ ^\circ\text{C}$ y la humedad $< 65\%$ para reducir la interferencia de la temperatura y la humedad. El equipo fue calibrado antes de cada prueba para asegurar la estabilidad de los parámetros de carga, corriente y potencial. La verificación de datos se realizó mediante comparación con muestras estándar (como WC10Co), combinando SEM y EDS para analizar la microestructura, confirmando el contenido de TiC ($10\% \pm 0,1\%$) y la distribución de Ni (desviación $< 0,1\%$), y XPS puede verificar aún más la formación de la capa de NiO. Los resultados de la prueba también pueden extenderse a otros escenarios de aplicación, como recubrimientos de aviación (resistencia a altas temperaturas) y dispositivos médicos (biocompatibilidad), proporcionando soporte de datos para la optimización del material.

(7) Orientación a la aplicación y mejoras futuras

Estos métodos de prueba guían directamente la aplicación de materiales WCTiCNi en ingeniería. Las pruebas de dureza respaldan la evaluación de durabilidad de moldes electrónicos y herramientas de perforación petrolera. Las pruebas de desgaste optimizan el rendimiento de piezas de aviación y capas resistentes al desgaste ferroviarias. Las pruebas de corrosión garantizan la confiabilidad a largo plazo de equipos marinos y dispositivos médicos. Las pruebas de resistividad satisfacen las necesidades de contactos conductores y electrónica portátil. En el futuro, se pueden introducir simulaciones dinámicas de desgaste (como pruebas de rotación a alta velocidad) e inmersión en corrosión a largo plazo (> 1000 horas), combinadas con equipos automatizados (como sistemas de pulido robóticos) para mejorar la eficiencia, y se puede utilizar un tratamiento de superficie a nanoescala (como un recubrimiento de TiN) para reducir aún más la rugosidad a $\text{Ra} < 0,03\ \mu\text{m}$, mejorando la precisión de las pruebas y el rendimiento del material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las pruebas de rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi se cuantificaron mediante un durómetro Vickers (carga de 10 kg), ASTM G65 (carga de 130 N), ASTM G59 (velocidad de barrido de 0,1 mV/s) y el método de cuatro sondas (corriente de 1 mA) para cuantificar la dureza, la tasa de desgaste, la pérdida de peso y la resistividad. Las muestras se pulieron a $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ para garantizar la precisión. Tomando como ejemplo el WC10TiC10Ni, la tasa de desgaste de $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ y una repetibilidad $> 95\%$ verificaron la fiabilidad del método. En el futuro, las pruebas dinámicas y la optimización de superficies pueden ampliar aún más su potencial de aplicación en diversos campos.

9.3 Autolubricación y antiadherencia del carburo cementado

9.3.1 Teoría de la autolubricación y antiadherencia del carburo cementado

La autolubricación (coeficiente de fricción $< 0,2 \pm 0,01$) y la antiadherencia (fuerza de adhesión $< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) son propiedades que el carburo cementado necesita mejorar en las aplicaciones industriales modernas. Estas propiedades se mejoran significativamente mediante la introducción de lubricantes sólidos (como MoS_2 y C, con un contenido del $5\% \pm 0,1\%$) y la optimización de la textura superficial (profundidad de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), satisfaciendo así las necesidades de entornos de alta demanda como el corte a alta velocidad (velocidad $> 500 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$), el mecanizado en seco (calor por fricción $< 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) y el conformado de moldes (fuerza de desmoldeo $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$). Los materiales WCCo tradicionales presentan un alto coeficiente de fricción natural (aproximadamente $0,5 \pm 0,05$), lo que dificulta su adaptación a condiciones de baja fricción y alta adherencia, lo que genera problemas de desgaste y adherencia en el mecanizado en seco y el moldeo de precisión, lo que limita su rango de aplicación. Por el contrario, el sistema WCTiCNi combina las propiedades de bajo cizallamiento de los lubricantes sólidos con la reducción de la fricción del diseño de textura, ofreciendo una nueva solución para la autolubricación y la antiadherencia.

(1) Introducción de lubricantes sólidos

Los lubricantes sólidos MoS_2 y C son clave para lograr la autolubricación y la antiadherencia. Como compuesto laminar, el MoS_2 ofrece baja fricción gracias a su débil fuerza de van der Waals interlaminar (aprox. $0,1 \text{ eV}$), y su coeficiente de fricción puede reducirse a $0,15 \pm 0,01$, lo que resulta adecuado para entornos de corte a alta velocidad y procesamiento en seco. El C (como el grafito o el carburo) reduce aún más la tensión de cizallamiento entre superficies gracias a su estructura laminar y autolubricidad, especialmente a altas temperaturas ($> 500 \text{ }^\circ\text{C}$). Cuando el contenido se controla al $5\% \pm 0,1\%$, el lubricante sólido se distribuye uniformemente en la matriz de WC y TiC (desviación $< 0,1\%$). El análisis SEM muestra que las partículas de MoS_2 y C se incrustan en el límite de fase, lo que reduce el contacto directo con el metal y la fuerza de adhesión se reduce a $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. En comparación con el alto coeficiente de fricción del WCCo ($0,5 \pm 0,05$), esta adición reduce significativamente la pérdida de energía y la acumulación de calor ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$), mejorando la vida útil de la herramienta y la eficiencia del mecanizado. Por ejemplo, el coeficiente de fricción del WC5 MoS_2 en corte en seco es de $0,15 \pm 0,01$ y la adhesión es de $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, cumpliendo así con los requisitos de protección ambiental del mecanizado sin refrigerante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Textura de la superficie y mecanismo de lubricación.

$\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ en la superficie del material mediante grabado láser o mecanizado, lo que mejora las propiedades de autolubricación y antiadherencia. Estas estructuras de textura pueden capturar y almacenar partículas de MoS_2 o C, lo que reduce el contacto directo entre pares de fricción. La curva de Stribeck muestra que desde la región de lubricación límite (baja velocidad y baja carga) hasta la región de lubricación mixta (velocidad media y carga media), el coeficiente de fricción disminuye por debajo de 0,2 con la mejora de la distribución del lubricante. Después de optimizar la profundidad y el espaciado de la textura (aproximadamente 100-120 μm), la fuerza de adhesión ($< 1 \text{ N}$) se reduce efectivamente, especialmente en la conformación de moldes, la fuerza de desmoldeo se reduce a $10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, lo que reduce la adhesión de la pieza de trabajo y el daño superficial. La observación mediante SEM muestra que el espesor de la capa lubricante en la textura es de aproximadamente 5-10 μm , lo que reduce significativamente la tendencia de las virutas a adherirse a la superficie de la herramienta, especialmente al procesar materiales pegajosos (como aleaciones de aluminio). Además, la textura promueve una rápida disipación del calor por fricción ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$), evitando la adhesión inducida por altas temperaturas y prolongando la vida útil de la herramienta.

(3) Teoría de la tribología y estándares de prueba

La teoría tribológica respalda teóricamente el mecanismo de autolubricación y antiadherencia. La curva de Stribeck describe el cambio del estado de lubricación con la carga y la velocidad. El sistema WCTiCNi logra la transición de lubricación límite a lubricación mixta mediante lubricantes sólidos y diseño de texturas, y el coeficiente de fricción se reduce de 0,5 de WCCo a 0,15-0,2. La norma de ensayo ASTM G99 (ensayo de fricción y desgaste pin-disc) se utiliza para cuantificar el coeficiente de fricción y la adhesión. El rango de carga es de 10-200 N, la velocidad es de 0,1-1 m/s, y el ensayo se repite tres veces; se toma el valor promedio para garantizar la fiabilidad de los datos. Las condiciones ambientales se controlan a $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad es del $50 \% \pm 5 \%$, simulando el mecanizado en seco y las condiciones de corte a alta velocidad. Combinados con el análisis de la morfología de la superficie (SEM) y la distribución de lubricante (EDS), los resultados de la prueba verifican el papel de MoS_2 y C en la reducción de la fricción y la adhesión, proporcionando respaldo de datos para la optimización del material.

(4) Teoría de la tribología y estándares de prueba

La teoría tribológica respalda teóricamente el mecanismo de autolubricación y antiadherencia. La curva de Stribeck describe el cambio del estado de lubricación con la carga y la velocidad. El sistema WCTiCNi logra la transición de lubricación límite a lubricación mixta mediante lubricantes sólidos y diseño de texturas, y el coeficiente de fricción se reduce de 0,5 de WCCo a 0,15-0,2. La norma de ensayo ASTM G99 (ensayo de fricción y desgaste pin-disc) se utiliza para cuantificar el coeficiente de fricción y la adhesión. El rango de carga es de 10-200 N, la velocidad es de 0,1-1 m/s, y el ensayo se repite tres veces; se toma el valor promedio para garantizar la fiabilidad de los datos. Las condiciones ambientales se controlan a $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y la humedad es del $50 \% \pm 5 \%$, simulando el mecanizado en seco y las condiciones de corte a alta velocidad. Combinados con el análisis de la morfología de la superficie (SEM) y la distribución de lubricante (EDS), los resultados de la prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verifican el papel de MoS_2 y C en la reducción de la fricción y la adhesión, proporcionando respaldo de datos para la optimización del material.

Introducción de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS_2 , C)

9.3.2.1 Descripción general del principio y la tecnología de los lubricantes sólidos de carburo cementado

Las propiedades autolubricantes del carburo cementado se mejoran significativamente con la introducción de lubricantes sólidos MoS_2 y C. MoS_2 (resistencia al corte entre capas $< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, contenido $5\% \pm 0,1\%$) y C (forma de grafito, coeficiente de fricción $< 0,1 \pm 0,01$) reducen eficazmente el coeficiente de fricción por baja fuerza de corte ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$), y el valor objetivo se establece en $< 0,2 \pm 0,01$, cumpliendo así con los requisitos de baja fricción del corte de alta velocidad, el procesamiento en seco y la formación de moldes. La estructura en capas de MoS_2 (espaciado entre capas de aproximadamente $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) proporciona una superficie de deslizamiento suave, lo que reduce el contacto directo y la resistencia a la fricción entre las superficies, mientras que el enlace sp^2 de C (la energía de enlace CC es de aproximadamente $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) reduce la adhesión superficial ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) a través de sus características lamelares y mejora el rendimiento antiadherente. WC como matriz mantiene una alta dureza ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y proporciona soporte estructural para el material. El lubricante debe distribuirse uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) para garantizar la optimización sinérgica del efecto de lubricación y las propiedades mecánicas. Esta combinación permite que el carburo cementado se adapte a los mayores requisitos de la industria moderna de baja fricción y antiadherencia sobre la base de su tradicional ventaja de alta dureza.

Como compuesto laminar típico, las propiedades autolubricantes del MoS_2 se deben a su singular estructura cristalina hexagonal. Las capas están conectadas por fuerzas de van der Waals débiles (aproximadamente $0,1 \text{ eV}$). Esta baja energía de enlace facilita el deslizamiento de las capas bajo tensión mecánica, lo que reduce significativamente la resistencia a la fricción, especialmente en entornos de lubricación sin aceite o de alta temperatura (por ejemplo, $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$). Cuando el contenido se controla al $5\% \pm 0,1\%$, las partículas de MoS_2 pueden dispersarse uniformemente en la matriz de WC para formar una red de lubricación continua, lo que reduce el contacto directo entre metales, inhibiendo así eficazmente la acumulación de calor por fricción ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$) y prolongando la vida útil de la herramienta. La forma de grafito del C se basa en su estructura laminar bidimensional y su baja energía superficial (aproximadamente $0,1 \text{ J/m}^2$). La alta estabilidad y las características de bajo cizallamiento de los enlaces sp^2 les confieren una excelente capacidad antiadherente en cortes a alta velocidad (por ejemplo, $> 500 \text{ m/min}$) o mecanizado en seco. La fuerza de adhesión se reduce a $< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, lo que resulta especialmente adecuado para el mecanizado de materiales pegajosos como aleaciones de aluminio o cobre. Ambos trabajan en sinergia: el MoS_2 proporciona lubricación dinámica y el C mejora la antiadherencia estática, formando un mecanismo de lubricación complementario.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Como material de esqueleto del carburo cementado, el WC tiene una alta dureza ($> HV 1500 \pm 30$) debido a su estructura reticular compacta y al efecto de fortalecimiento del límite de grano, lo que garantiza la integridad estructural del material bajo carga alta. Sin embargo, el WC en sí mismo tiene un alto coeficiente de fricción (aproximadamente $0,5 \pm 0,05$) y carece de autolubricidad natural, por lo que esta deficiencia se compensa con la introducción de MoS_2 y C. La distribución uniforme de lubricantes (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) es la clave para la optimización del rendimiento. El análisis SEM muestra que las partículas de MoS_2 y C están incrustadas en el límite de fase del WC, formando una capa lubricante de aproximadamente $5-10 \mu m$, que reduce la fricción entre fases y la tendencia a la adhesión. Esta distribución se logra mediante el proceso de mezcla de polvo y molienda de bolas para garantizar que el lubricante no afecte la dureza y la resistencia al desgaste del WC, al tiempo que mejora el rendimiento general. En comparación con los materiales WCCo tradicionales, el sistema WCTiCNi reduce el coeficiente de fricción en aproximadamente un 70% y la adhesión en más del 50% mediante la adición de lubricantes, lo que mejora significativamente la eficiencia del procesamiento en seco y la calidad del desmoldeo del molde.

Además, las ventajas de este diseño autolubricante y antiadherente se reflejan en su adaptabilidad. El MoS_2 ofrece un rendimiento excepcional en vacío o atmósfera inerte, lo que resulta adecuado para aplicaciones en tecnología aeronáutica y espacial, mientras que la alta estabilidad térmica del C₂ es compatible con los sectores de la energía y la maquinaria pesada. La baja fuerza de corte del lubricante no solo reduce la pérdida de energía, sino que también reduce la tensión térmica durante el procesamiento ($< 100 \text{ }^\circ C$), lo que prolonga la vida útil de herramientas y moldes, en línea con la tendencia industrial de fabricación ecológica y desarrollo sostenible. Mediante esta optimización sinérgica multifase, el carburo cementado ha logrado avances en propiedades de baja fricción y antiadherencia, manteniendo al mismo tiempo una alta dureza, satisfaciendo las necesidades de la industria moderna de materiales eficientes, ecológicos y multifuncionales, y proporcionando un soporte fiable para el corte a alta velocidad, el procesamiento en seco y el conformado de precisión.

9.3.2.2 Análisis del mecanismo de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS_2 , C)

En el caso del carburo, las propiedades autolubricantes y antiadherentes del MoS_2 y el C se derivan de su microestructura y propiedades fisicoquímicas únicas, que mejoran significativamente el comportamiento de fricción de los materiales en el corte a alta velocidad, el mecanizado en seco y el conformado de moldes. Mediante un análisis exhaustivo del mecanismo de lubricación, la influencia de las propiedades mecánicas y la microdistribución, esta sección explora cómo el MoS_2 y el C reducen sinérgicamente el coeficiente de fricción y la adhesión, a la vez que mantienen la integridad estructural de la matriz de WC, lo que proporciona una base científica para optimizar el contenido de lubricante y el proceso de preparación.

(1) Mecanismo de lubricación del lubricante sólido de carburo cementado (MoS_2 , C)

La propiedad autolubricante del MoS_2 se debe principalmente a la débil fuerza de van der Waals (aproximadamente $0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$) presente en su estructura cristalina estratificada. Esta baja energía de enlace facilita el deslizamiento de las capas bajo la acción de la fuerza de cizallamiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durante el proceso de fricción, se forma una película de transferencia (con un espesor aproximado de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) que cubre la superficie del par de fricción, y el coeficiente de fricción se reduce a $0,15 \pm 0,01$. Esta película de transferencia se logra mediante la deposición y reorientación de partículas de MoS_2 sobre la superficie de contacto, lo que reduce significativamente el contacto directo y la resistencia a la fricción entre metales, especialmente en entornos secos o de alta temperatura (por ejemplo, $> 400 \text{ }^\circ\text{C}$). El C proporciona un efecto lubricante adicional gracias al deslizamiento laminar de su estructura híbrida sp^2 (energía de deslizamiento de aproximadamente $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$), y su baja energía superficial (aproximadamente $0,1 \text{ J/m}^2$) reduce eficazmente la adherencia a $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, lo que resulta especialmente adecuado para el procesamiento de materiales pegajosos como aleaciones de aluminio o cobre. El efecto sinérgico del MoS_2 y el C crea una combinación de lubricación dinámica y estática: el MoS_2 proporciona una interfaz de deslizamiento continuo y el C mejora la capacidad antiadherente, optimizando conjuntamente el rendimiento de fricción.

(2) Influencia de los lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS_2 , C) en las propiedades mecánicas

En la muestra WC5MoS_2 , la dureza permanece en $\text{HV } 1550 \pm 30$ y la tenacidad a la fractura (K_{1c}) es de aproximadamente $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que indica que la adición de lubricante tiene un efecto limitado en las propiedades mecánicas de la matriz WC. Las partículas de MoS_2 y C están incrustadas uniformemente en la matriz WC. El análisis SEM muestra que el lubricante no interfiere significativamente con la estructura reticular de WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$). La dureza es proporcionada principalmente por WC y TiC, mientras que la tenacidad se beneficia de la contribución plástica de la fase Ni. Sin embargo, cuando el contenido de MoS_2 excede el $5\% \pm 0,1\%$, K_{1c} disminuye en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que el exceso de lubricante conduce al debilitamiento del límite de grano o aglomeración de partículas ($> 0,1\%$), lo que aumenta el riesgo de formación de microfisuras. Por lo tanto, el control preciso del contenido de lubricante es la clave para mantener un equilibrio entre las propiedades mecánicas y el efecto de lubricación. El 5% se considera el rango ideal y se debe evitar la degradación del rendimiento mediante la optimización de la relación.

(4) Distribución microscópica y verificación de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS_2 , C)

El análisis microscópico proporcionó evidencia visual del mecanismo de lubricación mediante SEM y EDS. La observación mediante SEM mostró que las partículas de MoS_2 estaban uniformemente incrustadas en la matriz de WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y la cobertura de la película de transferencia después de la prueba de fricción superó el $90\% \pm 2\%$, lo que indica que el lubricante migró y cubrió eficazmente la superficie de contacto durante el proceso de fricción, reduciendo el desgaste y la adhesión. El análisis EDS confirmó la composición química del MoS_2 (ratio Mo:S de aproximadamente $1:2 \pm 0,1$), verificando la integridad de su estructura en capas, mientras que la detección por XPS mostró la estructura sp^2 de C (posición del pico C $1s \sim 284 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), lo que respalda la fuente de sus propiedades de baja fricción. La temperatura de sinterización se controló a $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ para evitar la descomposición térmica del MoS_2 (temperatura de descomposición $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1200 °C ± 10 °C) y garantizar la estabilidad del lubricante durante el proceso de preparación a alta temperatura. El microscopio electrónico de barrido (MEB) mostró además que el tamaño de grano (0,5 μm ± 0,01 μm) contribuyó a la dispersión uniforme del lubricante y a la reducción de los defectos de interfase (< 0,05 %).

(5) Comportamiento de fricción e influencia de la carga de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

El coeficiente de fricción muestra cierta regularidad con la carga. Cuando la carga es > 50 N ± 1 N, el coeficiente de fricción aumenta ligeramente (< 5% ± 1%), lo cual se debe a que la alta carga comprime el espesor de la película de transferencia (< 8 nm) y aumenta el contacto local del metal. Sin embargo, el coeficiente de fricción de WC5MoS₂ permanece en el rango de 0,15 ± 0,01, que es mejor que WC10Co (0,5 ± 0,05), lo que indica que el efecto de lubricación de MoS₂ y C sigue siendo efectivo bajo cargas medias a altas. El análisis SEM muestra que la película de transferencia se daña localmente (< 5%) bajo carga alta, pero el deslizamiento sp² de C complementa el efecto de lubricación y la fuerza de adhesión permanece < 0,8 N ± 0,1 N. El control del calor de fricción (< 100 °C) se beneficia de las características de bajo cizallamiento del lubricante, evitando la unión inducida por alta temperatura y extendiendo la vida útil de la herramienta.

(6) Dirección de verificación y optimización de aplicaciones de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

El WC5MoS₂ se ha verificado en aplicaciones de ingeniería. En corte a alta velocidad (500 m/min), el coeficiente de fricción de 0,15 ± 0,01 y la fuerza de adhesión de 0,8 N ± 0,1 N reducen significativamente el desgaste y la adhesión de viruta en el mecanizado en seco, aumentando la vida útil de la herramienta en aproximadamente un 30 %. En el moldeado, la baja adhesión facilita un desmoldeo suave de productos plásticos (fuerza de desmoldeo < 10 N). Se puede optimizar el proceso aumentando el contenido de MoS₂ al 6 % o introduciendo nano-MoS₂ (tamaño de partícula < 100 nm) para mejorar la estabilidad de la película de transferencia y reducir el coeficiente de fricción a 0,12. Combinado con texturizado de superficie (profundidad 110 μm) o tecnología de pulverización de plasma, la fuerza de adhesión se puede reducir aún más a < 0,5 N, lo que es adecuado para escenarios de alta temperatura (> 800 °C) o alta carga (> 200 N), como motores de aeronaves y maquinaria pesada.

El MoS₂ reduce el coeficiente de fricción a 0,15 ± 0,01 mediante fuerzas de van der Waals débiles (0,1 eV) y película de transferencia (10 nm). El C reduce la adhesión a < 0,8 N mediante deslizamiento sp² (0,01 eV). La dureza WC5MoS₂ HV 1550 y K_{1c} 10 MPa·m^{1/2} mantienen las propiedades mecánicas. Los análisis SEM y EDS verifican la distribución uniforme del lubricante. La sinterización a 1400 °C evita la descomposición, y el efecto lubricante puede mejorarse aún más mediante nanooptimización en el futuro.

9.3.2.3 Análisis de factores que afectan a los lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS_2 y C) se ven significativamente afectados por diversos factores que, en conjunto, determinan el rendimiento de su coeficiente de fricción y adhesión en corte a alta velocidad, mecanizado en seco y moldeo, modificando la distribución del lubricante, la microestructura y las condiciones ambientales. Parámetros clave como el contenido, el tamaño de grano, la temperatura de sinterización y el entorno de uso de MoS_2 y C afectan directamente la autolubricación y la antiadherencia, e influyen en las propiedades mecánicas del material (como la dureza y la tenacidad). Mediante el análisis del mecanismo y la relación entre estos factores, se puede optimizar el proceso de diseño y preparación del lubricante para cumplir con los requisitos de baja fricción y alta durabilidad en aplicaciones de ingeniería. Esta sección detalla la influencia de cada factor en el rendimiento de la lubricación, basándose en sus características, datos experimentales y casos de aplicación, y presenta sugerencias de optimización.

(1) Contenido de MoS_2

El contenido de MoS_2 es un factor importante que afecta la lubricación y las propiedades mecánicas. Con un contenido del $5\% \pm 0,1\%$, el coeficiente de fricción puede reducirse a $< 0,2 \pm 0,01$. La débil fuerza de van der Waals ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$) de la estructura laminar de MoS_2 forma una película de transferencia estable (espesor de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), que reduce eficazmente la resistencia a la fricción. Con este contenido, el análisis SEM muestra que el MoS_2 está uniformemente integrado en la matriz de WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), con una cobertura $> 90\% \pm 2\%$, lo que satisface las necesidades de corte a alta velocidad (500 m/min) y mecanizado en seco. Sin embargo, cuando el contenido de MoS_2 supera el $10\% \pm 0,1\%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye aproximadamente un $15\% \pm 3\%$, debido a un exceso de lubricante que debilita los límites de grano o aglomeración de partículas ($> 0,1\%$), lo que aumenta el riesgo de microfisuras. Por ejemplo, WC10MoS_2 tiene una K_{1c} de solo $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ debido a su alto contenido de MoS_2 . $\pm 0,5$, mientras que WC5MoS_2 alcanza los $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que indica que el 5% es el punto de equilibrio entre las propiedades mecánicas y el efecto de la lubricación. En el futuro, se podrá añadir MoS_2 por etapas para controlar su concentración local y evitar una disminución de la tenacidad.

(2) Contenido de C

El contenido de C tiene un efecto significativo en la adhesión y dureza. Cuando el contenido es $3\% \pm 0,1\%$, la adhesión permanece a un nivel bajo ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$). Gracias a la estructura de enlace sp^2 (energía de deslizamiento $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) y características de deslizamiento lamelar de C, la adhesión entre superficies se reduce, especialmente cuando se procesan aleaciones de aluminio o plásticos. Observaciones SEM muestran que partículas de C forman una película lubricante uniforme con un espesor de aproximadamente $5\text{-}10 \mu\text{m}$, lo que mejora el rendimiento antiadherente. Sin embargo, cuando el contenido de C excede $5\% \pm 0,1\%$, la dureza disminuye aproximadamente $10\% \pm 2\%$, porque el contenido excesivo de C debilita la resistencia reticular de la matriz de WC. El análisis EDS muestra que la segregación de fase C ($> 0,2\%$) puede interferir con la distribución uniforme de TiC y WC. Por lo tanto, se considera que el rango ideal es del 3% al 5% , y un C más alto requiere una cantidad mínima de endurecedor (como VC, $< 1\%$) para mantener la dureza ($> \text{HV } 1500$). La optimización se puede lograr mejorando la dispersión del nano C (tamaño de partícula $< 100 \text{ nm}$), reduciendo aún más la fuerza de adhesión a $< 0,5 \text{ N}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Tamaño del grano

El tamaño del grano es crucial para el rendimiento de la lubricación y la estabilidad de la película de transferencia. Cuando el tamaño del grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la película de transferencia se forma de forma estable con una tasa de cobertura de $> 90\% \pm 2\%$. Las partículas de MoS_2 y C se distribuyen uniformemente entre los límites de grano fino (densidad $> 10^{14} \text{m}^{-2}$), lo que reduce el aumento del coeficiente de fricción y lo mantiene $< 0,2 \pm 0,01$. El análisis SEM muestra que los granos finos limitan la intrusión abrasiva y la propagación de grietas, y mejoran la capacidad de carga del lubricante. Sin embargo, cuando el tamaño del grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el coeficiente de fricción aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que los granos gruesos reducen el número de límites de grano, la tasa de cobertura de la película de transferencia disminuye ($< 85\%$), el contacto local con el metal aumenta y la fuerza de adhesión puede superar 1 N. Para controlar el tamaño del grano, es necesario añadir inhibidores (como VC, 0,5-1%) y optimizar el tiempo de molienda ($40 \text{h} \pm 1 \text{h}$). En el futuro, se podrán explorar nanopartículas ($< 0,3 \mu\text{m}$) para estabilizar aún más la película de transferencia y mejorar la eficiencia de lubricación.

(4) Temperatura de sinterización

La temperatura de sinterización tiene un impacto directo en la integridad y estabilidad del rendimiento del lubricante. A $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, MoS_2 permanece estable (temperatura de descomposición $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) sin descomposición significativa. La observación SEM muestra que el lubricante se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \%$), y el coeficiente de fricción y la fuerza de adhesión alcanzan $0,15 \pm 0,01$ y $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, respectivamente. Sin embargo, cuando la temperatura de sinterización supera los $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la descomposición de MoS_2 aumenta en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$, y EDS detecta que la relación de Mo y S está desequilibrada (Mo:S $< 1:2$), lo que resulta en una disminución en el rendimiento de la lubricación, y el coeficiente de fricción puede aumentar a $0,25 \pm 0,01$. Las altas temperaturas también pueden provocar una grafitización excesiva de la fase C, lo que afecta la dureza ($> \text{HV } 1500$). Por lo tanto, $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ se considera la temperatura óptima, y su combinación con atmósfera protectora de Ar o sinterización gradual (precalentamiento a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) puede reducir aún más el riesgo de descomposición y mejorar la estabilidad del lubricante.

(5) Medio ambiente

Las condiciones ambientales tienen un impacto significativo en el rendimiento de la lubricación. Cuando la humedad supera el $50\% \pm 5\%$, el coeficiente de fricción aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que el agua se adsorbe en las superficies de MoS_2 y C, lo que debilita la capacidad de deslizamiento entre capas, dificulta la formación de la película de transferencia (cobertura $< 85\%$) y la adhesión puede aumentar a $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. El análisis SEM muestra que aparecen óxidos traza ($< 0,1\%$) en la superficie con alta humedad, lo que aumenta aún más la resistencia a la fricción. En entornos de procesamiento en seco o marinos, el control de la humedad al 30%-50% puede optimizar el efecto de la lubricación. La capa de pasivación de NiO de Ni (espesor $\sim 10 \text{ nm}$) proporciona protección adicional en entornos de alta humedad, y la pérdida de peso se mantiene $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$. En el futuro, se podrán utilizar recubrimientos superficiales (como

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiN, espesor 2 μm) o la adición de agentes higroscópicos (como SiO_2 , < 1%) para reducir el impacto de la humedad y mantener un rendimiento de baja fricción.

(6) Caso completo

Tomando WC10MoS₂ y WC5MoS₂ como ejemplos, WC10MoS₂ tiene un MoS₂ demasiado alto (10%), por lo que K_{1c} cae a $8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, el coeficiente de fricción aumenta ligeramente a $0,18 \pm 0,01$, lo que indica un equilibrio entre tenacidad y efecto de lubricación; WC5MoS₂ sinterizado a 1400 °C, K_{1c} alcanzó $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, coeficiente de fricción $0,15 \pm 0,01$, adhesión $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, mostrando un excelente rendimiento integral. En un ambiente húmedo del 60%, el coeficiente de fricción del WC5MoS₂ aumenta a $0,165 \pm 0,01$, pero puede restaurarse a $0,16 \pm 0,01$ mediante pulido superficial ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$). Se puede optimizar el proceso controlando el contenido de MoS₂ al 4%-6%, limitando el contenido de C al 2%-4%, refinando los granos a 0,3 μm , ajustando la temperatura de sinterización a 1380 °C-1420 °C y desarrollando un recubrimiento resistente a la humedad que reduzca el coeficiente de fricción a 0,12 y la adhesión a < 0,5 N, cumpliendo así con los altos requisitos de los motores de aviación y los dispositivos médicos.

El rendimiento de lubricación del carburo cementado WCTiCNi se ve afectado por el contenido de MoS₂ (5%), el contenido de C (3%), el tamaño de grano (0,51 μm), la temperatura de sinterización (1400 °C) y la humedad ambiental (< 50%). Un 5% de MoS₂ reduce el coeficiente de fricción a < 0,2, un 3% de C reduce la adhesión, los granos finos y la sinterización a temperatura moderada garantizan la estabilidad de la película de transferencia, y la humedad alta aumenta la fricción. Basado en WC5MoS₂, su rendimiento es mejor que el de WC10MoS₂, y el efecto de lubricación puede mejorarse aún más optimizando la proporción y el recubrimiento en el futuro.

9.3.2.4 Optimización de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

Para lograr un coeficiente de fricción de $< 0,2 \pm 0,01$ para lubricantes sólidos de carburo cementado teniendo en cuenta el rendimiento antiadherente (fuerza de adhesión $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) y la estabilidad mecánica (dureza $> \text{HV } 1500$, $K_{1c} > 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), se requiere una estrategia integral de optimización de lubricantes, ajuste del proceso de sinterización, control de grano y tratamiento de superficies. Estas medidas de optimización tienen como objetivo mejorar el efecto autolubricante de MoS₂ y C, cumpliendo con los requisitos de baja fricción del corte a alta velocidad ($> 500 \text{ m/min}$), el mecanizado en seco y la conformación de moldes, a la vez que se mantiene la integridad estructural de la matriz de WC, proporcionando un soporte fiable para aplicaciones tales como moldes electrónicos, equipos marinos y componentes de aviación. A continuación, se detalla el esquema de optimización a partir de los aspectos de los parámetros del proceso, la microestructura y las características de la superficie, y se verifica su viabilidad combinando resultados reales.

(1) Optimización del lubricante

La optimización del lubricante es clave para reducir el coeficiente de fricción. El contenido de MoS₂ se establece en $5\% \pm 0,1\%$, y su estructura en capas (distancia entre capas $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) y baja

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fuerza de corte ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$) reducen eficazmente la resistencia a la fricción mediante la formación de una película de transferencia (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), y el coeficiente de fricción se puede reducir a $0,15 \pm 0,01$. El contenido de C se controla en $3\% \pm 0,1\%$, y su estructura de enlace sp^2 (energía de enlace CC $600 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) proporciona deslizamiento lamelar (energía de deslizamiento $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$), reduciendo la fuerza de adhesión a $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, lo que es particularmente adecuado para procesar materiales pegajosos. El análisis SEM muestra que el MoS_2 y el C se distribuyen uniformemente en la matriz de WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), con una tasa de cobertura $> 90\% \pm 2\%$, lo que evita la disminución de la tenacidad (K_{12} disminuye entre un 10% y un 15%) causada por un contenido excesivo ($> 10\%$ de MoS_2 o $> 5\%$ de C). La adición de trazas de inhibidores (como VC, $< 1\%$) puede optimizar aún más la compatibilidad de los lubricantes con WC y mejorar la estabilidad de la película lubricante.

(2) Proceso de sinterización

El proceso de sinterización afecta directamente la integridad del lubricante y la densidad del material. La temperatura recomendada es de $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ y la presión es de $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, que se logra mediante prensado en caliente. $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ es menor que la temperatura de descomposición de MoS_2 ($> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que garantiza que el lubricante no sufra descomposición térmica. La observación SEM muestra que las partículas de MoS_2 y C mantienen una distribución estable (desviación $< 0,1\%$), la densidad alcanza el $99\% \pm 0,1\%$ y la porosidad es $< 0,1\% \pm 0,02\%$. La alta presión (50 MPa) promueve que el lubricante se integre en el límite de la fase WC, formando una red de lubricación continua y reduciendo el calor por fricción ($< 100 \text{ }^\circ\text{C}$). En comparación con la sinterización al vacío tradicional, el proceso de prensado en caliente evita la descomposición del lubricante ($> 5\% \pm 1\%$) causada por altas temperaturas ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C}$). El calentamiento escalonado (precalentamiento a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y posterior aumento a $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) también reduce la tensión térmica y garantiza el equilibrio entre el efecto lubricante y la dureza ($> \text{HV } 1500$). La atmósfera protectora de Ar previene la oxidación y mejora la estabilidad a largo plazo de la película lubricante.

(3) Control de granos

El control preciso del tamaño de grano es fundamental para optimizar el rendimiento de la lubricación. El objetivo es controlarlo a $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$. La capacidad de carga del lubricante y la estabilidad de la película de transferencia se mejoran mediante límites de grano finos (densidad $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$). El análisis SEM muestra que el tamaño de grano de $0,51 \text{ } \mu\text{m}$ hace que las partículas de MoS_2 y C se distribuyan uniformemente en los límites de grano, la cobertura de la película de transferencia es $> 90\% \pm 2\%$, el coeficiente de fricción permanece $< 0,2 \pm 0,01$ y la fuerza de adhesión es $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si el tamaño de grano supera los $2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, el número de límites de grano disminuye, la cobertura de la película de transferencia disminuye ($< 85\%$), el coeficiente de fricción puede aumentar en un $10\% \pm 2\%$ y la fuerza de adhesión se eleva a más de 1 N . El refinamiento del grano se logra agregando inhibidores (como VC, $0,5\%-1\%$) y extendiendo el tiempo de molienda de bolas ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$). En el futuro, se podrán explorar nanopartículas ($< 0,3 \text{ } \mu\text{m}$) para mejorar aún más la eficiencia de lubricación y adaptarse a condiciones de trabajo de alta carga ($> 200 \text{ N}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Tratamiento de superficies

El tratamiento de la superficie optimiza el rendimiento de la lubricación mediante tecnología de pulido. Se recomienda controlar la rugosidad de la superficie (R_a) a $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y utilizar pulido con diamante o pulido químico-mecánico (CMP) para eliminar defectos superficiales y microfisuras. La superficie plana reduce el contacto directo del par de fricción, mejora la adhesión de la película de transferencia de MoS_2 (cobertura $> 95\% \pm 2\%$), reduce el coeficiente de fricción a $0,15 \pm 0,01$ y reduce aún más la adhesión a $< 0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Después del pulido, se combina la limpieza ultrasónica para eliminar residuos, SEM verifica la uniformidad de la superficie (desviación $< 0,1\%$) y reduce el aumento del coeficiente de fricción ($< 5\% \pm 1\%$) causado por la humedad ($> 50\%$). El tratamiento de la superficie también promueve la rápida disipación del calor de fricción ($< 90^\circ\text{C}$) y extiende la vida útil de la herramienta. En el conformado de moldes, un valor de $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ reduce significativamente la fuerza de desmoldeo ($< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) y mejora la calidad superficial de la pieza. En el futuro, se podría introducir el recubrimiento de TiN (espesor $2 \mu\text{m}$) o la nitruración por plasma para mejorar la resistencia al desgaste superficial y la durabilidad de la lubricación.

(5) Efecto de optimización integral y verificación de la aplicación.

Mediante la estrategia anterior, $\text{WC5MoS}_2\text{C3}$ (MoS_2 5 %, C 3%) con sinterización por prensado en caliente a 1400°C , tamaño de grano de $0,51 \mu\text{m}$ y $R_a < 0,05 \mu\text{m}$, logró un coeficiente de fricción de $0,15 \pm 0,01$, una adhesión de $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, una dureza HV de 1550 ± 30 y una K_{1c} de $10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mejor que el valor objetivo. En el corte a alta velocidad (500 m/min), la vida útil de la herramienta aumenta un 30 % y el calor por fricción es $< 90^\circ\text{C}$, lo que satisface las necesidades del procesamiento en seco; en la conformación de moldes, la fuerza de desmoldeo se reduce a 8 N, lo que reduce la adhesión plástica; en equipos marinos, la baja adhesión admite más de cinco años de servicio. En comparación con el WC10Co (coeficiente de fricción $0,5 \pm 0,05$, adhesión $> 2 \text{ N}$), el sistema WCTiCNi presenta ventajas significativas. En el futuro, se podrán utilizar nanolubricantes o recubrimientos multicapa para reducir aún más el coeficiente de fricción a 0,12 y la adhesión a $< 0,5 \text{ N}$, a fin de cumplir con los altos requisitos de los motores de aviación y los dispositivos médicos.

(6) Control ambiental y desarrollo futuro

Durante las pruebas y aplicaciones, la humedad ambiente debe controlarse entre un 30 % y un 50 % para evitar un aumento del coeficiente de fricción ($10\% \pm 2\%$) causado por $> 50\% \pm 5\%$. La sinterización protegida con Ar y los recubrimientos a prueba de humedad (como SiO_2 , $< 1\%$) pueden reducir el impacto de la humedad y mantener el rendimiento de la lubricación. En el futuro, se pueden introducir simulaciones de lubricación dinámica (como pruebas de rotación a alta velocidad) y pruebas de resistencia a largo plazo (> 1000 horas), y se puede utilizar la tecnología de pulverización de plasma para aumentar el espesor de la capa de lubricación a $15 \mu\text{m}$, optimizar el rendimiento en entornos de alta temperatura ($> 800^\circ\text{C}$) o alta carga ($> 200 \text{ N}$) y ampliar su potencial de aplicación en energía y maquinaria pesada.

El lubricante sólido de carburo cementado optimiza el coeficiente de fricción $< 0,2$ mediante MoS_2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5% y C 3%. La sinterización por prensado en caliente a 1400 °C garantiza la estabilidad del lubricante. Los granos de 0,51 μm mejoran el efecto de la película de transferencia. El tratamiento superficial $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ reduce la adherencia. Por ejemplo, el WC5MoS₂ C3 presenta un rendimiento superior al del WC10Co. En el futuro, gracias a la nanotecnología y a las mejoras en los recubrimientos, podrá satisfacer mejor las necesidades de condiciones de trabajo extremas.

9.3.2.3 Aplicaciones de ingeniería de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

Al incorporar MoS₂ y C como lubricantes sólidos, el carburo cementado autolubricante mejora significativamente su rendimiento en condiciones de trabajo de baja fricción y alta durabilidad, satisfaciendo así las diversas exigencias de la industria moderna en cuanto a eficiencia de procesamiento y protección ambiental. Con su excelente coeficiente de fricción ($< 0,2 \pm 0,01$) y adhesión ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$), este material exhibe un excelente rendimiento en escenarios como corte a alta velocidad, procesamiento en seco y conformado de moldes, lo que no solo prolonga la vida útil de herramientas y moldes, sino que también reduce el consumo de energía y la acumulación de calor durante el procesamiento. A continuación, se detalla su valor en aplicaciones de ingeniería, basándose en escenarios de aplicación específicos, ventajas de rendimiento y casos reales, y se analiza su contribución a la eficiencia industrial y al desarrollo sostenible.

(1) Corte de alta velocidad

En el campo del corte a alta velocidad, el WC5MoS₂ es la opción ideal gracias a sus excelentes propiedades autolubricantes. El tamaño de grano se controla a $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, lo que garantiza que las partículas de MoS₂ se integren uniformemente en la matriz de WC (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), formando una película de transferencia estable (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) y reduciendo el coeficiente de fricción a $0,15 \pm 0,01$. El análisis SEM muestra que la cobertura de la película de transferencia es $> 90 \% \pm 2 \%$, lo que reduce significativamente el contacto directo entre las virutas y la superficie de la herramienta y prolonga su vida útil en más de $5000 \mu\text{m} \pm 500 \mu\text{m}$, superando con creces la vida útil de la herramienta WC10Co tradicional (aproximadamente $3000 \mu\text{m}$). Este rendimiento es particularmente destacado en el procesamiento de materiales de alta dureza (como aleaciones de titanio) o en condiciones de alta velocidad ($> 500 \text{ m/min}$), reduciendo la tasa de desgaste y la fuerza de corte, mejorando el acabado de la superficie y reduciendo el uso de refrigerante, lo que está en línea con la tendencia de la fabricación ecológica.

(2) Procesamiento en seco

Se destaca por su baja adhesión y capacidad de gestión térmica. Puliendo la superficie a $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, se reducen los defectos superficiales y las microfisuras, y la estructura de enlace sp² de C (energía de deslizamiento $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) forma una película lubricante uniforme. La adhesión se reduce a $0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, lo que resulta especialmente adecuado para el mecanizado de materiales pegajosos como aleaciones de aluminio o cobre. El calor de fricción se controla a $< 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, y la observación mediante SEM muestra que el espesor de la película lubricante es de aproximadamente $5\text{-}10 \mu\text{m}$, lo que disipa eficazmente el calor y previene la adhesión a alta temperatura, prolongando la vida útil de la herramienta entre un 20 % y un 30 % en comparación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con los materiales tradicionales. El mecanizado en seco sin refrigerante reduce la contaminación ambiental y los costos de procesamiento, y se utiliza ampliamente en la fabricación de piezas de automóviles y componentes electrónicos, lo que demuestra el potencial del carburo cementado autolubrificante en la protección del medio ambiente y el procesamiento de alta eficiencia.

(3) Formación de moldes

En aplicaciones de moldeo, el WC5MoS₂ se prefiere por su baja fuerza de desmoldeo y larga vida útil. La estructura en capas del MoS₂ (distancia entre capas de 6,2 Å ± 0,1 Å) reduce el coeficiente de fricción mediante fuerzas de van der Waals débiles (0,1 eV ± 0,01 eV), y la fuerza de desmoldeo se reduce a $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, lo que reduce la adhesión de las piezas de plástico o metal a la superficie del molde y mejora la calidad superficial de las piezas moldeadas. El análisis SEM muestra que la cobertura de la película de transferencia de lubricante es $> 90 \% \pm 2 \%$, lo que permite una vida útil del molde de más de 10^6 veces ± 10^5 veces, superando ampliamente la del molde WC10Co (vida útil de aproximadamente 5×10^5 veces). Este rendimiento es excepcional en el moldeo por inyección y estampado de precisión, como la fabricación de carcasas de teléfonos móviles y tableros de instrumentos de automóviles, lo que reduce los defectos de desmoldeo y la frecuencia de mantenimiento, y mejora significativamente la eficiencia de producción y los beneficios económicos.

(4) Recubrimiento de piezas de aviación

El WC10MoS₂ también se ha extendido al campo de los recubrimientos de componentes de aviación, especialmente en recubrimientos resistentes al desgaste para álabes de turbinas y motores. Su bajo coeficiente de fricción ($0,15 \pm 0,01$) reduce el desgaste causado por el flujo de aire a alta velocidad y la erosión por partículas. El tamaño de grano de $0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$ garantiza una distribución uniforme de los lubricantes y prolonga su vida útil a más de 6000 horas. La alta estabilidad térmica del MoS₂ ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) mantiene el efecto lubricante en el entorno de los motores de aviación, y el calor de fricción es $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que mejora la resistencia a la fatiga de los componentes y reduce los costes de mantenimiento. Es adecuado para requisitos de fiabilidad en condiciones de vuelo a gran altitud.

(5) Herramientas de perforación petrolera

En herramientas de perforación petrolera, el WC8MoS₂C (MoS₂ 5 %, C 3%) es el preferido por su excelente antiadherencia y resistencia al desgaste. La película lubricante reduce la adherencia entre la broca y la roca, y la fuerza de adherencia es $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, lo que prolonga la vida útil de la broca en aproximadamente un 25 % en comparación con los materiales tradicionales. En condiciones de perforación en seco, el calor por fricción se controla a $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$. El efecto sinérgico del MoS₂ y el C reduce la resistencia al corte y mejora la eficiencia de la perforación, especialmente en formaciones rocosas con alto contenido de azufre o de alta dureza, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y los costos operativos.

(6) Dispositivos médicos

El WC5MoS₂ también se está destacando en el campo de los dispositivos médicos, como bisturís ortopédicos y fresas dentales. Su coeficiente de fricción de $0,15 \pm 0,01$ y su adhesión de $0,7 \text{ N} \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

N garantizan un corte de baja fricción, lo que reduce el daño tisular y la adhesión. El pulido superficial a $Ra < 0,05 \pm 0,01 \mu\text{m}$ mejora la agudeza del filo y su vida útil supera las 5000 veces, cumpliendo con los requisitos de alta precisión en un entorno estéril, mejorando la seguridad quirúrgica y la durabilidad del instrumental.

(7) Beneficios integrales y aplicaciones ampliadas

Estas aplicaciones demuestran plenamente la superioridad del carburo cementado autolubricante en la reducción de la fricción y la adhesión. Extiende la vida útil de la herramienta en el corte a alta velocidad, reduce el impacto ambiental en el mecanizado en seco, mejora la eficiencia de la producción en el conformado de moldes, aumenta la durabilidad de los componentes en recubrimientos de aviación, mejora la eficiencia operativa en herramientas de perforación petrolera y garantiza la calidad quirúrgica en dispositivos médicos. En comparación con WC10Co (coeficiente de fricción $0,5 \pm 0,05$, adhesión $> 2 \text{ N}$), el coeficiente de fricción del sistema WCTiCNi se reduce en aproximadamente un 70% y la adhesión se reduce en más de un 50%, lo que mejora significativamente la precisión del procesamiento y la vida útil de la herramienta. Además, las propiedades autolubricantes también respaldan nuevas aplicaciones, como las capas resistentes al desgaste de las vías férreas, WC8MoS₂C reduce las pérdidas por fricción entre las vías y los juegos de ruedas; electrónica portátil, la baja adhesión de WC3C admite componentes conductores flexibles. En el futuro, su potencial de aplicación en los campos de la energía, la aviación y la medicina se puede ampliar aún más mediante nanolubricantes o recubrimientos multicapa.

El carburo cementado autolubricante ofrece un excelente rendimiento en corte a alta velocidad, mecanizado en seco, moldeo, recubrimientos para aviación, herramientas de perforación petrolera y dispositivos médicos. El coeficiente de fricción del WC5MoS₂ es de $0,15 \pm 0,01$ y la vida útil de la herramienta es $> 5000 \text{ m}$; la adhesión del WC3C es de $0,8 \text{ N}$ y el calor de fricción es $< 100 \text{ }^\circ\text{C}$; y la fuerza de desmoldeo del WC5MoS₂ es $< 10 \text{ N}$ y la vida útil es $> 10^6$ veces mayor, lo que confirma la eficiencia de procesamiento y la mejora de la vida útil gracias a la optimización de la lubricación. En el futuro, gracias a la innovación en materiales, podrá satisfacer una gama más amplia de necesidades de ingeniería.

9.3.2 Textura superficial y mecanismo de lubricación del carburo cementado

9.3.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías del mecanismo de lubricación y la textura de la superficie del carburo cementado

El diseño de textura superficial del carburo cementado mejora significativamente sus propiedades autolubricantes y antiadherentes mediante la introducción de microestructuras específicas en la superficie del material. La profundidad de la textura se establece en $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y el espaciado es de $50-100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Estas estructuras de textura reducen eficazmente el coeficiente de fricción ($< 0,2 \pm 0,01$) y la adhesión ($< 1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) mediante el almacenamiento de lubricantes sólidos (como MoS₂ y C) y la captura de virutas de desgaste (tamaño $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), cumpliendo con los requisitos de baja fricción del corte a alta velocidad, el mecanizado en seco y la conformación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de moldes. El diseño de textura se basa en la teoría de la curva de Stribeck. Al optimizar el estado de lubricación fluidodinámica, el espesor de la película de aceite es de aproximadamente $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que mejora el efecto de lubricación al tiempo que mantiene la resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y la dureza ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). En comparación con la superficie sin textura, la estructura de textura no solo reduce el contacto directo del par de fricción, sino que también captura los residuos de desgaste a través de micro ranuras o picaduras, lo que previene el desgaste secundario y extiende la vida útil de la herramienta. El objetivo es lograr la optimización sinérgica de la lubricidad y la resistencia al desgaste, que es adecuada para escenarios de alta demanda, como moldes electrónicos, componentes de aviación y herramientas de perforación petrolera.

La textura se logra mediante tecnología de procesamiento láser, utilizando un dispositivo láser con una longitud de onda de $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ y una potencia de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, con una precisión de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ para garantizar la consistencia de la profundidad y el espaciado de la textura. Por ejemplo, el coeficiente de fricción de la muestra WC5MoS_2 se reduce a $0,12 \pm 0,01$ bajo la condición de una profundidad de textura de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, que es mejor que la muestra sin textura ($0,15 \pm 0,01$), y la fuerza de adhesión se reduce a $0,7 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$, verificando que la textura de la superficie mejora significativamente el rendimiento de la lubricación. Esta sección realizará un análisis detallado de los aspectos del mecanismo de lubricación, la tecnología de procesamiento y la aplicación de ingeniería para explorar cómo el diseño de textura puede optimizar la fricción y la durabilidad del carburo cementado.

9.3.2.2 Tecnología de procesamiento de textura de superficie de carburo cementado

El procesamiento de textura adopta tecnología de procesamiento láser. El láser Nd:YAG con una longitud de onda de $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ se utiliza para un grabado preciso a una potencia de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$. La velocidad de escaneo se controla a $100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$, y la precisión alcanza $\pm 0,1 \mu\text{m}$. Después de optimizar los parámetros del láser, la profundidad de textura de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y el espaciado de $50\text{-}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ forman una microestructura uniforme. SEM verifica que el borde de la textura sea liso ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para evitar la concentración de tensiones. Durante el procesamiento, la atmósfera protectora de Ar previene la oxidación de MoS_2 (temperatura de descomposición $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) y asegura la estabilidad del lubricante. En comparación con el procesamiento mecánico, el proceso láser reduce la zona afectada por el calor ($< 10 \mu\text{m}$) y mantiene la dureza de la matriz de WC ($> \text{HV } 1500 \pm 30$). El tratamiento térmico posterior (p. ej., revenido a $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) elimina la tensión residual y mejora la unión entre la textura y la matriz. Por ejemplo, tras el texturizado láser, el coeficiente de fricción de WC5MoS_2 se reduce de $0,15 \pm 0,01$ a $0,12 \pm 0,01$, y la tasa de desgaste es de $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, lo que demuestra la eficacia de la optimización del proceso.

Análisis de la textura superficial del carburo cementado y del mecanismo de lubricación

La textura superficial del carburo cementado mejora significativamente sus propiedades autolubricantes y antidesgaste gracias al diseño de la microestructura. Esta estructura reduce el coeficiente de fricción y el desgaste superficial al aumentar la capacidad de almacenamiento de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lubricante, optimizar la formación de la película de aceite y capturar los residuos de desgaste, proporcionando así una lubricación eficiente para aplicaciones como corte a alta velocidad, mecanizado en seco y moldeo. Esta sección analiza en profundidad el mecanismo de lubricación de la textura, explora su influencia en el coeficiente de fricción, la tasa de desgaste y la fuerza de corte, y combina la observación microscópica con datos experimentales para revelar cómo la profundidad, el espaciado y la tecnología de procesamiento de la textura interactúan con la película de transferencia de MoS₂ para optimizar el efecto de la lubricación, y propone la dirección para la optimización del rendimiento.

9.3.2.3 Textura superficial y mecanismo de lubricación del carburo cementado

La textura de la superficie mejora significativamente el rendimiento autolubricante al aumentar la capacidad de almacenamiento de lubricante ($> 90\% \pm 2\%$). Las micro ranuras o picaduras almacenan partículas de MoS₂ y C para formar una película de aceite continua (espesor $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), que reduce el coeficiente de fricción a $0,12 \pm 0,01$. Esta película de aceite proporciona lubricación hidrodinámica entre los pares de fricción y reduce el contacto directo del metal. La curva de Stribeck muestra que, en condiciones de lubricación mixta, la estructura de la textura optimiza la distribución del lubricante y reduce la resistencia a la fricción. La textura también reduce el desgaste de tres cuerpos al capturar los residuos de desgaste (tamaño $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), y la tasa de desgaste se controla a $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, especialmente en el corte de alta velocidad (p. ej., $> 500 \text{ m/min}$). La profundidad de textura de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ optimiza el efecto fluidodinámico, la presión local $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ y mejora la capacidad de carga de la película de aceite; el espaciado de $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ garantiza la uniformidad de la película de aceite (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) para evitar deficiencias de lubricación local. La película de transferencia de MoS₂ (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) reduce aún más la fuerza de corte ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$), y su estructura en capas (espaciado entre capas $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) se desliza dentro de la textura con una cobertura $> 90\% \pm 2\%$ y fuerzas de adhesión reducidas sinérgicamente ($< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$).

9.3.2.4 Observación microscópica y verificación de la textura de la superficie del carburo cementado

El análisis SEM mostró que los residuos de desgaste en la superficie texturizada se redujeron significativamente ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), lo que indica que el efecto de captura de textura fue efectivo, reduciendo el desgaste secundario y los rayones de la superficie. La detección EDS confirmó que MoS₂ se enriqueció en el área de textura (ratio Mo:S $\sim 1:2 \pm 0,1$), verificando la estabilidad química del lubricante. XPS mostró además la posición del pico S 2p de MoS₂ ($\sim 162 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), lo que respalda la fuente de sus propiedades de bajo cizallamiento. Después del procesamiento láser, la rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la integridad de la textura $> 95\% \pm 2\%$ y SEM observó que el borde de la textura era liso sin una zona obvia afectada por el calor ($< 10 \mu\text{m}$), asegurando una adhesión uniforme del lubricante y la estabilidad de la película de aceite. En comparación con la superficie sin textura ($R_a \sim 0,5 \mu\text{m}$), la baja rugosidad de la superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

texturizada mejora la adhesión del lubricante y extiende la vida útil de la herramienta.

9.3.2.5 Efecto de los parámetros de textura de la superficie del carburo

La profundidad de la textura tiene un doble efecto en la lubricación y el rendimiento antidesgaste. Una profundidad de $5\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ optimiza el efecto hidrodinámico, y una presión de $> 1\ \text{MPa} \pm 0,1\ \text{MPa}$ favorece la estabilidad de la película de aceite, con un coeficiente de fricción de $0,12 \pm 0,01$. Sin embargo, cuando la profundidad de la textura supera los $10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, la tasa de desgaste aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que las texturas demasiado profundas pueden provocar concentración de tensiones o acumulación excesiva de lubricante. El análisis SEM muestra que, cuando la profundidad es $> 10\ \mu\text{m}$, la eficiencia de captura de residuos de desgaste disminuye ($< 85\%$) y el desgaste local aumenta. Una separación de $50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$ garantiza una distribución uniforme de la película de aceite (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), mientras que una separación demasiado grande ($> 100\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) puede reducir la eficiencia de almacenamiento del lubricante, elevando el coeficiente de fricción a $0,18 \pm 0,01$. En el futuro, la lubricación y la resistencia al desgaste podrán equilibrarse mediante un diseño de textura multiescala (como una microtextura de $5\ \mu\text{m}$ combinada con una nanotextura de $100\ \text{nm}$).

(1) Comportamiento de fricción e influencia de la velocidad

El coeficiente de fricción muestra cierta regularidad con la velocidad de deslizamiento. Cuando la velocidad es $> 0,5\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$, el coeficiente de fricción disminuye ligeramente ($< 5\% \pm 1\%$). Esto se debe a que la formación dinámica de la película de transferencia de MoS_2 se acelera a alta velocidad, el espesor de la película de aceite aumenta ligeramente ($> 1,1\ \mu\text{m}$) y la fuerza de corte se reduce aún más ($< 0,9\ \text{MPa}$). La observación SEM muestra que después de la fricción a alta velocidad, la tasa de cobertura de la película de transferencia aumenta a $> 95\% \pm 2\%$ y la fuerza de adhesión disminuye a $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$. Sin embargo, una velocidad excesiva ($> 1\ \text{m/s} \pm 0,01\ \text{m/s}$) puede causar daño a la película de aceite ($< 90\%$) y el coeficiente de fricción aumenta de nuevo. La profundidad de la textura y el contenido de lubricante deben optimizarse para adaptarse a las condiciones de trabajo de alta velocidad. El control del calor por fricción ($< 100\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$) se beneficia de la disipación del calor de la textura, lo que prolonga la durabilidad de la herramienta.

(2) Dirección de verificación y optimización de aplicaciones

El mecanismo de lubricación de textura se ha verificado en aplicaciones de ingeniería. En corte a alta velocidad, el coeficiente de fricción de WC_5MoS_2 (profundidad de textura de $5\ \mu\text{m}$) es de $0,12 \pm 0,01$, lo que supone una vida útil de la herramienta $> 5000\ \text{m} \pm 500\ \text{m}$ y una fuerza de corte reducida. En mecanizado en seco, la adhesión de WC_3C es de $0,7\ \text{N} \pm 0,1\ \text{N}$, el calor por fricción es $< 100\ ^\circ\text{C} \pm 1\ ^\circ\text{C}$ y es adecuado para el procesamiento de aleaciones de aluminio. En el conformado de moldes, la fuerza de desmoldeo de WC_5MoS_2 es $< 10\ \text{N} \pm 1\ \text{N}$ y la vida útil es $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces. Se pueden lograr optimizaciones futuras ajustando la profundidad de la textura a $7-10\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ para mejorar la capacidad de carga de la película de aceite y reducir el coeficiente de fricción a $0,1 \pm 0,01$; utilizando nanomaquinado láser (longitud de onda $532\ \text{nm}$) para refinar la textura a $100\ \text{nm}$ y reducir la tasa de desgaste a $< 0,04\ \text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$; combinado con un recubrimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de MoS₂ rociado con plasma (espesor 15 μm), puede adaptarse a entornos de alta temperatura (> 800 °C) o alta carga (> 200 N), como motores de aeronaves y maquinaria pesada.

Reduce el coeficiente de fricción a $0,12 \pm 0,01$ mediante el almacenamiento de lubricante (> 90 %) y la captura de partículas de desgaste. La profundidad de 5 μm optimiza el efecto hidrodinámico. La película de transferencia de MoS₂ (10 nm) reduce la fuerza de cizallamiento. El efecto de lubricación se verifica mediante SEM y EDS. El procesamiento láser garantiza un Ra < 0,1 μm. En el futuro, la nanotexturización y la optimización del recubrimiento pueden mejorar aún más su rendimiento en condiciones de trabajo extremas.

9.3.2.6 Análisis de los factores que afectan la textura de la superficie y la lubricación del carburo cementado

El rendimiento de lubricación de la textura superficial de carburo cementado se ve afectado por una combinación de factores que determinan su coeficiente de fricción y resistencia al desgaste en corte a alta velocidad, mecanizado en seco y conformado de moldes al cambiar la distribución del lubricante, la estabilidad de la película de aceite, la calidad del procesamiento y las condiciones ambientales. Parámetros clave como la profundidad de la textura, el espaciado, el contenido de lubricante, la precisión del mecanizado y la humedad ambiental afectan directamente el equilibrio entre el efecto de autolubricación y las propiedades mecánicas. Al analizar el mecanismo y la interacción de estos factores, el diseño de la textura y la tecnología de procesamiento se pueden optimizar para satisfacer las necesidades de escenarios de alta demanda como moldes electrónicos, componentes de aviación y herramientas de perforación petrolera. Esta sección analiza en detalle el impacto de cada factor influyente en el rendimiento de la lubricación con base en sus características, datos experimentales y casos de aplicación, y presenta sugerencias de mejora.

(1) Profundidad de textura

La profundidad de la textura tiene un efecto significativo en la lubricación y el rendimiento del desgaste. Cuando la profundidad es de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, el coeficiente de fricción permanece bajo ($< 0,12 \pm 0,01$). Esto se debe a que la profundidad apropiada optimiza la lubricación hidrodinámica. El espesor de la película de aceite es de aproximadamente $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y la presión es $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ para soportar la capacidad de carga del lubricante. El análisis SEM muestra que una profundidad de 5 μm asegura que la película de transferencia de MoS₂ (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) tenga una cobertura de $> 90\% \pm 2\%$, y la tasa de desgaste se controla a $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Sin embargo, cuando la profundidad de la textura supera los $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la tasa de desgaste aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que una textura demasiado profunda provoca una concentración de tensiones o una acumulación excesiva de lubricante, lo que reduce la eficiencia de la captura de viruta ($< 85\%$) e intensifica el desgaste local. Por ejemplo, la tasa de desgaste de WC5MoS₂ con una profundidad de textura de $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ alcanza los $0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, mientras que con una profundidad de textura de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ es de tan solo $0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, lo que indica que es necesario controlar la profundidad con precisión para equilibrar la lubricación y la resistencia al desgaste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Espaciado de texturas

El espaciado de las texturas es fundamental para la estabilidad de la película de aceite y la uniformidad de la lubricación. Un rango de espaciado de $50-100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ garantiza una distribución uniforme de la película de aceite (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), un coeficiente de fricción $< 0,12 \pm 0,01$ y una fuerza de adhesión $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Las observaciones mediante SEM muestran que las microranuras con un espaciado de $50 \mu\text{m}$ almacenan eficazmente partículas de MoS_2 y C, y la cobertura de la película de transferencia es $> 90 \% \pm 2 \%$, lo que facilita el corte a alta velocidad y el mecanizado en seco. Sin embargo, cuando el espaciado es inferior a $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, el coeficiente de fricción aumenta en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$, lo que se debe al hecho de que la textura demasiado densa restringe el flujo de lubricante, el espesor de la película de aceite se reduce ($< 0,9 \mu\text{m}$), el contacto local aumenta y la fuerza de adhesión puede aumentar a $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si el espaciado es demasiado grande ($> 100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), la eficiencia de almacenamiento se reducirá y el coeficiente de fricción aumentará a $0,18 \pm 0,01$. Se requiere procesamiento láser para optimizar la distribución del espaciado. En el futuro, se puede utilizar un diseño de espaciado graduado para mejorar la uniformidad de la lubricación.

(3) Lubricante

El contenido de lubricante afecta directamente la calidad y las propiedades mecánicas de la película de transferencia. Con un contenido de MoS_2 del $5 \% \pm 0,1 \%$, la cobertura de la película de transferencia es alta ($> 90 \% \pm 2 \%$), el coeficiente de fricción se reduce a $0,12 \pm 0,01$ y la estructura en capas (distancia entre capas de $6,2 \text{ \AA}$) ($\pm 0,1 \text{ \AA}$) reduce la fuerza de corte ($< 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$) mediante fuerzas de van der Waals débiles ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$). El análisis EDS muestra un enriquecimiento de MoS_2 ($\text{Mo:S} \sim 1:2 \pm 0,1$), lo que mejora el efecto antiadherente. Sin embargo, cuando el contenido de MoS_2 supera el $10 \% \pm 0,1 \%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, debido a que el exceso de lubricante provoca debilitamiento o aglomeración de los límites de grano ($> 0,1 \%$), lo que aumenta el riesgo de microfisuras. Un contenido de AC del $3 \% \pm 0,1 \%$ proporciona deslizamiento sp^2 (energía de deslizamiento $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) y adhesión $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. Si el contenido de C es demasiado alto ($> 5 \% \pm 0,1 \%$), la dureza disminuirá ($> 10 \% \pm 2 \%$) y será necesario optimizar la relación. En el futuro, se podrán introducir nanolubricantes para aumentar la cobertura.

(4) Precisión del procesamiento

La precisión del procesamiento es crucial para la calidad de la textura y el efecto de lubricación. El procesamiento con una potencia láser de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ garantiza una integridad de la textura $> 95 \% \pm 2 \%$, una rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y la SEM verifica que el borde de la textura sea liso y que no haya zonas afectadas por el calor ($< 10 \mu\text{m}$). El procesamiento de alta precisión promueve la adhesión de la película de transferencia de MoS_2 , el coeficiente de fricción se mantiene en $0,12 \pm 0,01$ y la tasa de desgaste es $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$. Sin embargo, cuando la potencia del láser supera los $20 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, el daño aumenta aproximadamente un $5 \% \pm 1 \%$, se observan microfisuras ($< 0,5 \mu\text{m}$) o zonas de fusión ($> 15 \mu\text{m}$) en los bordes de la textura mediante SEM, la estabilidad de la película de aceite disminuye ($< 90 \%$) y el coeficiente de fricción aumenta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a $0,16 \pm 0,01$. La optimización requiere controlar la potencia y la velocidad de escaneo ($100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$), y en el futuro se podrán utilizar láseres multihaz para mejorar la consistencia del procesamiento.

(5) Medio ambiente

Las condiciones ambientales tienen un impacto significativo en el rendimiento de la lubricación. Cuando la humedad supera el $50\% \pm 5\%$, el coeficiente de fricción aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que el agua se adsorbe en las superficies de MoS_2 y C, lo que debilita la capacidad de deslizamiento entre capas y reduce la cobertura de la película de transferencia ($<85\%$), lo que aumenta la fuerza de adhesión a $1 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. El análisis SEM muestra que aparecen trazas de óxidos ($<0,1\%$) en la superficie con alta humedad, lo que aumenta la resistencia a la fricción. En entornos de procesamiento en seco o marinos, el control de la humedad al $30\%-50\%$ puede optimizar la lubricación. La capa de pasivación de NiO de Ni (espesor $\sim 10 \text{ nm}$) proporciona protección en entornos de alta humedad, con una pérdida de peso de $<0,06 \text{ mg/cm}^2$. En el futuro, se podrán utilizar recubrimientos antihumedad (como TiN, espesor $2 \mu\text{m}$) o desecantes (como SiO_2 , $<1\%$) para reducir el impacto de la humedad y mantener un rendimiento de baja fricción.

(6) Casos completos y direcciones de optimización

Tomando WC_5MoS_2 como ejemplo, bajo las condiciones de profundidad de textura de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, espaciado de $50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, MoS_2 $5\% \pm 0,1\%$ y potencia de láser de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, el coeficiente de fricción es de $0,12 \pm 0,01$ y la tasa de desgaste es de $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, mejor que $0,08 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ a una profundidad de $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. En un entorno de humedad del 60% , el coeficiente de fricción aumenta a $0,132 \pm 0,01$, pero se puede restaurar a $0,125 \pm 0,01$ mediante pulido a $R_a < 0,05 \mu\text{m}$. La optimización futura puede ajustar la profundidad de la textura a $7-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ para mejorar la capacidad de soporte de la película de aceite; optimizar el espaciado a $40-60 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ para mejorar la uniformidad de la lubricación; controlar el contenido de MoS_2 al $4\%-6\%$ para evitar una disminución de la tenacidad; limitar la potencia del láser a $8-12 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$ para reducir los daños; y desarrollar un recubrimiento a prueba de humedad para adaptarse a entornos de alta temperatura ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) o alta humedad ($> 70\%$).

El rendimiento de lubricación de la textura superficial de carburo cementado se ve afectado por la profundidad de la textura ($5 \mu\text{m}$), el espaciado ($50-100 \mu\text{m}$), el contenido de MoS_2 (5%), la precisión de procesamiento (10 W) y la humedad ambiental ($< 50\%$). Una profundidad de $5 \mu\text{m}$ reduce el coeficiente de fricción a $0,12$, mientras que una profundidad excesiva aumenta la tasa de desgaste. En el futuro, su rendimiento en condiciones de trabajo extremas podrá mejorarse mediante la optimización de parámetros y recubrimientos.

9.3.2.7 Textura de la superficie del carburo cementado y estrategia de optimización de la lubricación

Para lograr un coeficiente de fricción de $< 0,2 \pm 0,01$ para la textura de la superficie del carburo, teniendo en cuenta las propiedades antiadherentes (fuerza de adhesión $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$) y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,06 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), que debe lograrse mediante una estrategia integral de diseño de textura, optimización de lubricantes, mejora de la tecnología de procesamiento y optimización del tratamiento de superficies. Estas medidas tienen como objetivo mejorar el efecto autolubricante de MoS_2 y C, cumpliendo con los requisitos de baja fricción del corte a alta velocidad, el mecanizado en seco y la conformación de moldes, al tiempo que se mantiene la dureza ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{1c} > 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) de la matriz WC. A continuación se presenta una descripción detallada del esquema de optimización desde los aspectos de los parámetros de textura, la relación de lubricante, la tecnología de procesamiento, el tratamiento de la superficie y las especificaciones de prueba, y su viabilidad se verifica combinando resultados reales.

(1) Diseño de textura

El diseño de textura es fundamental para optimizar el rendimiento de la lubricación, con una profundidad recomendada de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y un rango de espaciado de $50\text{-}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Esta profundidad forma una película de aceite estable (espesor de $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) mediante el efecto hidrodinámico, con una presión $> 1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$, y el coeficiente de fricción se reduce a $0,12 \pm 0,01$. El análisis SEM muestra que la cobertura de la película de transferencia es $> 90 \% \pm 2 \%$. El espaciado de $50\text{-}100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ garantiza una distribución uniforme de la película de aceite (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), captura los residuos de desgaste ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y reduce el desgaste de tres cuerpos, con una tasa de desgaste de $< 0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. En comparación con una profundidad $> 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ (tasa de desgaste aumentada en un $10 \% \pm 2 \%$), una profundidad de $5 \mu\text{m}$ evita la concentración de tensiones y es adecuada para requisitos de corte y conformado de moldes a alta velocidad.

(2) Lubricante

La optimización del lubricante mejora el efecto de lubricación. El contenido de MoS_2 se establece en $5 \% \pm 0,1 \%$. Su estructura en capas (distancia entre capas: $6,2 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) forma una película de transferencia (espesor: $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) mediante fuerzas de van der Waals débiles ($0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$), y el coeficiente de fricción se reduce a $0,12 \pm 0,01$. El contenido de C se controla en $3 \% \pm 0,1 \%$, y su estructura de enlace sp^2 (energía de deslizamiento: $0,01 \text{ eV} \pm 0,001 \text{ eV}$) reduce la adhesión a $< 0,8 \text{ N} \pm 0,1 \text{ N}$. El microscopio electrónico de barrido (MEB) verifica que el lubricante se distribuya uniformemente (desviación: $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$). Un $\text{MoS}_2 > 10 \% \pm 0,1 \%$ o $\text{C} > 5 \% \pm 0,1 \%$ puede provocar una disminución de K_{1c} ($10 \%\text{-}15 \%$). Los inhibidores de trazas (como VC, $< 1 \%$) pueden optimizar la compatibilidad. En el futuro, se podrán introducir nanolubricantes para mejorar la cobertura.

(3) Tecnología de procesamiento

La tecnología de procesamiento utiliza tecnología láser con una longitud de onda de $1064 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ y una potencia de $10 \text{ W} \pm 0,1 \text{ W}$, lo que garantiza una precisión de textura de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ y una velocidad de escaneo de $100 \text{ mm/s} \pm 1 \text{ mm/s}$. La observación mediante SEM muestra que la integridad de la textura es $> 95 \% \pm 2 \%$ a una potencia de 10 W , $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y no hay zona afectada por el calor ($< 10 \mu\text{m}$), lo que promueve la adhesión de la película de transferencia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MoS₂. En comparación con una potencia > 20 W ± 0,1 W (aumento del daño del 5 % ± 1 %), 10 W evitan microfisuras (< 0,5 μm) o zonas de fusión, y la atmósfera protectora de Ar previene la oxidación del MoS₂ (temperatura de descomposición > 1200 °C ± 10 °C). El recocido posterior a 800 °C ± 10 °C elimina la tensión y mejora la unión entre la textura y el sustrato.

(4) Tratamiento de superficies

Tratamiento de superficie Optimice la lubricidad mediante pulido, con una rugosidad recomendada de Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm y elimine los defectos mediante pulido con diamante o pulido químico-mecánico (CMP). Las superficies planas mejoran la adhesión de las películas de transferencia de MoS₂ (cobertura > 95 % ± 2 %), reducen el coeficiente de fricción a 0,12 ± 0,01 y la adhesión < 0,7 N ± 0,1 N. La limpieza ultrasónica después del pulido elimina los residuos y el SEM verifica la uniformidad (desviación < 0,1 %), reduciendo el aumento de fricción (< 5 % ± 1 %) causado por la humedad (> 50 % ± 5 %). En la conformación de moldes, un Ra < 0,05 μm reduce la fuerza de desmoldeo (< 10 N ± 1 N) y mejora la calidad de la pieza de trabajo. En el futuro, se podrá combinar con un revestimiento de TiN (espesor de 2 μm) para mejorar la resistencia al desgaste.

(5) Especificaciones de prueba

La prueba adopta la norma ASTM G99, prueba de fricción y desgaste de pasador-disco, con una carga de 10 N ± 0,1 N y una velocidad de 0,1 m/s ± 0,01 m/s, simulando condiciones de trabajo a baja velocidad. El entorno se controla a 25 °C ± 2 °C y una humedad del 50 % ± 5 %, se repite 3 veces y se promedia para medir el coeficiente de fricción y la tasa de desgaste. En estas condiciones, el coeficiente de fricción de la muestra de WC5MoS₂C3 es de 0,12 ± 0,01 y la tasa de desgaste es de 0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m, mejor que la muestra no optimizada (0,15 ± 0,01). Al combinar SEM y EDS para analizar la cobertura de la película de transferencia y la distribución del lubricante, se puede ampliar a pruebas de alta velocidad (> 0,5 m/s ± 0,01 m/s) o entornos de alta temperatura (> 400 °C) en el futuro.

(6) Efecto de optimización integral y verificación de la aplicación

A través de la estrategia anterior, WC5MoS₂C3 tiene un coeficiente de fricción de 0,12 ± 0,01, fuerza de adhesión de 0,7 N ± 0,1 N y tasa de desgaste de 0,05 mm³ / N·m en las condiciones de 5 μm de profundidad de textura, 50-100 μm de paso, láser de 1064 nm y Ra < 0,05 μm. ± 0,01 mm³ / N·m, dureza HV 1550 ± 30, K_{1c} 10 MPa·m^{1/2} ± 0,5. Vida útil de la herramienta > 5000 m ± 500 m en corte de alta velocidad; calor por fricción < 100 °C ± 1 °C en mecanizado en seco; Vida útil de la herramienta > 10⁶ veces ± 10⁵ veces en el troquelado. En comparación con el WC10Co (coeficiente de fricción 0,5 ± 0,05), el rendimiento tras la optimización se ha mejorado aproximadamente un 75 %. En el futuro, podrá adaptarse a altas temperaturas (> 800 °C) o cargas elevadas (> 200 N) mediante nanotexturizado o recubrimiento multicapa.

(7) Control ambiental y desarrollo futuro

La humedad se controla entre un 30 % y un 50 % para evitar su aumento (10 % ± 2 %). La protección contra Ar y el recubrimiento antihumedad (como SiO₂, < 1 %) mejoran la estabilidad. En el futuro, se podrán introducir pruebas de desgaste dinámico (> 1 m/s ± 0,01 m/s) o pruebas de durabilidad a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

largo plazo (> 1000 horas), combinadas con pulverización de plasma (espesor de 15 μm), para ampliar las aplicaciones en aviación y energía.

La textura de la superficie del carburo se optimiza con una profundidad de 5 μm , una separación de 50-100 μm , MoS₂ 5% y C 3%, láser de 1064 nm y Ra < 0,05 μm para lograr un coeficiente de fricción < 0,2. La prueba ASTM G99 verifica este efecto. En el caso del WC5MoS₂ C3, el rendimiento es superior al del WC10Co, y puede mejorarse aún más en el futuro mediante nanotecnología y recubrimientos.

9.3.2.8 Textura de superficie de carburo cementado y aplicación de ingeniería de lubricación

La textura superficial del carburo cementado, combinada con lubricantes de MoS₂ y C, mejora significativamente su rendimiento autolubricante, lo que le confiere un excelente rendimiento en diversas aplicaciones de ingeniería de alta exigencia. La estructura de la textura reduce el coeficiente de fricción (< 0,2 \pm 0,01) y la adhesión (< 0,8 N \pm 0,1 N) al optimizar la formación de la película de aceite y la captura de viruta, prolongando la vida útil de herramientas y componentes, y cumpliendo con los requisitos de aplicación de corte de alta velocidad, mecanizado en seco y maquinaria de precisión. A continuación, se detalla su valor en aplicaciones de ingeniería, basándose en aplicaciones específicas, ventajas de rendimiento y casos reales, y se analiza su contribución a la eficiencia y durabilidad industrial.

(1) Herramientas de alta velocidad

En aplicaciones de herramientas de alta velocidad, WC5MoS₂ tiene un buen rendimiento gracias a sus excelentes propiedades autolubricantes. La profundidad de textura se establece en 5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que optimiza la formación de la película de transferencia de MoS₂ (espesor 10 nm \pm 1 nm) y el coeficiente de fricción se reduce a 0,12 \pm 0,01. El análisis SEM muestra que la cobertura de la película de transferencia es > 90% \pm 2%, lo que reduce el contacto directo entre las virutas y la superficie de la herramienta y extiende la vida útil de la herramienta en más de 5000 m \pm 500 m, superando ampliamente la herramienta tradicional WC10Co (vida útil de aproximadamente 3000 m). Este rendimiento es particularmente significativo en el procesamiento de materiales de alta dureza (como aleaciones de titanio o acero inoxidable) o condiciones de alta velocidad (> 500 m/min), reduciendo las fuerzas de corte y las tasas de desgaste, mejorando el acabado superficial y reduciendo el uso de refrigerante, cumpliendo con los requisitos de fabricación ecológica.

(2) Molde seco

En el caso del molde seco, el WC3C se prefiere por su baja adhesión y larga vida útil. El espaciado de texturas se establece en 50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ para garantizar una distribución uniforme de la película de aceite (desviación < 0,1 % \pm 0,02 %). La estructura de enlace sp² del C (energía de deslizamiento 0,01 eV \pm 0,001 eV) forma una película lubricante estable, y la adhesión se reduce a 0,8 N \pm 0,1 N. La observación mediante SEM muestra que la textura captura los residuos de desgaste (< 1 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), reduce el desgaste secundario y la vida útil del molde supera 10⁶ \pm 10⁵ veces, superando ampliamente la del molde WC10Co (vida útil de aproximadamente 5 \times 10⁵ veces). En el moldeo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

por inyección en seco o el estampado, como en los tableros de instrumentos de automóviles o en la fabricación de carcasas electrónicas, la baja adhesión reduce la adhesión de la pieza de trabajo y el calor por fricción se controla a $<100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que mejora la eficiencia de producción y la calidad de la superficie, lo que refleja las ventajas del procesamiento respetuoso con el medio ambiente.

(3) Componentes del cojinete

En aplicaciones de componentes de cojinetes, WC5MoS_2 exhibe excelente durabilidad y propiedades de baja fricción, con una superficie pulida a $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, adhesión mejorada de la película de transferencia de MoS_2 (cobertura $> 95\% \pm 2\%$) y un coeficiente de fricción estable de $0,15 \pm 0,01$. La profundidad de textura de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ optimiza la lubricación hidrodinámica, y el espesor de la película de aceite es de aproximadamente $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, lo que reduce el desgaste del par de fricción en el cojinete y tiene una vida útil de más de 10^4 horas $\pm 10^3$ horas, que es mejor que los cojinetes de acero tradicionales (vida útil de aproximadamente 5000 horas). Este rendimiento es excepcional en motores de aeronaves, sistemas de transmisión de automóviles y maquinaria industrial, reduciendo la frecuencia de mantenimiento y el consumo de energía, mientras que la capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10\text{ nm}$) proporciona protección adicional contra la corrosión en entornos de alta humedad y mejora la confiabilidad.

(4) Recubrimiento de turbinas de aviación

El recubrimiento texturizado WC10MoS_2 ofrece un excelente rendimiento en componentes de turbinas de aviación. La profundidad de textura de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ y el espaciado de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ reducen la fricción causada por el flujo de aire a alta velocidad y el arrastre de partículas. El coeficiente de fricción es de $0,12 \pm 0,01$ y la vida útil se extiende a más de 6000 horas. La alta estabilidad térmica del MoS_2 ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) mantiene el efecto lubricante en el entorno del motor. El calor por fricción es $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que mejora la resistencia a la fatiga del recubrimiento, reduce el coste de mantenimiento de los componentes de aviación y lo hace adecuado para vuelos a gran altitud.

(5) Herramientas de perforación petrolera

Las brocas texturizadas $\text{WC8MoS}_2\text{C}$ (MoS_2 5 %, C 3 %) ofrecen un excelente rendimiento en la perforación petrolera, con una profundidad de textura de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ para capturar los detritos de perforación ($< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), una adhesión $< 0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ y un aumento aproximado del 25 % en la vida útil de la broca en comparación con los materiales convencionales. En condiciones de perforación en seco, con un calor por fricción $< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, el MoS_2 y el C reducen sinérgicamente la resistencia al corte, lo que mejora la eficiencia en formaciones rocosas con contenido de azufre o de alta dureza, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y los costos operativos.

(6) Dispositivos médicos

Los bisturíes texturizados WC5MoS_2 muestran potencial en el campo médico. Su espaciado de textura de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ y $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ garantizan un corte de baja fricción, un coeficiente de fricción de $0,12 \pm 0,01$, una adhesión de $0,7\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ y la reducción del daño tisular.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Su vida útil supera las 5000 veces, cumpliendo con los requisitos de alta precisión en un entorno estéril y mejorando la seguridad quirúrgica y la durabilidad del instrumental.

(7) Beneficios integrales y aplicaciones ampliadas

El efecto sinérgico de la textura superficial y el lubricante mejora significativamente el rendimiento del carburo cementado, las herramientas de alta velocidad prolongan la vida útil de corte, los moldes secos mejoran la eficiencia de producción, los componentes de los rodamientos mejoran la durabilidad, los recubrimientos para aviación reducen los costos de mantenimiento, las herramientas de perforación petrolera optimizan la eficiencia operativa y los dispositivos médicos garantizan la seguridad. En comparación con WC10Co (coeficiente de fricción $0,5 \pm 0,05$, adhesión $> 2 \text{ N}$), el coeficiente de fricción del sistema de textura WCTiCNi se reduce en aproximadamente un 75% y la adhesión se reduce en más de un 50%, lo que mejora la precisión del procesamiento y la vida útil de la herramienta. Además, el diseño de texturas admite nuevas aplicaciones, como capas resistentes al desgaste de vías férreas, WC8MoS₂C reduce las pérdidas por fricción en las vías; electrónica portátil, la baja adhesión de WC3C admite componentes conductores flexibles. En el futuro, su aplicación en los campos de la energía y la aviación se puede expandir mediante nanotexturizado o recubrimientos multicapa.

Las texturas superficiales de carburo ofrecen un excelente rendimiento en herramientas de alta velocidad, moldes secos, componentes de rodamientos, recubrimientos de aviación, herramientas de perforación petrolera y dispositivos médicos. El coeficiente de fricción del WC5MoS₂ es de $0,12 \pm 0,01$ y su vida útil es $> 5000 \mu\text{m}$; la adhesión del WC3C es de $0,8 \text{ N}$ y su vida útil es $> 10^6$ veces mayor; y su vida útil es $> 10^4$ horas, lo que confirma el rendimiento autolubricante de la optimización sinérgica de la textura y el lubricante. En el futuro, la innovación en materiales permitirá satisfacer una gama más amplia de necesidades.

9.4 Biónica y carburo cementado inteligente

El carburo cementado biónico e inteligente logra adaptabilidad (tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) y **alto rendimiento (dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$)** a través de un diseño de material innovador, combinado con **una estructura de gradiente** (porosidad $5\%-20\% \pm 1\%$), **estructura porosa (tamaño de poro $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$)** y material sensible (tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$), satisfaciendo las necesidades de fabricación inteligente (precisión $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), biomedicina (compatibilidad $> 95\% \pm 2\%$) y aviación (vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) y otros campos. El carburo cementado tradicional carece de adaptabilidad debido a su estructura uniforme y densa, lo que dificulta su adaptación a cargas dinámicas, cambios de temperatura o entornos biológicos, lo que limita su aplicación en condiciones de trabajo complejas. El diseño biónico se inspira en la estructura multinivel y las propiedades adaptativas de la naturaleza (como las conchas y el bambú), combinadas con la capacidad de deformación de materiales de respuesta inteligente (como la aleación NiTi), lo que aporta un potencial inteligente al carburo cementado.

Esta sección parte del principio de diseño de la microestructura biónica (gradiente y porosa), el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mecanismo y las perspectivas de aplicación de los materiales de respuesta inteligente, y combina casos de biónica, análisis de propiedades de materiales y ejemplos de ingeniería para explorar el desarrollo del carburo cementado hacia la inteligencia. Por ejemplo, la dureza del gradiente WC-Co (porosidad $10\% \pm 1\%$) alcanza una HV de 1450 ± 30 y una tasa de deformación del $0,05\% \pm 0,01\%$, lo que cumple con éxito los requisitos de ajuste dinámico de los moldes inteligentes.

Diseño de microestructura biónica

La microestructura biónica es el núcleo del carburo cementado inteligente, que se inspira en la estructura de gradiente en capas de las conchas y la disposición de tenacidad porosa del bambú. La estructura de gradiente logra la transición de alta dureza superficial ($> HV 1500$) a alta tenacidad interna ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) a través de la distribución gradual de la porosidad del 5% al $20\% \pm 1\%$. El análisis SEM muestra que los poros están distribuidos uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), lo que mejora la capacidad de resistir la propagación de grietas. La estructura porosa está diseñada con un tamaño de poro de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que aumenta la permeabilidad del material y facilita la penetración de lubricantes (como MoS_2) o el crecimiento de tejidos biológicos. Con una porosidad del $10\% \pm 1\%$, la dureza se mantiene en $HV 1450 \pm 30$ y la tasa de deformación es $< 0,1\% \pm 0,01\%$, lo que cumple con los requisitos de deformación adaptativa. La estructura alternada de capas de CaCO_3 y capas orgánicas en las conchas inspiró la optimización mecánica del diseño de gradiente, y la disposición porosa de los entrenudos del bambú guió la dispersión de la tensión de la estructura porosa. En comparación con la estructura simple tradicional de WC-Co, el diseño biónico mejoró la resistencia a la fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces).

Materiales de respuesta inteligente

Los materiales de respuesta inteligente proporcionan adaptabilidad al carburo cementado. La aleación de deformación NiTi es un ejemplo representativo. Su efecto de memoria de forma y superelasticidad (tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$) ajustan la deformación del material dentro de un tiempo de respuesta de $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ para adaptarse a cargas dinámicas o cambios de temperatura. La temperatura de transición de fase de NiTi (aproximadamente $50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) se regula mediante tratamiento térmico. Después de ser integrada en la matriz de WC, la fase de Ni (contenido $5\% - 10\% \pm 0,1\%$) en la estructura de gradiente forma una red inteligente. La observación SEM muestra que las partículas de NiTi están distribuidas uniformemente (desviación $< 0,1\%$), lo que mejora la capacidad de recuperación de la deformación del material ($> 95\% \pm 2\%$). En comparación con el carburo cementado tradicional, los materiales de respuesta inteligente reducen las microfisuras ($< 0,5 \mu\text{m}$) causadas por la expansión térmica o la tensión mecánica. En los componentes de aviación, la vida útil por fatiga aumenta a 10^6 veces $\pm 10^5$ veces, lo que es mejor que el WC10Co (aproximadamente 5×10^5 veces).

9.4.1 Microestructura biónica del carburo cementado (gradiente y porosa)

9.4.1.1 Principio y descripción general de la tecnología del gradiente de carburo cementado y la estructura porosa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La microestructura biónica optimiza significativamente las propiedades mecánicas del carburo cementado (tenacidad a la fractura $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) al combinar una estructura de gradiente (dureza HV $1400-1800 \pm 30$, porosidad $5\%-20\% \pm 1\%$) con una estructura porosa (tamaño de poro $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m} \pm 0,5$) y funcionalidad (tasa de absorción de energía $> 50\% \pm 5\%$), lo que lo hace adaptable y altamente duradero. Su diseño está inspirado en la naturaleza. La estructura en capas de las carcasas (gradiente de dureza de aproximadamente $1 \text{ GPa}/\text{mm} \pm 0,1 \text{ GPa}/\text{mm}$) logra una excelente resistencia al impacto mediante la combinación de CaCO_3 de alta dureza en la capa exterior y la tenacidad de la capa orgánica interna, mientras que la estructura porosa del bambú (porosidad de aproximadamente $30\% \pm 2\%$) optimiza la dispersión del estrés y la absorción de energía a través de la distribución entre los entrenudos. Estos prototipos naturales inspiraron el diseño biónico del carburo cementado, con el objetivo de lograr una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y una vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces para satisfacer aplicaciones de alta demanda como la fabricación inteligente, la biomedicina y la aviación. En comparación con los carburos cementados tradicionales uniformes y densos (como WC-Co), la microestructura biónica mejora la tenacidad y el rendimiento de absorción de energía a través del gradiente y la porosidad, superando las limitaciones de una sola estructura en un entorno dinámico.

El proceso de preparación adopta el método de capas de polvo en gradiente, utilizando polvo fino WC con un tamaño de partícula de $0,52 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y controlando el contenido de Co mediante capas para lograr un gradiente de dureza; agregando agente formador de poros PMMA (tamaño de partícula $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para introducir una estructura porosa; luego sinteriza a $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, combinado con presión moderada ($50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para garantizar la densidad del material y la uniformidad de los poros. Por ejemplo, la dureza del gradiente de WC-Co (porosidad del $10\% \pm 1\%$) alcanza un HV de 1450 ± 30 , y la K_{1c} es de $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, superior a la HV de 1500 ± 30 y los $12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ del WC-Co uniforme $\pm 0,5$, lo que confirma la ventaja de rendimiento del diseño biónico. Esta sección explorará cómo las estructuras de gradiente y porosas pueden mejorar el potencial de aplicación en ingeniería del carburo cementado desde el punto de vista del análisis de mecanismos, el proceso de preparación y la estrategia de optimización.

9.4.1.2 Mecanismo y análisis del gradiente de carburo cementado y estructura porosa

La microestructura biónica del carburo cementado optimiza significativamente sus propiedades mecánicas y funcionalidad mediante el diseño coordinado de la estructura de gradiente y la estructura porosa, lo que proporciona materiales de alto rendimiento para la fabricación inteligente, la biomedicina, la aviación y otros campos. Esta sección analiza en profundidad el mecanismo de la estructura de gradiente y porosa, explora su influencia en la dureza, la tenacidad, la tasa de absorción de energía y la resistencia a la fatiga, y combina la observación microscópica con datos experimentales para revelar cómo el gradiente de contenido de Co, los parámetros porosos y el tamaño de grano de WC pueden mejorar el potencial de aplicación en ingeniería del carburo cementado.

(1) Mecanismo de la estructura del gradiente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La estructura de gradiente forma un gradiente de dureza (HV 1400-1800 ± 30) a través de la distribución gradual del contenido de Co (5%-15% ± 1%). El alto contenido de Co en la superficie (15% ± 1%) proporciona mayor tenacidad, y el bajo contenido de Co en el interior (5% ± 1%) asegura la dureza. El análisis SEM muestra que la distribución de Co es continua (desviación < 0,1% ± 0,02%), evitando defectos en los límites de fase. Este diseño de gradiente aumenta la tasa de dispersión de tensión a > 50% ± 5% y amortigua la concentración de tensión mediante capas. La tenacidad a la fractura (K_{1c}) aumenta aproximadamente un 30% ± 5% en comparación con la estructura uniforme, alcanzando > 15 MPa·m^{1/2} ± 0,5. Las pruebas de fatiga (10⁶ veces ± 10⁵ veces) mostraron que la extensión de la grieta fue suprimida por la estructura de gradiente, con una longitud de < 0,1 mm ± 0,01 mm, que fue mejor que la del WC-Co uniforme (extensión de la grieta > 0,2 mm), gracias a que el gradiente de Co ralentizó la velocidad de propagación de la grieta (< 10⁻⁶ m/s).

(2) Mecanismo de la estructura porosa

La estructura porosa está diseñada con un tamaño de poro de 110 μm ± 0,1 μm, lo que reduce la densidad del material a ~12 g/cm³ ± 0,1 g/cm³, en comparación con 14,5 g/cm³ para WC-Co homogéneo ± 0,1 g/cm³, reduciendo el peso mientras aumenta la absorción de energía > 50% ± 5%. La porosidad 10% ± 1% equilibra la dureza y la tenacidad, la resistencia de la pared del poro > 100 MPa ± 10 MPa proporcionada por los granos de WC 0,5 μm ± 0,01 μm, la observación SEM muestra que la pared del poro es densa (desviación de porosidad < 0,5% ± 0,1%), lo que mejora la resistencia a la compresión. Sin embargo, cuando la porosidad supera el 20% ± 1%, la dureza disminuye aproximadamente un 20% ± 3%, ya que una porosidad excesiva debilita los límites de grano y aumenta la densidad de microfisuras (> 10⁴ m⁻²), lo que afecta la estabilidad estructural. La mejor tasa de absorción de energía se debe a la dispersión de la energía de impacto por la estructura porosa, lo que la hace adecuada para entornos de carga dinámica.

(3) Microanálisis

La observación microscópica mediante SEM confirmó que la distribución de Co del gradiente WC-Co es continua, la desviación de la porosidad de la estructura porosa es < 0,5% ± 0,1% y el tamaño de poro de 110 μm ± 0,1 μm se distribuye uniformemente, lo que mejora la permeabilidad y la absorción de energía del material. La detección EDS verifica el gradiente de contenido de Co (5%-15% ± 1%), y el enriquecimiento superficial de Co (15% ± 1%) proporciona soporte de tenacidad. El análisis XPS muestra que el contenido de oxígeno es bajo (pico de O 1s ~ 532 eV ± 0,1 eV), lo que indica que el proceso de sinterización a 1400 °C ± 10 °C controla eficazmente la oxidación y la estabilidad superficial es mejor que la de la muestra no optimizada (contenido de oxígeno > 0,5%). Los resultados de la prueba de fatiga respaldan además que la extensión de la grieta es < 0,1 mm ± 0,01 mm, lo que verifica el efecto de mejora sinérgica del gradiente y la estructura porosa.

(4) Control de temperatura y rendimiento de sinterización

La temperatura de sinterización de 1400 °C ± 10 °C es clave para controlar la porosidad y las propiedades mecánicas. Es inferior a la temperatura de descomposición del MoS₂ (> 1200 °C ± 10 °C) para garantizar la estabilidad del lubricante, y la atmósfera protectora de Ar reduce la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidación. El control de temperatura reduce la desviación de la porosidad a $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$, mientras que el microscopio electrónico de barrido (MEB) observa un refinamiento del grano de WC de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y una resistencia de la pared del poro de $> 100 \text{MPa} \pm 10 \text{MPa}$. En comparación con la sinterización a alta temperatura ($> 1450 \text{°C} \pm 10 \text{°C}$), 1400°C evita la caída de dureza ($> 10 \% \pm 2 \%$) causada por el crecimiento del grano ($> 2 \mu\text{m}$) y mantiene $K_{1c} > 15 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

(5) Dirección de verificación y optimización de aplicaciones

La estructura porosa de gradiente se desempeña bien en ingeniería, gradiente WC-Co (porosidad $10\% \pm 1\%$) dureza HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces, adecuado para moldes inteligentes y piezas de aviación. La optimización se puede lograr refinando la porosidad al $5\%-10\% \pm 0,5\%$, reduciendo el tamaño de poro a $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, introduciendo nano-WC ($< 0,3 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia de la pared del poro ($> 120 \text{MPa}$), combinando la impresión 3D para lograr gradientes complejos y adaptándose a altas temperaturas ($> 800 \text{°C}$) o cargas elevadas ($> 200 \text{N}$).

La microestructura biónica de carburo cementado alcanza una dureza de HV 1400-1800 mediante un gradiente de Co (5%-15%), un aumento de K_{13} del 30%, una estructura porosa (tamaño de poro de $110 \mu\text{m}$) con una tasa de absorción de energía $> 50\%$ y sinterización a 1400°C para garantizar su rendimiento. Tomando como ejemplo el gradiente WC-Co (HV 1450, K_{13} de $16 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), su durabilidad podrá mejorarse aún más mediante la nanooptimización en el futuro.

9.4.1.3 Análisis de los factores que afectan la microestructura biónica, el gradiente y la estructura porosa del carburo cementado

El rendimiento de la microestructura biónica, el gradiente y la estructura porosa del carburo cementado está regulado por numerosos factores, como la porosidad, el gradiente de Co, el tamaño de poro, la temperatura de sinterización y el tamaño de grano. Estos factores afectan la dureza, la tenacidad a la fractura (K_{1c}), la resistencia y la tasa de absorción de energía del material mediante mecanismos microscópicos. A continuación, se presenta un análisis de cada factor y su fundamento teórico, basado en principios científicos como la mecánica de fracturas, la teoría de la interfaz compuesta, el equilibrio termodinámico, el modelo mecánico del material poroso, el mecanismo de endurecimiento del grano y la cinética de sinterización.

(1) Porosidad

La porosidad afecta directamente la tenacidad a la fractura (K_{1c}) y la dureza del carburo cementado. Cuando la porosidad es del $10 \% \pm 1 \%$, K_{1c} es mayor ($> 15 \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), porque los poros moderados ayudan a dispersar la tensión; cuando la porosidad supera el $20 \% \pm 1 \%$, la dureza disminuye aproximadamente un $20 \% \pm 3 \%$ (por ejemplo, de HV 1450 ± 30 a HV 1200 ± 30), porque el aumento de la porosidad conduce a un debilitamiento de la continuidad del material. Según la teoría de grietas de Griffith, los poros actúan como la fuente inicial de grietas, y la porosidad excesiva aumenta la liberación de energía de la propagación de grietas y reduce la dureza; Mientras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que los poros distribuidos uniformemente aumentan K_{1c} a través de mecanismos de disipación de energía (como la deformación plástica), lo que es consistente con el comportamiento mecánico de los materiales porosos en el modelo de Gibson-Ashby.

(2) Gradiente de Co

La distribución del gradiente de cobalto (Co) mejora el rendimiento de dispersión de tensión. Cuando el contenido de Co es del 5%-15% \pm 1%, el efecto de dispersión de tensión es bueno y la tenacidad a la fractura se mejora en aproximadamente un 10% \pm 2%. Esto se debe a que el gradiente de Co más bajo forma una red de fase de enlace estable, que se ajusta al modelo de distribución de gradiente controlado por difusión en la segunda ley de Fick; cuando el contenido de Co supera el 20% \pm 1%, la segregación aumenta en aproximadamente un 10% \pm 2% (desviación local del contenido de Co $>$ 0,5% \pm 0,1%), lo que resulta en el debilitamiento de los límites de grano y las fluctuaciones de dureza intensificadas. Esto sigue la teoría de separación de fases (minimización de la energía libre de Gibbs), aumenta la energía del límite de grano ($>$ 1 J/m²) y reduce la resistencia del material.

(3) Apertura

El tamaño de poro afecta la tasa de absorción de energía y la resistencia. Cuando el tamaño de poro es de 10 $\mu\text{m} \pm$ 0,1 μm , la tasa de absorción de energía es alta ($>$ 90% \pm 2%) porque el pequeño tamaño de poro facilita la dispersión de la tensión; cuando el tamaño de poro supera los 20 $\mu\text{m} \pm$ 0,1 μm , la resistencia disminuye aproximadamente un 15% \pm 3% (por ejemplo, de 1000 MPa a 850 MPa \pm 20 MPa), lo que se debe a que los poros grandes inducen fácilmente la concentración de la tensión. Con base en la teoría de Hashin-Shtrikman, los poros pequeños aumentan la tasa de absorción de energía al dispersar la tensión, mientras que los poros grandes conducen a la concentración local de la tensión, lo cual es consistente con la teoría del esfuerzo cortante máximo.

(4) Temperatura de sinterización

La temperatura de sinterización tiene un efecto significativo en la estabilidad de la microestructura y la porosidad. A 1400 $^{\circ}\text{C} \pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, la estructura es estable y la desviación de la porosidad es inferior al 1% \pm 0,1%. Esto se debe a que la temperatura es cercana al punto de fusión del Co (1495 $^{\circ}\text{C}$), lo que forma una fase líquida uniforme, lo que promueve la reorganización de las partículas, lo cual es consistente con la teoría de sinterización en fase sólida y líquida del modelo Kingery; cuando la temperatura supera los 1450 $^{\circ}\text{C} \pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, la desviación de la porosidad aumenta aproximadamente un 5% \pm 1% (porosidad local $>$ 0,5% \pm 0,1%), lo que resulta en una disminución de la uniformidad del material, lo cual es consistente con el crecimiento exponencial de la tasa de difusión en la ecuación de Arrhenius.

(5) Tamaño del grano

El tamaño de grano afecta la optimización del rendimiento. Cuando el tamaño de grano es de 0,51 $\mu\text{m} \pm$ 0,01 μm , el rendimiento es óptimo y K_{1c} alcanza 16 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5, y la dureza es estable a HV 1450 \pm 30. Esto se debe a que los granos finos aumentan la densidad del límite de grano ($>$ 10¹⁴ m⁻²), lo que dificulta la propagación de grietas y sigue la relación de Hall-Petch; cuando el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tamaño de grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, K_{1c} disminuye en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (a $14,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), lo que es consistente con el mecanismo de fortalecimiento de Orowan debido a la disminución de la densidad del límite de grano.

(6) Ejemplo completo

Tomando WC-Co como ejemplo, la muestra con una porosidad de $25\% \pm 1\%$ tiene demasiados poros, por lo que la dureza es solo $\text{HV } 1200 \pm 30$ y la K_{1c} cae a $13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$; mientras que la muestra con una porosidad de $10\% \pm 1\%$ y un tamaño de grano de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ tiene una dureza de $\text{HV } 1450 \pm 30$ y la K_{1c} permanece en $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mostrando excelentes propiedades integrales. El análisis SEM confirmó además que las muestras con gradiente de Co de $10\% \pm 1\%$ y temperatura de sinterización de $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ tuvieron una tasa de segregación significativamente mejor ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y uniformidad de poros ($> 95\% \pm 2\%$) que aquellas en otras condiciones.

El rendimiento de las microestructuras biónicas, gradientes y estructuras porosas de carburo cementado está regulado por factores como la porosidad ($10\% \pm 1\%$), el gradiente de Co ($5\%-15\% \pm 1\%$), el tamaño de poro ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), la temperatura de sinterización ($1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) y el tamaño de grano ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). La porosidad y el tamaño de grano dominan K_{1c} y la dureza, el gradiente de Co optimiza la dispersión de tensiones, la temperatura de sinterización garantiza la estabilidad estructural y el tamaño de poro afecta la absorción de energía y la resistencia. Al optimizar estos parámetros, se puede lograr un control preciso del rendimiento para satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta gama como herramientas y moldes.

9.4.1.4 Optimización de la microestructura biónica, gradiente y estructura porosa del carburo cementado

$K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ en microestructuras biónicas de carburo cementado $\pm 0,5$, considerando la tasa de absorción de energía ($> 50\% \pm 5\%$), la resistencia a la fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces) y la estabilidad en entornos complejos. Esto se logra mediante estrategias integrales como el diseño estructural, la optimización de los agentes formadores de poros, el ajuste del proceso de sinterización y el control de grano. Estas medidas de optimización buscan potenciar la sinergia entre la estructura de gradiente y la estructura porosa, y aprovechar al máximo los principios biónicos de la naturaleza (como el gradiente de dureza de las conchas y la tenacidad porosa del bambú) para satisfacer las necesidades de la fabricación inteligente, la biomedicina, la aviación y otras aplicaciones de alta demanda, manteniendo al mismo tiempo la adaptabilidad y la durabilidad del material. A continuación se describe el esquema de optimización en detalle desde los aspectos de parámetros estructurales, proceso de preparación, microcontrol y adaptabilidad ambiental, combina datos experimentales y efectos de aplicación reales, verifica completamente su viabilidad y explora el espacio para futuras mejoras.

(1) Estructura

La optimización estructural se basa en una porosidad del $10\% \pm 1\%$ y un gradiente de contenido

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de Co del 5 %-15 % \pm 1 %. Una porosidad del 10 % \pm 1 % reduce la densidad del material a \sim 12 g/cm³ gracias a la estructura microporosa \pm 0,1 g/cm³, en comparación con los 14,5 g/cm³ del WC-Co homogéneo \pm 0,1 g/cm³. Esto reduce significativamente el peso y aumenta la absorción de energía a $>$ 50 % \pm 5 %, gracias a la dispersión eficaz de la energía de impacto por la estructura porosa. El análisis SEM muestra que los poros están distribuidos uniformemente (desviación $<$ 0,5% \pm 0,1%), evitando la caída de dureza (aproximadamente 20% \pm 3%) y el aumento de microfisuras ($>$ 10⁴ m⁻²) causado por el debilitamiento del límite de grano cuando la porosidad es $>$ 20% \pm 1%. El gradiente de contenido de Co aumenta del 5% (área de alta dureza interna) al 15% (área de alta tenacidad superficial), formando un gradiente de dureza HV 1400-1800 \pm 30, y K_{1c} aumenta aproximadamente un 30% \pm 5% ($>$ 15 MPa·m^{1/2} \pm 0,5), tasa de dispersión de tensión $>$ 50% \pm 5% y resistencia a la fatiga significativamente mejorada mediante estratificación para amortiguar la concentración de tensión, con una vida útil por fatiga que alcanza $>$ 10⁶ veces \pm 10⁵ veces. Este diseño de gradiente es especialmente adecuado para entornos de carga dinámica, como la deformación frecuente de moldes inteligentes o la vibración de alta frecuencia de componentes de aviación. En comparación con las estructuras uniformes (K_{1c} de aproximadamente 12 MPa·m^{1/2} \pm 0,5), la tenacidad mejora significativamente.

(2) Agente formador de poros

El PMMA se utiliza como formador de poros, y el tamaño de partícula se controla con precisión a 110 μ m \pm 0,1 μ m. La cantidad de adición se establece en 5% \pm 0,1%, con el objetivo de formar una estructura porosa uniforme a través de la descomposición térmica. El PMMA se descompone a 1400 $^{\circ}$ C \pm 10 $^{\circ}$ C durante el proceso de sinterización para generar una red porosa con un tamaño de poro de 110 μ m \pm 0,1 μ m. El SEM verifica que la desviación de la porosidad es $<$ 0,5% \pm 0,1%, y la resistencia de la pared del poro es $>$ 100 MPa \pm 10 MPa, gracias al fino soporte de granos de WC (0,51 μ m \pm 0,01 μ m). La cantidad de adición del 5% \pm 0,1% garantiza un equilibrio entre la porosidad y la dureza. Una cantidad inferior al 5 % puede resultar en una absorción de energía insuficiente ($<$ 40 % \pm 5 %), lo que limita el rendimiento del material en un entorno de impacto, mientras que una cantidad superior al 10 % \pm 0,1 % puede resultar en una disminución de la dureza ($>$ 10 % \pm 2 %) y un debilitamiento de la estabilidad estructural debido a una porosidad excesiva. La optimización puede refinar la estructura porosa mediante la introducción de PMMA de tamaño nanométrico (tamaño de partícula $<$ 50 μ m \pm 0,1 μ m), lo que mejora aún más la tenacidad y la biocompatibilidad (como el crecimiento óseo), especialmente con potencial en aplicaciones de implantes.

(3) Proceso de sinterización

El proceso de sinterización utiliza prensado en caliente a 1400 $^{\circ}$ C \pm 10 $^{\circ}$ C y una presión de 50 MPa \pm 1 MPa para garantizar la densidad del material y la uniformidad de la porosidad. 1400 $^{\circ}$ C es inferior a la temperatura de descomposición del MoS₂ ($>$ 1200 $^{\circ}$ C \pm 10 $^{\circ}$ C) y previene eficazmente la oxidación bajo atmósfera protectora de Ar. La observación mediante SEM muestra que los granos de WC se mantienen refinados y que la desviación de la porosidad del 10 % \pm 1 % se controla a $<$ 0,5 % \pm 0,1 %. La presión de 50 MPa promueve la uniformidad de la distribución del gradiente de Co (desviación $<$ 0,1 % \pm 0,02 %) y la mejora de la resistencia de la pared del poro ($>$ 100 MPa \pm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 MPa), evitando el crecimiento del grano ($> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) o la reducción de la dureza ($> 10 \% \pm 2 \%$) causada por la sinterización a alta temperatura ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). Se utilizó una estrategia de calentamiento paso a paso (precalentamiento a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ y luego calentamiento a $1400 \text{ }^\circ\text{C}$) para reducir aún más la tensión térmica ($< 50 \text{ MPa}$) y aumentar $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mientras se mantiene la vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces. En el futuro, la densidad de la pared del poro y la suavidad de la transición del gradiente se pueden mejorar ampliando el tiempo de retención ($2 \text{ horas} \pm 0,1 \text{ horas}$) o introduciendo sinterización asistida por corriente pulsada.

(4) Control de granos

El tamaño de grano se controló a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ añadiendo inhibidores de trazas (como VC, 0,5%-1%) y optimizando el tiempo de molienda de bolas ($40 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$). Los granos finos mejoraron la resistencia de la pared del poro ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), el análisis SEM mostró que la densidad del límite de grano fue $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ y el tamaño de microfisura se redujo significativamente ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), lo que soporta $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y la vida útil por fatiga $> 10^6 \pm 10^5$ veces. En comparación con un tamaño de grano $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (la dureza disminuye $> 10 \% \pm 2 \%$ y la tenacidad disminuye), los granos de $0,51 \mu\text{m}$ optimizan el efecto sinérgico del gradiente y la estructura porosa, especialmente en entornos con alta tasa de deformación (como componentes de aviación). En el futuro, se podrá explorar la tecnología de nanogranos ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para mejorar aún más la resistencia al desgaste y a la fatiga mediante una mayor densidad de borde de grano ($> 10^{15} \text{ m}^{-2}$) para adaptarse a condiciones de trabajo extremas.

(5) Efecto de optimización integral y verificación de la aplicación.

A través de la estrategia anterior, el gradiente WC-Co (porosidad $10\% \pm 1\%$, Co $5\%-15\% \pm 1\%$) sinterizado a $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ con prensado en caliente, PMMA $5\% \pm 0,1\%$ y granos de $0,51 \mu\text{m}$, alcanzó una dureza de $\text{HV } 1450 \pm 30$ y $K_{1c} 16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, tasa de absorción de energía $> 50\% \pm 5\%$, vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces. En la fabricación inteligente, la precisión es $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, cumpliendo con los requisitos de ajuste dinámico de los moldes inteligentes; en biomedicina, la estructura porosa admite el crecimiento del tejido óseo, compatibilidad $> 95\% \pm 2\%$, vida útil $> 10^4$ horas; En el sector aeronáutico, la resistencia a la fatiga de los álabes de turbinas supera las 6000 horas. En comparación con el acero WC-Co uniforme ($K_{1c} 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, resistencia a la fatiga 5×10^5 veces), tras la optimización, la tenacidad mejora aproximadamente un 33% y la vida útil se extiende aproximadamente un 100% , lo que presenta ventajas significativas.

(6) Control ambiental y desarrollo futuro

El proceso de sinterización utiliza una atmósfera protectora de Ar para evitar la oxidación, y la humedad ambiente se controla al $30\%-50\%$ para evitar la degradación del rendimiento (aumento del coeficiente de fricción $< 5\% \pm 1\%$). En el futuro, se puede introducir la tecnología de impresión 3D para lograr estructuras de gradiente más complejas, se puede utilizar nano-PMMA para refinar el tamaño de poro a $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y se puede añadir TiC ($< 2\%$) o Cr_3C_2 ($< 1\%$) para reforzar la pared del poro para adaptarse a entornos de alta temperatura ($> 800 \text{ }^\circ\text{C}$) o alta carga ($> 200 \text{ N}$), como equipos de energía e ingeniería marina. Combinado con pruebas de fatiga dinámica ($> 10^7$ veces $\pm 10^6$ veces) o evaluación de servicio a largo plazo ($> 10^5$ horas), se puede verificar aún más su

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

confiabilidad en condiciones extremas.

(7) Desafíos y posibles mejoras

Durante el proceso de optimización, se debe prestar atención a la caída de dureza ($20\% \pm 3\%$) causada por una porosidad $> 20\% \pm 1\%$, que puede compensarse con agentes de refuerzo traza (como TiC); la adición excesiva de PMMA ($> 10\% \pm 0,1\%$) puede causar fragilización de la pared de los poros y requiere un control preciso; en la producción a gran escala, el costo de preparación del gradiente ($> 20\%$) debe reducirse mediante la simplificación o automatización del proceso. En el futuro, se pueden desarrollar recubrimientos porosos autorreparadores (como Al_2O_3 , espesor $2 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia a la corrosión y ampliar el ámbito de aplicación.

La microestructura biónica de carburo cementado está optimizada con una porosidad del $10\% \pm 1\%$, un gradiente de Co del 5% al 15% , PMMA del 5% , sinterización a 1400°C y granos de $0,51 \mu\text{m}$ para alcanzar una dureza $> \text{HV } 1400$ y una $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Tomando como ejemplo el gradiente de WC-Co, el rendimiento es superior al del WC-Co uniforme. En el futuro, la nanotecnología y las mejoras en los recubrimientos pueden ampliar aún más su potencial de aplicación en entornos complejos.

9.4.1.5 Aplicaciones de ingeniería de microestructuras biónicas de carburo cementado, estructuras de gradiente y porosas

La microestructura biónica de carburo cementado mejora significativamente sus propiedades mecánicas y funcionalidad gracias a la combinación de diseño de gradiente y estructura porosa, lo que muestra un excelente potencial de aplicación en entornos de ingeniería complejos. Estas estructuras se inspiran en la naturaleza (como el gradiente de dureza de las conchas y la tenacidad porosa del bambú) y satisfacen las necesidades de entornos de alta demanda, como la reducción de peso en la aviación, los implantes biomédicos y la fabricación inteligente, optimizando la dureza, la tenacidad y la tasa de absorción de energía. La estructura de gradiente mejora la resistencia a la fatiga, mientras que la estructura porosa mejora la biocompatibilidad y la adaptabilidad, lo que, en conjunto, promueve el desarrollo de la multifuncionalidad del carburo cementado. A continuación, se detalla su valor en aplicaciones de ingeniería, basándose en escenarios de aplicación específicos, ventajas de rendimiento y casos reales, y se analiza su contribución a la eficiencia industrial, la biocompatibilidad y la durabilidad.

(1) Piezas de reducción de peso de aviación de carburo cementado

En piezas de aviación para la reducción de peso, el WC-Co en gradiente (porosidad $10\% \pm 1\%$) destaca por sus excelentes propiedades mecánicas y ligereza. Su densidad se redujo a $12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, en comparación con los $14,5 \text{ g/cm}^3$ del WC-Co homogéneo $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, lo que reduce el peso del componente en aproximadamente un 17% gracias a la introducción de una estructura porosa (tamaño de poro: $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). El análisis SEM muestra una porosidad del $10\% \pm 1\%$ y una distribución uniforme (desviación $< 0,5\% \pm 0,1\%$), una dureza de $1450 \pm 30 \text{ HV}$ y una resistencia a la fatiga superior en $10^6 \pm 10^5$ veces, superior a la del WC10Co tradicional

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(aproximadamente 5×10^5 veces). Este rendimiento es especialmente importante en álabes de turbinas de aviación o piezas estructurales de fuselajes. El gradiente de contenido de Co (5%-15% \pm 1%) genera un gradiente de dureza de HV 1400-1800 \pm 30, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y una tasa de dispersión de tensiones $> 50\% \pm 5\%$, lo que ralentiza eficazmente la propagación de grietas causada por vibraciones de alta frecuencia y tensiones térmicas ($< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). Además, el diseño de bajo peso reduce el consumo de combustible, lo que satisface las necesidades de desarrollo sostenible de la industria aeronáutica.

(2) Implantes biomédicos de carburo cementado

En aplicaciones de implantes biomédicos, el WC-Co poroso (tamaño de poro de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) exhibe una excelente biocompatibilidad y capacidad de servicio a largo plazo. El tamaño de poro de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ promueve el crecimiento del tejido óseo y la circulación sanguínea. La observación SEM muestra que la pared del poro es uniforme (desviación $< 0,5\% \pm 0,1\%$) y la compatibilidad alcanza $> 95\% \pm 2\%$, superando ampliamente los implantes tradicionales de aleación de titanio (aproximadamente $90\% \pm 2\%$). La estructura porosa reduce la densidad a $\sim 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, la tasa de absorción de energía $> 50\% \pm 5\%$, adaptándose a los cambios dinámicos de las cargas biológicas, vida útil de más de 10 años ± 1 año, adecuado para articulaciones de cadera o implantes dentales. Los granos de WC de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ garantizan la resistencia de la pared de los poros ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), previenen la fatiga estructural en el uso a largo plazo y la capa de pasivación (espesor $\sim 10 \text{ nm}$) de la fase Ni ($< 10\% \pm 0,1\%$) mejora aún más la resistencia a la corrosión (pérdida de peso $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$), cumpliendo los requisitos del entorno estéril.

(3) Molde inteligente de carburo cementado

En aplicaciones de moldes inteligentes, el gradiente de WC-Co (contenido de Co del 5% al 15% $\pm 1\%$) destaca por su alta tenacidad y respuesta dinámica. Con un gradiente de dureza HV de 1400 a 1800 ± 30 , K_{1c} alcanza $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que aumenta aproximadamente un 33% en comparación con el WC-Co uniforme (K_{1c} de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). La tasa de dispersión de tensiones es $> 50\% \pm 5\%$ y la vida útil a la fatiga supera $10^6 \pm 10^5$ veces, lo que resulta adecuado para el moldeo frecuente de formas geométricas complejas en la fabricación inteligente. El análisis SEM muestra que la distribución del gradiente de Co es continua (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la porosidad es del 10% $\pm 1\%$ y la tasa de absorción de energía es $> 50\% \pm 5\%$, lo que favorece la deformación adaptativa del molde bajo cargas dinámicas de alta frecuencia. La precisión es $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que resulta adecuado para el mecanizado de precisión de piezas de automoción o componentes electrónicos. En comparación con los moldes tradicionales, el diseño de gradiente reduce las microfisuras causadas por la tensión térmica ($< 50 \text{ MPa}$) y prolonga la vida útil.

(4) Recubrimiento de turbinas de aviación

La estructura porosa de gradiente WC5MoS₂ ofrece un excelente rendimiento en recubrimientos para turbinas de aviación. Con una porosidad del 10% $\pm 1\%$ y lubricante de MoS₂ (5% $\pm 0,1\%$), el coeficiente de fricción se reduce a $0,12 \pm 0,01$, la vida útil a la fatiga es $> 10^6 \pm 10^5$ veces y la vida útil supera las 6000 horas. El tamaño de poro de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ mejora la penetración del lubricante, reduce el flujo de aire a alta velocidad y la erosión de partículas, es adecuado para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entornos de alta temperatura ($> 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) y mejora la resistencia a la fatiga y al desgaste del recubrimiento.

(5) Herramientas de perforación petrolera

El WC8MoS₂C poroso (porosidad $15\% \pm 1\%$) ofrece un buen rendimiento en la perforación petrolera, con un tamaño de poro de $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ para capturar los recortes de perforación ($<1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$). La penetración del lubricante reduce la adhesión a $<0,8\text{ N} \pm 0,1\text{ N}$ y la vida útil aumenta aproximadamente un 25% en comparación con las brocas tradicionales. Su tasa de absorción de energía $>50\% \pm 5\%$ se adapta al impacto de rocas de alta dureza y reduce la frecuencia de reemplazo.

(6) Dispositivos médicos

El WC-NiTi poroso (tamaño de poro de $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) tiene amplias perspectivas de aplicación en dispositivos médicos y el gradiente Co 5%-15% $\pm 1\%$ proporciona $K_{1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, tasa de deformación de NiTi $< 0,1\% \pm 0,01\%$ en respuesta a la carga dinámica, vida útil > 5000 veces, adecuado para bisturís ortopédicos, mejora la precisión de corte y la durabilidad.

(7) Beneficios integrales y aplicaciones ampliadas

Las microestructuras biónicas mejoran significativamente la versatilidad del carburo cementado, reducen el peso y prolongan la vida útil de las piezas aeronáuticas, mejoran la compatibilidad y la vida útil de los implantes biomédicos, optimizan la precisión de procesamiento y la durabilidad de los moldes inteligentes, optimizan la eficiencia de los recubrimientos para aviación y las herramientas de perforación petrolera, y mejoran la seguridad de los dispositivos médicos. En comparación con el WC-Co uniforme, la resistencia a la fatiga de la estructura porosa en gradiente aumenta aproximadamente un 100 % y la compatibilidad mejora en más del $5\% \pm 2\%$. Las futuras aplicaciones pueden extenderse a capas resistentes al desgaste en ferrocarriles (el WC-NiTi poroso reduce el desgaste superficial de los rieles); sensores inteligentes; las estructuras en gradiente facilitan la monitorización de la deformación; y equipos marinos; el diseño poroso mejora la resistencia a la corrosión (pérdida de peso $< 0,05\text{ mg/cm}^2$).

Las microestructuras biónicas de carburo cementado ofrecen un excelente rendimiento en componentes de reducción de peso para aviación (resistencia a la fatiga $> 10^6$ veces), implantes biomédicos (compatibilidad $> 95\%$, vida útil > 10 años) y moldes inteligentes ($K_{1c} 16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, vida útil $> 10^6$ veces), lo que confirma la mejora de la multifuncionalidad de las estructuras porosas y de gradiente. En el futuro, la innovación en materiales podrá satisfacer una gama más amplia de necesidades.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

9.4.2 Perspectivas del carburo cementado de respuesta inteligente

9.4.2.1 Descripción general del principio de carburo de respuesta inteligente

El carburo cementado de respuesta inteligente logra la adaptabilidad del material mediante la introducción de la aleación de deformación NiTi y nanosensores, lo que mejora significativamente su rendimiento en entornos dinámicos. Este diseño logra una tasa de ajuste de tensión $> 50\% \pm 5\%$ gracias al efecto de memoria de forma y la superelasticidad del NiTi (tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$) y la monitorización en tiempo real de los nanosensores (tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), con el objetivo de una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y una precisión de respuesta $> 95\% \pm 2\%$. La temperatura de transición de fase del NiTi es de aproximadamente $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que confiere al material la capacidad de responder al calor o a la mecánica. El nanosensor proporciona retroalimentación precisa mediante la monitorización de la deformación (precisión $\pm 0,001\%$) para optimizar el comportamiento del material en condiciones de trabajo complejas. En comparación con el carburo cementado tradicional, el diseño de respuesta inteligente rompe las limitaciones del rendimiento estático y es adecuado para escenarios como la fuerza de corte adaptativa de herramientas inteligentes ($< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$) y la respuesta de alta velocidad de componentes robóticos ($< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$).

El proceso de preparación incluye dopaje de NiTi ($1\%-5\% \pm 0,1\%$) para mejorar la adaptabilidad, sinterización a $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ para garantizar la estabilidad del material e integración de nanosensores (tamaño $110 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) para lograr monitoreo en tiempo real. Por ejemplo, la dureza de la muestra WC3NiTi alcanzó $\text{HV } 1450 \pm 30$, la tasa de deformación fue de $0,05\% \pm 0,01\%$ y el tiempo de respuesta fue de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, verificando la viabilidad de la respuesta inteligente. Esta sección explorará los principios del carburo cementado de respuesta inteligente y su potencial en la industria moderna desde los aspectos del análisis de mecanismos, perspectivas de aplicación y ejemplos de ingeniería.

9.4.2.2 Análisis del mecanismo de carburo cementado de respuesta inteligente

El carburo cementado de respuesta inteligente logra un rendimiento adaptativo de los materiales mediante el efecto sinérgico de la aleación de deformación NiTi y la matriz de WC, combinado con la monitorización en tiempo real de nanosensores. Esta sección analiza en profundidad el mecanismo de transformación de la fase martensítica del NiTi, el papel de soporte de la matriz de WC, la función de detección de deformación de los nanosensores y la influencia mutua de diversos componentes. Combinando la observación microscópica con datos experimentales, se revela su mecanismo de optimización para la regulación de la tensión, la dureza y la tenacidad, y se proporciona una base teórica para aplicaciones como herramientas inteligentes y componentes robóticos.

(1) Mecanismo de transformación martensítica de NiTi

La capacidad de respuesta inteligente de NiTi es impulsada principalmente por su transformación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de fase martensítica, con la temperatura de transformación de fase (A_f) siendo de aproximadamente $100\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$, la tasa de deformación siendo controlada a $< 0,1\% \pm 0,01\%$, y la tasa de ajuste de tensión siendo $> 50\% \pm 5\%$ siendo lograda a través de la transformación reversible de austenita y martensita. Durante la transformación de fase, NiTi absorbe y libera energía de deformación, y el análisis SEM muestra que las partículas de NiTi (tamaño $1,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) están incrustadas uniformemente en la matriz WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), con una fuerza de enlace de $> 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, asegurando la estabilidad de la transferencia de deformación. El contenido de NiTi de $3\% \pm 0,1\%$ proporciona el mejor equilibrio entre capacidad de respuesta y dureza. Cuando el contenido supera el $5\% \pm 0,1\%$, la tenacidad a la fractura (K_{1c}) disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$. Esto se debe a que un exceso de NiTi provoca un debilitamiento de los límites de grano y una mayor densidad de microfisuras ($> 10^3\text{ m}^{-2}$).

(2) Función de apoyo de la matriz WC

La matriz de WC actúa como esqueleto del carburo cementado, proporcionando una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y estabilidad estructural, mientras que el tamaño de grano de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ garantiza una alta resistencia mecánica y al desgaste (índice de desgaste $< 0,05\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$). La inclusión de partículas de NiTi aumenta la tenacidad del WC ($K_{1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y la vida útil a la fatiga $> 10^6 \pm 10^5$ veces. Las observaciones SEM muestran que los límites de fase de NiTi y WC están cerca (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y las pruebas EDS confirman que la relación Ni:Ti es de aproximadamente $1:1 \pm 0,1$, lo que verifica la homogeneidad química de NiTi y respalda la respuesta dinámica de la regulación del estrés.

(3) Monitoreo de deformaciones mediante nanosensores

El nanosensor monitoriza la deformación en tiempo real a través de cambios de resistencia ($> 1\% \pm 0,1\%$) con una precisión de $\pm 0,001\%$. El tamaño es de $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ y está integrado en la superficie o en el interior del material. El sensor se basa en el efecto piezoresistivo, con un tiempo de respuesta de $< 1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$ y una prueba de respuesta de $1\text{ Hz} \pm 0,01\text{ Hz}$ que muestra una tasa de deformación estable (desviación $< 0,01\% \pm 0,001\%$), lo que garantiza la precisión de la regulación adaptativa. El análisis SEM muestra que el sensor está bien adherido al sustrato (área de contacto $> 95\% \pm 2\%$), y XPS verifica la estabilidad de la superficie NiTi (pico Ni 2p $\sim 854\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), evitando la interferencia de oxidación (pico O 1s $< 0,5\%$).

(4) Control de temperatura y rendimiento de sinterización

La temperatura de sinterización de $1400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ es inferior a la temperatura de descomposición del NiTi ($> 1500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$). Bajo atmósfera protectora de Ar, se previene eficazmente la degradación térmica del NiTi. La observación mediante SEM muestra que los granos de WC permanecen en $0,51 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ y que las partículas de NiTi se distribuyen uniformemente (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$). $1400\text{ }^\circ\text{C}$ asegura una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y $K_{1c} > 15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, evitando el crecimiento de grano ($> 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) o la distorsión de transformación de fase de NiTi ($> 5\% \pm 1\%$) en comparación con la sinterización a alta temperatura ($> 1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), manteniendo una precisión de respuesta de $> 95\% \pm 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Dirección de verificación y optimización de aplicaciones

El WC3NiTi ofrece un buen rendimiento en herramientas inteligentes, con una dureza HV de 1450 ± 30 , una fuerza de corte $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, una tasa de deformación del $0,05 \% \pm 0,01 \%$, un tiempo de respuesta de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ y una vida útil de $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$. En piezas de robot, el tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ es adecuado para movimientos a alta velocidad, y su vida útil es de $> 10^4$ veces $\pm 10^3$ veces. La optimización se puede lograr ajustando el contenido de NiTi al 2%-4% $\pm 0,1\%$ para aumentar K_{1c} , reduciendo el nanosensor a $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ para mejorar la precisión ($\pm 0,0005\%$) e integrando redes de sensores más complejas en combinación con la impresión 3D para adaptarse a altas temperaturas ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) o cargas elevadas ($> 200 \text{ N}$).

Carburo cementado de respuesta inteligente mediante transformación martensítica de NiTi ($A_f \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$) con deformación $< 0,1 \%$, dureza de la matriz WC $> \text{HV } 1400$ y precisión del nanosensor $\pm 0,001 \%$ para lograr una regulación de la tensión $> 50 \%$. Tomando como ejemplo el WC3NiTi, con dureza HV 1450 y tiempo de respuesta de 0,8 ms, una optimización futura puede mejorar aún más su rendimiento en entornos extremos.

9.4.2.3 Análisis de factores que afectan la respuesta inteligente del carburo cementado

El rendimiento del carburo cementado de respuesta inteligente se ve afectado por una combinación de factores clave que determinan su adaptabilidad, dureza y tenacidad en aplicaciones como herramientas inteligentes y componentes robóticos, mediante el ajuste del contenido de NiTi, el tamaño del sensor, la temperatura de sinterización, el tamaño del grano y las condiciones ambientales. Una optimización adecuada de estos parámetros puede garantizar una tasa de ajuste de tensión $> 50 \% \pm 5 \%$, una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y una precisión de respuesta $> 95 \% \pm 2 \%$. A continuación, se presenta un análisis detallado del impacto de cada factor influyente en el rendimiento de la respuesta inteligente, basado en su mecanismo, datos experimentales y casos de aplicación, y se presentan sugerencias de mejora.

(1) Contenido de NiTi

El contenido de NiTi tiene un doble efecto en la tasa de deformación y la dureza. El contenido recomendado es del $3 \% \pm 0,1 \%$. En este caso, la tasa de deformación es $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, la tasa de ajuste de tensión es $> 50 \% \pm 5 \%$, la dureza se mantiene en $\text{HV } 1450 \pm 30$ y $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Tomando WC3NiTi como ejemplo, el análisis SEM muestra que las partículas de NiTi ($1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) están distribuidas uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y la resistencia de unión es $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, lo que optimiza el rendimiento adaptativo. Sin embargo, cuando el contenido de NiTi supera el $5 \% \pm 0,1 \%$, la dureza disminuye aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$ (por ejemplo, la dureza de WC5NiTi es de tan solo $\text{HV } 1300 \pm 30$). Esto se debe a que un exceso de NiTi provoca debilitamiento del límite de grano, aumento de la densidad de microfisuras ($> 10^3 \text{ m}^{-2}$) y reducción de K_{1c} ($> 10 \% \pm 2 \%$). La sugerencia de optimización consiste en controlar el contenido de NiTi entre el 2 % y el $4 \% \pm 0,1 \%$ y mejorar la tenacidad regulando la temperatura de transformación de fase ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) mediante tratamiento térmico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Tamaño del sensor

El tamaño del sensor afecta directamente el tiempo de respuesta y la precisión. El tamaño recomendado es de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, con una precisión de $\pm 0,001 \%$, un tiempo de respuesta de $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ y una variación de resistencia de $> 1 \% \pm 0,1 \%$, lo que cumple con los requisitos de monitorización en tiempo real. Las observaciones mediante SEM muestran que el sensor de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ está bien adherido al sustrato de WC (área de contacto $> 95 \% \pm 2 \%$), y la prueba de respuesta a una frecuencia de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ muestra que la desviación de la tasa de deformación es $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$. Cuando el tamaño del sensor supera los $20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, el tiempo de respuesta aumenta aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$ ($> 1,1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$), porque un tamaño mayor limita la eficiencia de transmisión de la señal y la precisión cae a $\pm 0,002 \%$. La optimización se puede lograr reduciendo el sensor a $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, mejorando la velocidad de respuesta ($< 0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$) y la precisión ($\pm 0,0005 \%$) para adaptarse a aplicaciones de alta frecuencia.

(3) Temperatura de sinterización

La temperatura de sinterización es crucial para la estabilidad y las propiedades del material NiTi. Se recomienda una temperatura de $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ para garantizar que el NiTi no se descomponga (temperatura de descomposición $> 1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$. Bajo atmósfera protectora de Ar, el análisis SEM muestra que los granos de WC permanecen de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el NiTi se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y la XPS verifica la estabilidad de la superficie (pico de Ni 2p $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, contenido de oxígeno $< 0,5 \%$). Cuando la temperatura supera los $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la descomposición del NiTi aumenta aproximadamente un $5 \% \pm 1 \%$, lo que resulta en una tasa de deformación inestable ($> 0,15 \% \pm 0,01 \%$) y una disminución de la dureza ($> 5 \% \pm 1 \%$). Es necesario controlar la tensión térmica ($< 50 \text{ MPa}$) mediante calentamiento gradual (precalentamiento a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$). La sugerencia de optimización es mantener la temperatura a $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y prolongar el tiempo de mantenimiento ($2 \text{ horas} \pm 0,1 \text{ horas}$) para mejorar la densidad.

(4) Tamaño del grano

El tamaño de grano tiene un efecto significativo en la tenacidad y dureza. El tamaño de grano WC recomendado es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, que se puede lograr mediante la adición de inhibidores (como VC, 0,5%-1%) y molienda de bolas (40 horas \pm 1 hora). Los granos finos mejoran la resistencia de la pared de los poros ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), la densidad del límite de grano $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la vida a la fatiga $> 10^6 \pm 10^5$ veces. La observación SEM muestra que los límites de grano son densos y las microfisuras son $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Cuando el tamaño de grano supera los $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la K_{1c} disminuye aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$ y la dureza disminuye ($> 5 \% \pm 1 \%$) debido a la concentración de tensiones causada por la reducción de los límites de grano. La optimización puede utilizar nanogranos ($< 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia al desgaste ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$).

(5) Medio ambiente

La temperatura ambiente tiene un efecto significativo en la tasa de deformación. Cuando la temperatura supera los $100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, se activa la transición de fase de NiTi, la tasa de deformación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumenta aproximadamente un $20\% \pm 3\%$ ($> 0,12\% \pm 0,01\%$) y la tasa de ajuste de tensión aumenta a $> 60\% \pm 5\%$, pero la dureza puede disminuir ($< 5\% \pm 1\%$). Una humedad $> 50\% \pm 5\%$ causa oxidación de la superficie de NiTi (la posición del pico de O 1s aumenta un $0,1\% \pm 0,01\%$) y la precisión de respuesta disminuye ($< 90\% \pm 2\%$). A $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ y una humedad del $30\% - 50\%$, la tasa de deformación es estable ($< 0,1\% \pm 0,01\%$) y la precisión es $> 95\% \pm 2\%$. Se recomienda utilizar una capa de pasivación de NiO (espesor $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) o un recubrimiento de SiO_2 ($< 1\%$) para mejorar la resistencia a la humedad.

(6) Casos completos y direcciones de optimización

Tomemos como ejemplo WC₃NiTi: NiTi $3\% \pm 0,1\%$, sensor $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, sinterizado a 1400 °C , tamaño de grano $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, dureza HV 1450 ± 30 , K_{1c} $16\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, tiempo de respuesta $0,8\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$. En comparación con WC₅NiTi (dureza HV 1300 ± 30 , K_{1c} reducida un $10\% \pm 2\%$), el rendimiento mejora significativamente tras la optimización. En un entorno de 120 °C , la tasa de deformación aumenta al $0,12\% \pm 0,01\%$, pero puede restaurarse al $0,08\% \pm 0,01\%$ mediante el control de temperatura. Para futuras optimizaciones, se puede ajustar el NiTi al $2,5\% - 3,5\% \pm 0,1\%$, reducir el sensor a $50\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, ajustar la temperatura de sinterización a $1390\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ y refinar el grano a $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Es adecuado para altas temperaturas ($> 400\text{ °C}$) o altas frecuencias ($> 10\text{ Hz} \pm 0,1\text{ Hz}$).

El carburo cementado de respuesta inteligente se ve afectado por el contenido de NiTi (3%), el tamaño del sensor ($110\text{ }\mu\text{m}$), la temperatura de sinterización (1400 °C), el tamaño del grano ($0,51\text{ }\mu\text{m}$) y las condiciones ambientales ($< 100\text{ °C}$). La dureza del WC₃NiTi es HV 1450, superior a la del WC₅NiTi (HV 1300). En el futuro, su rendimiento en condiciones extremas podrá mejorarse mediante la optimización de parámetros.

9.4.2.4 Estrategia de optimización de carburo cementado de respuesta inteligente

Para lograr una dureza de carburo cementado de respuesta inteligente $> HV 1400 \pm 30$ y una tasa de deformación $< 0,1\% \pm 0,01\%$, garantizando al mismo tiempo una tasa de ajuste de tensión $> 50\% \pm 5\%$, una precisión de respuesta $> 95\% \pm 2\%$ y una vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces, se requiere una estrategia integral de optimización de la composición, mejora del proceso de sinterización, integración de sensores, tratamiento de superficies y especificaciones de prueba. Estas medidas de optimización aprovechan al máximo el efecto de memoria de forma del NiTi y la capacidad de monitorización en tiempo real de los nanosensores para cumplir con los altos requisitos de rendimiento dinámico de herramientas inteligentes, componentes robóticos, etc. A continuación, se detalla el esquema de optimización desde los aspectos de composición del material, proceso de preparación, tecnología de integración, tratamiento de superficies y estándares de prueba, se verifica su efecto con datos experimentales y se explora el espacio para futuras mejoras.

(1) Optimización de ingredientes

La optimización de la composición se centra en un contenido de NiTi del $3\% \pm 0,1\%$ y un tamaño de grano de WC de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Un contenido de NiTi del $3\% \pm 0,1\%$ proporciona la mejor

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tasa de deformación $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, una tasa de acomodación de tensión $> 50 \% \pm 5 \%$ y una temperatura de transformación martensítica ($\sim 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) que garantiza la estabilidad de la respuesta térmica/mecánica. El análisis SEM muestra una distribución uniforme de partículas de NiTi ($1,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y una resistencia de unión $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$. Granos de WC de $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ obtenidos añadiendo inhibidores (p. ej., VC, $0,5 \%-1 \%$) y molienda con bolas ($40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$), dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, densidad del límite de grano $> 10^{14} \text{ m}^{-2}$ Microfisuras reducidas ($< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$). $3 \% \pm 0,1 \%$ Capacidad de respuesta y resistencia equilibradas en comparación con NiTi $> 5 \% \pm 0,1 \%$ (reducción del $10 \% \pm 2 \%$ de la dureza).

(2) Proceso de sinterización

El proceso de sinterización utiliza prensado en caliente a $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ y una presión de $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ para garantizar el rendimiento del material y la estabilidad del NiTi. $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ es menor que la temperatura de descomposición de NiTi ($> 1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), la atmósfera protectora de Ar evita la oxidación, la observación SEM muestra que los granos de WC permanecen $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, NiTi se distribuye uniformemente (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$. La presión de 50 MPa promueve la unión de NiTi y WC (resistencia de unión $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), evitando el crecimiento de grano ($> 2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) o la reducción de dureza ($> 5 \% \pm 1 \%$) causada por alta temperatura ($> 1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). El calentamiento escalonado (precalentamiento a $1200 \text{ }^\circ\text{C}$) reduce el estrés térmico ($< 50 \text{ MPa}$) y mejora K_{1c} y la vida útil por fatiga ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces).

(3) Integración de sensores

El tamaño de integración del sensor es de $110 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, precisión $\pm 0,001\%$, cambio de resistencia $> 1\% \pm 0,1\%$ y tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. El análisis SEM muestra que el sensor está bien integrado con el sustrato (área de contacto $> 95\% \pm 2\%$), y la prueba de deformación a una frecuencia de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ verifica que la desviación de la tasa de deformación es $< 0,01\% \pm 0,001\%$. El tamaño de $110 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ equilibra la precisión y la dificultad de integración, y optimiza las capacidades de monitoreo en tiempo real en comparación con $> 20 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ (tiempo de respuesta aumentado en un $10\% \pm 2\%$). En el futuro, se puede reducir a $50 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, mejorando la precisión a $\pm 0,0005\%$ y la velocidad de respuesta ($< 0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$).

(4) Tratamiento de superficies

El tratamiento de la superficie se realiza puliendo hasta $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$ y eliminando defectos mediante pulido con diamante o pulido químico-mecánico (CMP). La superficie plana mejora la uniformidad de la deformación del NiTi (desviación $< 0,01 \% \pm 0,001 \%$), reduce las concentraciones de tensión, la dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$, la precisión de respuesta $> 95 \% \pm 2 \%$. El SEM verifica la rugosidad uniforme de la superficie (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), la limpieza ultrasónica elimina los residuos y previene la oxidación causada por la humedad ($> 50 \% \pm 5 \%$) (aumento de O $1\text{s} < 0,1 \% \pm 0,01 \%$). Después del pulido, se puede combinar una capa de pasivación de NiO (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) para mejorar la resistencia a la corrosión (pérdida de peso $< 0,06 \text{ mg/cm}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Especificaciones de prueba

La especificación de la prueba utiliza pruebas de deformación con una frecuencia de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ para simular cargas dinámicas de baja frecuencia y medir la tasa de deformación y el tiempo de respuesta. El entorno se controla a $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$, la humedad es del 30 % al 50 % y el valor promedio se obtiene después de 3 repeticiones. El tiempo de respuesta objetivo es $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$. Tomando WC3NiTi como ejemplo, tras la sinterización a $1400 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$, la tasa de deformación es del 0,05 % $\pm 0,01 \text{ %}$, el tiempo de respuesta es de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, la dureza es $\text{HV } 1450 \pm 30$ y la K_{1c} es de $16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo cual es mejor que las muestras con NiTi $> 5 \text{ %} \pm 0,1 \text{ %}$ (dureza $\text{HV } 1300 \pm 30$). Combinando SEM y EDS para analizar la distribución de NiTi y el rendimiento del sensor, se puede ampliar a pruebas de alta frecuencia ($> 10 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$) o entornos de alta temperatura ($> 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$) en el futuro.

(6) Efecto de optimización integral y verificación de la aplicación

WC3NiTi sinterizado a $1400 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, sensor de $110 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, dureza $\text{HV } 1450 \pm 30$, deformación $0,05 \text{ %} \pm 0,01 \text{ %}$, tiempo de respuesta $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, $K_{1c} 16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces. En herramientas inteligentes, fuerza de corte $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, vida útil $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$; En piezas de robot, el tiempo de respuesta es $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ y la vida útil es $> 10^4 \pm 10^3$ veces mayor. En comparación con las muestras de NiTi al $5 \text{ %} \pm 0,1 \text{ %}$ (dureza reducida un $10 \text{ %} \pm 2 \text{ %}$), el rendimiento tras la optimización mejora significativamente.

(7) Control ambiental y desarrollo futuro

Durante la sinterización, se utiliza protección Ar para evitar la oxidación, y la temperatura se mantiene $< 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$ para controlar el aumento de la tasa de deformación ($< 20 \text{ %} \pm 3 \text{ %}$). En el futuro, se podrá introducir la impresión 3D para integrar redes de sensores complejas. El NiTi se ajusta al $2,5 \text{ %} - 3,5 \text{ %} \pm 0,1 \text{ %}$ para aumentar K_{1c} y el sensor se reduce a $50 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ para adaptarse a altas temperaturas ($> 400 \text{ °C}$) o cargas elevadas ($> 200 \text{ N}$), como en turbinas de aviación y equipos de energía.

Carburo de respuesta inteligente con NiTi $3 \text{ %} \pm 0,1 \text{ %}$, WC $0,51 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, sinterizado a 1400 °C , sensor de $110 \text{ } \mu\text{m}$ y $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m}$, dureza optimizada $> \text{HV } 1400$, tasa de deformación $< 0,1 \text{ %}$. Tasa de deformación WC3NiTi $0,05 \text{ %}$, tiempo de respuesta $0,8 \text{ ms}$, que se puede mejorar aún más en el futuro mediante nanotecnología.

9.4.2.5 Aplicación de ingeniería de carburo cementado de respuesta inteligente

El carburo cementado de respuesta inteligente combina el efecto de memoria de forma de la aleación de deformación NiTi (temperatura de transición de fase $\sim 100 \text{ °C} \pm 1 \text{ °C}$) con la monitorización de la deformación en tiempo real mediante nanosensores (precisión $\pm 0,001 \text{ %}$) para lograr una tasa de ajuste de tensión $> 50 \text{ %} \pm 5 \text{ %}$ y un tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, lo que mejora significativamente su adaptabilidad y versatilidad. Este diseño innovador supera las limitaciones del rendimiento estático del carburo cementado tradicional y satisface las necesidades de la tecnología

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de ingeniería moderna en cuanto a alta precisión, durabilidad y adaptabilidad ambiental mediante capacidades de respuesta dinámica. El desarrollo de materiales inteligentes como WC3NiTi no solo optimiza la dureza ($> HV 1400 \pm 30$), la tenacidad ($K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y la resistencia a la fatiga ($> 10^6 \pm 10^5$ veces), sino que también ha ampliado sus áreas de aplicación para incluir la fabricación inteligente, la robótica, la industria aeroespacial, los dispositivos médicos, los equipos energéticos, las infraestructuras de transporte y las tecnologías emergentes. A continuación, se detalla su valor en ingeniería desde la perspectiva de escenarios de aplicación específicos, ventajas de rendimiento, casos reales y posibles direcciones de expansión. Se analiza su contribución a la eficiencia industrial, la biocompatibilidad, la durabilidad y el desarrollo sostenible, y se anticipa su potencial de desarrollo futuro.

(1) Herramientas de carburo inteligentes

En la aplicación de herramientas de carburo inteligentes, el acero WC3NiTi (tamaño de grano: $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presenta un excelente rendimiento de corte adaptativo. El contenido de NiTi del $3\% \pm 0,1\%$ impulsa la tasa de deformación del $0,05\% \pm 0,01\%$ y ajusta la fuerza de corte a $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$ en tiempo real mediante la transformación de fase martensítica, lo que reduce significativamente el calor por fricción entre la herramienta y la pieza ($< 100 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$) y la tasa de desgaste ($< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$). El análisis SEM muestra que las partículas de NiTi ($1,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) están uniformemente incrustadas en la matriz de WC (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), con una fuerza de unión $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, lo que garantiza la estabilidad de la transferencia de deformación. Los granos de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ proporcionan una dureza $> HV 1400 \pm 30$, $K_{1c} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la vida útil de la herramienta supera los $5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$, superando ampliamente al WC10Co tradicional (aproximadamente 3000 m). Este rendimiento es particularmente prominente en el procesamiento de materiales de alta dureza (como aleaciones de titanio, acero inoxidable) o condiciones de alta velocidad ($> 500 \text{ m/min}$). El nanosensor ($110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) monitorea la tensión de corte en tiempo real (precisión $\pm 0,001\%$), ajusta dinámicamente el ángulo de la herramienta, optimiza el acabado de la superficie ($Ra < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y reduce el uso de refrigerante, lo que está en línea con la tendencia de la fabricación ecológica.

(2) Piezas de robot de carburo

En la aplicación de piezas de carburo para robots, el sensor WC3NiTi ($110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) ha atraído mucha atención debido a su respuesta de alta velocidad y precisión. El tamaño del sensor es de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y está integrado en la superficie del material. La precisión es $> 95\% \pm 2\%$, el cambio de resistencia es $> 1\% \pm 0,1\%$, el tiempo de respuesta es de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$ y la prueba de deformación a una frecuencia de $1 \text{ Hz} \pm 0,01 \text{ Hz}$ muestra que la desviación de la tasa de deformación es $< 0,01\% \pm 0,001\%$. La tasa de deformación de NiTi es del $0,05\% \pm 0,01\%$, lo que es adecuado para el movimiento dinámico de alta velocidad de articulaciones de robots, pinzas o manipuladores. La vida útil es $> 10^4$ veces $\pm 10^3$ veces. La observación mediante SEM muestra que el sensor está bien integrado con el sustrato (área de contacto $> 95\% \pm 2\%$). En comparación con las piezas tradicionales de acero o de WC-Co uniformes, el diseño de respuesta inteligente mejora significativamente la flexibilidad operativa y reduce los daños por tensión mecánica ($< 50 \text{ MPa}$), lo que lo hace ideal para líneas de producción de automatización industrial, robots médico-quirúrgicos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y robots de servicio doméstico. En el futuro, se podrá lograr la monitorización de la deformación multipunto mediante la optimización de la red de sensores ($< 50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar la coordinación de movimientos complejos.

(3) Sensor de aviación de aleación dura

En la aplicación de sensores de aviación de carburo cementado, el WC3NiTi muestra una excelente durabilidad y estabilidad. Su dureza alcanza $\text{HV } 1450 \pm 30$, los granos de WC de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ proporcionan alta resistencia, el NiTi $3 \% \pm 0,1 \%$ garantiza una tasa de deformación $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, una tasa de ajuste de tensión $> 50 \% \pm 5 \%$ y una vida útil a la fatiga superior a $10^6 \pm 10^5$ veces, superior a la del WC-Co uniforme (aproximadamente 5×10^5 veces). Los nanosensores ($110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) monitorizan la deformación (precisión $\pm 0,001\%$), con un tiempo de respuesta $< 1 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, se adaptan a entornos de alta temperatura ($> 400 \text{ }^\circ\text{C}$) y vibración de alta frecuencia, y su vida útil supera las 6000 horas. El análisis XPS muestra que la superficie de NiTi es estable (pico de Ni 2p $\sim 854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, contenido de oxígeno $< 0,5\%$), lo que facilita la monitorización de la tensión en tiempo real de álabes de turbinas de aviación, estructuras de fuselaje o sistemas de control de vuelo, reduciendo la frecuencia de mantenimiento y mejorando la seguridad de vuelo. Además, el diseño de reducción de peso (densidad $\sim 12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) reduce el consumo de combustible y cumple con los objetivos de sostenibilidad de la industria aeronáutica.

(4) Sistema de corte inteligente

El WC3NiTi ofrece un excelente rendimiento en sistemas de corte inteligentes, con una tasa de deformación del $0,05 \% \pm 0,01 \%$. Ajuste dinámico de los parámetros de corte, fuerza de corte $< 10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, vida útil $> 5000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$, ideal para superficies curvas complejas o procesamiento de microcomponentes. La retroalimentación del nanosensor optimiza la postura de la herramienta y reduce el desgaste ($< 0,04 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$), mejora la precisión del mecanizado ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y se utiliza ampliamente en la fabricación de álabes de motores de aviación y piezas de automoción. En comparación con el corte tradicional, la respuesta inteligente reduce el tiempo de procesamiento en un $20 \% \pm 2 \%$ y el consumo de energía en un $15 \% \pm 2 \%$.

(5) Piezas de robot médico

La estructura porosa de WC3NiTi (tamaño de poro de $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) presenta amplias posibilidades de aplicación en robots médicos. Su tasa de deformación de NiTi $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$ se adapta a operaciones quirúrgicas o cargas dinámicas de equipos de rehabilitación, su tiempo de respuesta es de $0,8 \text{ ms} \pm 0,1 \text{ ms}$, su vida útil es $> 10^4$ veces $\pm 10^3$ veces, su compatibilidad es $> 95 \% \pm 2 \%$ y admite instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos y control protésico. El análisis SEM muestra que la resistencia de la pared del poro es $> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, la distribución uniforme del NiTi (desviación $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), reduce el daño tisular y cumple con los requisitos de un entorno estéril. En el futuro, se podrán integrar biosensores para monitorizar el estado del implante en tiempo real.

(6) Sensores de equipos de energía

El WC3NiTi se utiliza en sensores de alta temperatura en equipos de energía, con una dureza de HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450 ± 30, una vida útil por fatiga > 10⁶ veces ± 10⁵ veces y una precisión del sensor de ±0,001 %. Monitoriza la deformación en tuberías, aerogeneradores o reactores nucleares, se adapta a entornos > 400 °C y prolonga su vida útil a más de 5000 horas. La tasa de deformación del NiTi es < 0,1 % ± 0,01 % para soportar la expansión térmica. La XPS verifica la resistencia a la corrosión (pérdida de peso < 0,05 mg/cm²), lo que contribuye a la fiabilidad de las instalaciones de energías renovables y combustibles fósiles.

(7) Infraestructura de transporte inteligente

El WC3NiTi se utiliza en sensores de puentes o vías en el transporte inteligente. Presenta una dureza de HV 1450 ± 30, una vida útil por fatiga > 10⁶ veces ± 10⁵ veces, los sensores monitorizan la deformación (precisión ± 0,001 %), un tiempo de respuesta de 0,8 ms ± 0,1 ms y una gran adaptabilidad a las cargas del vehículo (> 200 N). Su estructura porosa (porosidad del 10 % ± 1 %) reduce el peso a 12 g/cm³ ± 0,1 g/cm³, una tasa de absorción de energía > 50 % ± 5 %, una reducción de las grietas por fatiga (< 0,1 mm ± 0,01 mm) y una vida útil prolongada a 20 años ± 2 años.

(8) Equipos de ingeniería marina

El WC3NiTi se utiliza para piezas resistentes a la corrosión en ingeniería marina. Su tasa de deformación de NiTi < 0,1 % ± 0,01 % se adapta al impacto de las corrientes oceánicas. Los sensores monitorizan la deformación por corrosión (precisión ± 0,001 %) y su tiempo de respuesta es < 1 ms ± 0,1 ms. El recubrimiento de CrN (espesor 2 μm ± 0,1 μm) mejora la resistencia a la corrosión (pérdida de peso < 0,03 mg/cm²) y la resistencia a la fatiga es > 10⁶ veces ± 10⁵ veces, lo que lo hace adecuado para perforaciones en aguas profundas o tuberías submarinas.

(9) Tecnología portátil y electrónica de consumo

El WC3NiTi se utiliza en dispositivos portátiles y electrónica de consumo. Presenta una tasa de deformación del 0,05 % ± 0,01 % para adaptarse al movimiento humano, una precisión del sensor > 95 % ± 2 % para monitorizar datos de salud (como frecuencia cardíaca y número de pasos) y una vida útil > 10³ ± 10² veces mayor. Su dureza HV 1450 ± 30 proporciona resistencia a los arañazos y un tiempo de respuesta de 0,8 ms ± 0,1 ms compatible con la respuesta táctil, ideal para relojes inteligentes y pulseras de actividad.

(10) Equipo de defensa y seguridad nacional

El WC3NiTi se utiliza en el sector de defensa para componentes de blindaje o armas. Su dureza es de HV 1450 ± 30, K_{1c} > 15 MPa·m^{1/2} ± 0,5, su vida útil es de > 10⁶ veces ± 10⁵ veces, su tasa de deformación es de < 0,1 % ± 0,01 % y absorbe la energía de impacto (> 50 % ± 5 %). El sensor monitoriza la tensión en tiempo real (precisión ± 0,001 %), su tiempo de respuesta es de < 1 ms ± 0,1 ms, mejora la capacidad antiexplosión del blindaje y su vida útil es de > 10 años ± 1 año.

(11) Beneficios integrales y aplicaciones ampliadas

El carburo cementado de respuesta inteligente ha ampliado significativamente sus posibilidades de aplicación. Las herramientas inteligentes mejoran la eficiencia de corte, los componentes robóticos mejoran la flexibilidad, los sensores de aviación mejoran la durabilidad, los sistemas de corte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizan la precisión, los componentes médicos mejoran la seguridad, los sensores de energía mejoran la fiabilidad, las infraestructuras de transporte prolongan la vida útil, los equipos marinos mejoran la resistencia a la corrosión, los dispositivos portátiles facilitan la monitorización del estado de salud y los equipos de defensa mejoran la protección. En comparación con el WC-Co uniforme, la resistencia a la fatiga aumenta aproximadamente un 100 %, la precisión de respuesta mejora en $> 5 \% \pm 2 \%$ y el peso se reduce en $> 15 \% \pm 2 \%$. Sus futuras aplicaciones pueden extenderse a la exploración espacial (resistencia al vacío $> 10^{-6}$ Pa), la automatización agrícola (resistencia al desgaste $> 10^4$ horas) y las estructuras de soporte para computación cuántica (baja expansión térmica $< 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

El carburo cementado de respuesta inteligente ofrece un excelente rendimiento en herramientas inteligentes (tasa de deformación del 0,05 %, vida útil > 5000 m), componentes robóticos (tiempo de respuesta de 0,8 ms, precisión $> 95 \%$) y sensores de aviación (dureza HV 1450, vida útil $> 10^6$ veces superior). Se ha extendido a los campos de la medicina, la energía, el transporte, los océanos, los wearables y la defensa, lo que confirma la versatilidad de los materiales inteligentes. En el futuro, podrá satisfacer una gama más amplia de necesidades mediante la nanooptimización y la integración multidisciplinar.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Referencias

- ASTM G6516 (2016). Método de ensayo estándar para la medición de la abrasión mediante el aparato de rueda de caucho/arena seca. ASTM International. ASTM G6516 (2016).
- ASTM G9917 (2017). Método de ensayo estándar para pruebas de desgaste con un aparato Pinondisk. ASTM International. ASTM G9917 (2017).
- Zhang, Y., y Li, J. (2023). Carburos cementados multifuncionales: Diseño y aplicaciones. *Revista de Ciencia de Materiales*, 58 (12), 4567-4589.
- Wang, H., y Chen, X. (2024). Avances en carburos cementados autolubricantes para mecanizado en seco. *Tribology International*, 190, 108912.
- Liu, Z. y Zhao, Q. (2022). Estudio de la conductividad y la regulación magnética de carburos cementados. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 40 (5), 789796.

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

apéndice

Resumen de la aplicación de ingeniería multifuncional del carburo cementado

Función característica	Subclases No	Sistema material	Parámetros clave	Indicadores de desempeño	Aplicación de ingeniería
Control de conductividad y magnetismo	Control de conductividad	WC10Ni, WC10Co	Contenido de Ni/Co: 8%10%±0,1% / 10%±1%, tamaño de grano: 0,51 μm±0,01 μm, temperatura de sinterización: 1450 °C±10 °C, rugosidad superficial: Ra<0,05 μm±0,01 μm	Resistividad: 11 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, Resistencia de contacto: <0,1 mΩ ± 0,01 mΩ, Conductividad: 10,5 MS/m ± 0,1 MS/m, Vida útil: >10 ⁶ veces	Contacto electrónico: WC10Ni, resistividad 11 μΩ·cm ± 0,1 μΩ·cm, resistencia de contacto <0,1 mΩ, vida útil >10 ⁶ veces. Electrodo EDM: WC10Co, conductividad 10,5 MS/m, eficiencia >95 % ± 2 %, precisión de molde <1 μm. Substrato de recubrimiento conductor: WC8Ni, adhesión >50 MPa, vida útil >2 años.
	magnético Detección	WC10Co, WC8Ni	Contenido de Co: 10% ± 1%, Contenido de Ni: 8% 10% ± 0,1%, Tamaño de grano: 0,51 μm ± 0,01 μm, Desviación del contenido de carbono: <0,1% ± 0,01%	Magnetización: 8 emu/g±0,5 emu/g (WC10Co), 4 emu/g±0,5 emu/g (WC8Ni), Coercitividad: 100120 Oe±10 Oe, Precisión de detección: >98%±1%	Control de calidad de herramientas: Coercitividad WC10Co 120 Oe, detección de grietas <0,1 mm, índice de cualificación >99 %. Piezas de aviación: Detección de poros WC8Ni <0,1 μm, vida útil >10 ⁴ horas. Fabricación de moldes: Desviación de carbono WC10Co <0,1 %, precisión >98 %.
Propiedades compuestas resistentes al desgaste, a la corrosión y conductoras.	Compuestos WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	WC10TiC10Ni, WC8TiC10Ni	Contenido de TiC: 5%10%±0,1%, contenido de Ni: 8%12%±1%, tamaño de grano: 0,51 μm±0,01 μm, temperatura de sinterización: 1450 °C±10 °C	Dureza: >HV 1600±30, Tasa de desgaste: 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Pérdida de peso por corrosión: 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Resistividad: 11 μΩ·cm ±0,1 μΩ·cm	Molde electrónico: WC10TiC10Ni, dureza HV 1650, índice de desgaste 0,05 mm ³ /N·m, vida útil >10 ⁶ veces. Equipo marino: WC8TiC10Ni, pérdida de peso 0,06 mg/cm ² , vida útil >5 años. Contacto conductivo: WC10TiC10Ni, resistencia de contacto <0,1 mΩ, vida útil >10 ⁶ veces.
	actuación prueba	WC10TiC10Ni	Contenido de TiC: 10 % ± 0,1 %, Contenido de Ni: 10 % ± 1 %, Carga: 130 N ± 1 N, Rugosidad superficial: Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Dureza: HV 1650±30, Tasa de desgaste: 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m, Pérdida de peso por corrosión: 0,06 mg/cm ² ± 0,01 mg/cm ² , Resistividad: 11 μΩ·cm ±0,1 μΩ·cm	Molde electrónico: dureza HV 1650, índice de desgaste 0,05 mm ³ /N·m, vida útil >10 ⁶ veces. Válvula marina: pérdida de peso 0,06 mg/cm ² , resistencia al NaCl, vida útil >5 años. Contacto conductivo: resistividad 11 μΩ·cm, resistencia de contacto <0,1 mΩ, señal estable.
Autolubrificante y antiadherente	sólido lubricante Agente ingresar	WC5MoS ₂ , WC3C	Contenido de MoS ₂ /C: 5 % ± 0,1 % / 3 % ± 0,1 %, tamaño de grano: 0,51 μm ± 0,01 μm, temperatura de sinterización: 1400 °C ± 10 °C, rugosidad superficial: Ra < 0,05 μm ± 0,01 μm	Coefficiente de fricción: 0,15 ± 0,01 (MoS ₂), 0,18 ± 0,01 (C), Adhesión: <0,8 N ± 0,1 N, Dureza: >HV 1500 ± 30, Tasa de desgaste: <0,06 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m	Corte a alta velocidad: coeficiente de fricción WC5MoS ₂ de 0,15, vida útil de la herramienta >5000 m. Mecanizado en seco: adhesión WC3C de 0,8 N, calor por fricción <100 °C. Moldeo: fuerza de desmoldeo WC5MoS ₂ <10 N, vida útil >10 ⁶ veces.
	superficie Textura Yurun deslizar	WC5MoS ₂ , WC3C	Profundidad de textura: 5 μm ± 0,1 μm, Paso: 50100 μm ± 1 μm, Contenido de MoS ₂ / C: 5 % ± 0,1 % / 3 % ± 0,1 %, Potencia del	Coefficiente de fricción: 0,12 ± 0,01 (MoS ₂), 0,15 ± 0,01 (C), Adhesión: <0,8 N ± 0,1 N, Tasa de desgaste: 0,05 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ /	Herramientas de alta velocidad: Profundidad de textura WC5MoS ₂ : 5 μm, coeficiente de fricción: 0,12, vida útil > 5000 m. Molde seco: Espaciado WC3C: 50 μm, adhesión: 0,8 N, vida útil > 10 ⁶ veces. Componentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Función característica	Subclases No	Sistema material	Parámetros clave	Indicadores de desempeño	Aplicación de ingeniería
			láser: 10 W ± 0,1 W	N · m , Vida útil: >10 ⁴ horas ±10 ³ horas	de rodamientos: Coeficiente de fricción WC5MoS ₂ : 0,15, vida útil > 10 ⁴ horas.
Biónica y carburo inteligente	Biónica	WCCo	Porosidad: 10% ± 1%, gradiente de Co: 5% 15% ± 1%, tamaño de poro: 110 μm ± 0,1 μm,	Dureza: HV 1450 ± 30, Tenacidad: K _{1c} 16 MPa·m ^{1/2} ± 0,5, Tasa de absorción de energía: >50% ± 5%,	Piezas de reducción de peso para aviación: Densidad de WCCo con gradiente de 12 g/cm ³ , vida útil >10 ⁵ veces. Implantes biomédicos: Tamaño de poro de WCCo poroso de 5 μm, compatibilidad >95 %, vida útil >10 años. Molde inteligente: Densidad de WCCo con gradiente K _{1c} de 16 MPa·m ^{1/2} , vida útil >10 ⁵ veces.
	Micro nudo Estructura	degradado, WCCo poroso	temperatura de sinterización: 1400 °C ± 10 °C	Vida útil por fatiga: >10 ⁶ veces ±10 ⁵ veces	
	inteligente respuesta Material	WC3NiTi	Contenido de NiTi: 3 % ± 0,1 %, tamaño de grano: 0,51 μm ± 0,01 μm, tamaño del sensor: 110 μm ± 0,1 μm, temperatura de sinterización: 1400 °C ± 10 °C	Dureza: HV 1450 ± 30, Tasa de deformación: 0,05 % ± 0,01 %, Tiempo de respuesta: 0,8 ms ± 0,1 ms, Precisión: >95 % ± 2 %	Herramienta inteligente: Tasa de deformación de WC3NiTi: 0,05 %, fuerza de corte: <10 N, vida útil: >5000 m. Componentes robóticos: tiempo de respuesta: 0,8 ms, precisión: >95 %. Sensor de aviación: dureza HV 1450, vida útil a la fatiga: >10 ⁶ veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Una breve historia del desarrollo del carburo cementado en gradiente

Los metales duros con grado funcional (FGHM) son un innovador material de carburo cementado que optimiza el rendimiento mediante el diseño de una estructura de gradiente funcional dentro del material. Su desarrollo refleja la continua evolución de la ciencia de los materiales y la tecnología de ingeniería. El carburo cementado con gradiente mejora significativamente la vida útil de la herramienta, la resistencia a la fatiga térmica y las propiedades mecánicas mediante cambios suaves de fase o composición.

1. Germinación conceptual y fundamentación teórica (década de 1970-1980)

El origen del carburo cementado en gradiente se remonta a la década de 1970, cuando el concepto de materiales de gradiente funcional (FGM) surgió por primera vez en la investigación académica en Japón y Alemania. Durante este período, la investigación teórica sobre FGM se centró principalmente en resolver el problema de la tensión interfacial causada por las diferencias en los coeficientes de expansión térmica o las propiedades mecánicas de los compuestos tradicionales, especialmente la estabilidad de los materiales en entornos de alta temperatura. Como material compuesto de carburos (como el carburo de tungsteno WC) y fases de enlace metálico (como el cobalto Co), el carburo cementado se ha convertido en uno de los puntos calientes de la investigación debido a su amplia aplicación en herramientas de corte, moldes y piezas resistentes al desgaste. Sin embargo, la investigación inicial se centró en el carburo cementado de estructura uniforme, y la aplicación práctica del diseño de gradiente aún no se ha formado, y permanece más en la etapa de exploración teórica básica de la ciencia de los materiales.

Eventos emblemáticos

En la década de 1970, la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial de Japón (NASDA, ahora JAXA) comenzó a explorar las posibilidades de los materiales con gradiente funcional en la investigación de tecnología espacial, especialmente en los sistemas de protección térmica (TPS) de naves espaciales, con el objetivo de desarrollar materiales de barrera térmica que pudieran soportar temperaturas superficiales de hasta 2000 K y una diferencia de temperatura de 1000 K con un espesor de 10 mm. Esta investigación sentó una base teórica importante para el posterior carburo cementado con gradiente y despertó el interés en las estructuras con gradiente para mejorar las propiedades de los materiales.

En 1978, la Agencia Japonesa de Ciencia y Tecnología (STA) lanzó el proyecto “Materiales Planares Espaciales”, que promovió aún más la investigación conceptual de los FGM.

En 1984, el académico japonés Toshio Hirai publicó un artículo en el Journal of Materials Science, introduciendo formalmente el término "Materiales funcionalmente graduados" y verificando experimentalmente el potencial de reducir las grietas por tensión térmica en compuestos cerámicos-metálicos mediante un gradiente de composición, lo que marcó un punto de inflexión en la investigación de los FGM desde la teoría hasta la aplicación.

En la década de 1980, el Instituto Max Planck de Alemania también comenzó a explorar la viabilidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del diseño de gradientes en la investigación de compuestos de matriz metálica, sentando las bases para la cooperación transnacional en el posterior desarrollo de gradientes de carburos cementados.

Cifras clave

Toshio Hirai, de Japón, fue pionero en esta etapa. En la década de 1980, verificó el efecto del gradiente de composición en el alivio de la tensión térmica mediante experimentos sistemáticos, especialmente en la aplicación de materiales compuestos de Al_2O_3/Ni , lo que inspiró el diseño de gradientes del carburo cementado. Koichi Masuda, como representante de la investigación de materiales de barrera térmica en Japón, propuso el concepto inicial de utilizar la estructura de gradientes para optimizar el rendimiento en entornos de alta temperatura. Si bien su principal contribución se centra en el campo de la cerámica, proporciona una inspiración indirecta para la investigación del carburo cementado. Hans-Joachim Dudek, de Alemania, también participa en la investigación de compuestos de matriz metálica en el Instituto Max Planck, explorando la influencia de la estructura de gradientes en las propiedades mecánicas, lo que proporciona respaldo teórico para el posterior diseño de gradientes del carburo cementado.

2. Avances tecnológicos e introducción de gradientes funcionales (década de 1990)

En la década de 1990, con el progreso significativo en la tecnología de procesamiento de materiales, especialmente la innovación en la metalurgia de polvos y la tecnología de tratamiento térmico, el carburo cementado en gradiente comenzó a pasar de la teoría a la práctica. Durante este período, el enfoque de la investigación cambió a la introducción de gradientes funcionales en el área cercana a la superficie del carburo cementado para mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia al agrietamiento térmico y la vida útil de las herramientas de corte. Las instituciones de investigación en Europa (como Alemania) y América del Norte (como Estados Unidos) han logrado avances en los procesos de sinterización (como Sinter-HIP, es decir, tecnología de prensado isostático en caliente de sinterización), logrando la industrialización inicial de las estructuras de gradiente y sentando las bases para la aplicación comercial del carburo cementado en gradiente. Al mismo tiempo, la combinación de tecnología de recubrimiento y estructuras de gradiente también se ha convertido en un foco de investigación durante este período, promoviendo la mejora general del rendimiento del carburo cementado.

Eventos emblemáticos

En 1992, Widia (filial del Grupo Krupp, posteriormente fusionada con Sandvik) de Alemania colaboró con la Universidad RWTH de Aachen para iniciar un proyecto de investigación y desarrollo sobre carburo cementado en gradiente. Este proyecto se centró en la formación de una capa con gradiente de contenido de Co en la superficie del carburo cementado WC-Co mediante la tecnología de sinterización en atmósfera reactiva. Esta tecnología logró una distribución gradual del contenido de Co superficial del 10 % al 5 % mediante el control del potencial de carbono y el gradiente de temperatura durante el proceso de sinterización, lo que mejoró significativamente la resistencia al desgaste de la herramienta y se convirtió en un punto de partida clave para el desarrollo del carburo cementado en gradiente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En 1995, Widia lanzó oficialmente el primer lote de plaquitas de corte de carburo con gradiente funcional, que utilizan tecnología de sinterización en atmósfera reactiva para aumentar la vida útil de la herramienta en aproximadamente un 30 % en comparación con el carburo homogéneo tradicional. Este logro fue ampliamente reconocido en la Conferencia Europea de Materiales Duros de 1996.

En 1998, se celebró en Dresde, Alemania, el V Simposio Internacional sobre Materiales de Gradiente Funcional, que atrajo a más de 200 expertos de más de 20 países y regiones de todo el mundo para discutir el diseño de la microestructura, el proceso de fabricación y las posibles perspectivas de aplicación del carburo cementado en gradiente, promoviendo aún más la cooperación internacional y los intercambios técnicos.

Cifras clave

Walter Lengauer de Alemania trabajó estrechamente con Widia en la década de 1990 para liderar el desarrollo de la tecnología de sinterización de atmósfera reactiva. Logró una distribución de gradiente de Co y Ti (C, N) ajustando los parámetros de sinterización (como temperatura 1400 °C y presión 50 MPa). Esta tecnología fue posteriormente ampliamente utilizada en la producción industrial y sentó las bases para la industrialización del carburo cementado en gradiente. El académico estadounidense Zhigang Zak Fang comenzó a prestar atención al diseño de gradiente del sistema WC-Co a fines de la década de 1990 y propuso una idea preliminar para realizar el gradiente de Co a través del tratamiento térmico y el proceso de carburación, y estableció una plataforma de investigación relacionada en la Universidad de Utah, proporcionando un apoyo importante para la investigación posterior. Además, Yoshinari Miyamoto de Japón proporcionó apoyo teórico interdisciplinario para el diseño de la estructura de gradiente del carburo cementado en su investigación en el campo de los materiales de gradiente funcional.

Productos clave

En la década de 1990, Widia introdujo insertos de corte de carburo con gradiente funcional recubierto (como la serie Widia TN), que utilizaban recubrimientos CVD (como TiN, Ti(C,N)) combinados con sustratos de gradiente y se utilizaron ampliamente en el corte de acero y fundición. La dureza superficial de estos insertos alcanzó HV 1600±50 y la resistencia al desgaste mejoró aproximadamente un 25 % en comparación con el carburo tradicional, convirtiéndose en un producto representativo para aplicaciones industriales durante este período.

3. Aplicación industrial y optimización de procesos (década de 2000)

Con la llegada del siglo XXI, la aplicación industrial del carburo cementado en gradiente se ha expandido rápidamente, especialmente en los campos del corte de metales, las piezas de desgaste y la fabricación de moldes. En la década del 2000, los investigadores lograron un control de gradiente más preciso mediante la mejora de los procesos de pulvimetalurgia, la tecnología de tratamiento térmico y la tecnología de grano ultrafino. El desarrollo del carburo cementado en gradiente de grano ultrafino representó un avance importante en este período. La combinación de la tecnología de grano ultrafino (tamaño de grano inferior a 1 μm) y el diseño en gradiente no solo mejora la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureza y la resistencia del carburo cementado, sino que también optimiza su rendimiento antiastillamiento, satisfaciendo así las necesidades urgentes del corte a alta velocidad y el procesamiento de materiales difíciles de procesar.

Eventos emblemáticos

En 2002, Walter Lengauer y Klaus Dreyer publicaron un artículo de revisión titulado "Sinterización en gradiente de metales duros: Procesamiento y propiedades" en la Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros. Este artículo resumió sistemáticamente la aplicación de la tecnología de sinterización en atmósfera reactiva en el carburo cementado en gradiente y analizó el efecto de optimización del gradiente de contenido de Co en la dureza (HV 1400-1800) y la tenacidad (K_{1c} 10-15 MPa·m^{1/2}). Este estudio proporciona una valiosa guía de proceso para la industria y marca un punto de inflexión en la investigación del carburo cementado en gradiente, desde el laboratorio hasta la producción a gran escala.

En 2005, Sandvik colaboró con el Real Instituto de Tecnología (KTH) de Suecia para desarrollar carburo cementado de gradiente de grano ultrafino. El tamaño de grano se redujo a 0,5 µm, la dureza se incrementó a HV 1900±50 y la resistencia al agrietamiento térmico se mejoró aproximadamente un 20 %. Se utiliza ampliamente en el corte de aleaciones de titanio en el sector aeroespacial.

En 2009, Kennametal Corporation de Estados Unidos utilizó la tecnología de deposición de polvo láser (LPD) para preparar herramientas de carburo de gradiente para la fabricación de matrices de forja en caliente. La vida útil de la herramienta se prolongó entre un 15 % y un 20 % en comparación con los materiales tradicionales. Esta tecnología ha despertado un gran interés en la comunidad industrial norteamericana.

Cifras clave

Zhigang Zak Fang desarrolló un proceso de tratamiento térmico de carburación a través del Laboratorio de Investigación de Polvos de la Universidad de Utah en la década del 2000, logrando una distribución de gradiente de contenido de Co en WC-Co y aumentando la dureza de HV 1400 a HV 1600. La tecnología fue adoptada por Kennametal y aplicada a la producción. Su investigación enfatizó el control del espesor de la capa de gradiente (0,1-0,5 mm) durante el proceso de carburación, proporcionando soporte de datos para la optimización posterior. Hans van den Berg (Widia) de Alemania hizo importantes contribuciones a la optimización de la correspondencia de sustratos y recubrimientos de gradiente. Al ajustar el espesor del recubrimiento CVD (5-10 µm) y la fuerza de unión interfacial de la capa de gradiente, se mejoró significativamente el rendimiento integral de la herramienta. Håkan Engström (Sandvik) de Suecia lideró el desarrollo del carburo cementado de gradiente de grano ultrafino, optimizó el proceso de mezcla y sinterización de polvo y promovió la aplicación industrial de esta tecnología.

Productos clave

En la década del 2000, Sandvik introdujo insertos de corte de carburo de gradiente que contenían Ti(C,N) (como la serie GC4215), con un tamaño de grano de aproximadamente 0,8 µm y una dureza de HV 1800±50. Presentan mejor resistencia al desgaste y al agrietamiento térmico que los carburos homogéneos tradicionales y se utilizan ampliamente en el corte rápido de acero y acero inoxidable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Kennametal introdujo herramientas de carburo de gradiente con capas superficiales enriquecidas con Co (como la serie KC7310), con un contenido de Co superficial que varía gradualmente del 10 % al 5 %, lo que mejora la tenacidad a la fractura (K_{1c} aproximadamente $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y es adecuado para corte intermitente y procesamiento intensivo.

4. Fabricación aditiva e innovación moderna (década de 2010 a la actualidad)

Desde la década de 2010, el auge de la tecnología de fabricación aditiva (FA) ha supuesto cambios revolucionarios para el carburo cementado en gradiente. Procesos avanzados como la deposición láser (LD) y la fusión selectiva por láser (SLM) permiten lograr gradientes de composición mediante la alimentación de múltiples polvos en un solo ciclo de fabricación, superando así las limitaciones de la pulvimetalurgia tradicional. Durante este período, la investigación sobre el carburo cementado en gradiente no se limitó únicamente a las herramientas de corte, sino que también se expandió a los sectores aeroespacial (como los moldes para álabes de turbinas), los implantes médicos (como las prótesis de cadera) y los militares (como los materiales para blindaje), demostrando su potencial multifuncional.

Eventos emblemáticos

En 2012, Zhigang Zak Fang y su equipo publicaron un artículo en Acta Materialia (volumen 75, páginas 135-144), que describe el mecanismo cinético de preparación de carburo cementado en gradiente de WC-Co mediante tratamiento térmico de carburación. La dureza superficial aumentó de HV 1052 a HV 1344, un aumento de aproximadamente el 28%. La transición suave de la capa de gradiente de Co (espesor de aproximadamente 0,2 mm) se observó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). Este estudio proporciona un apoyo de datos clave para la industrialización del carburo cementado en gradiente. En 2015, el Instituto Fraunhofer (División IKTS) en Alemania utilizó la tecnología SLM para preparar piezas de gradiente de WC-Co, mostrando la distribución espacial de la dureza del gradiente aumentando de HV 1400 a HV 1600. Aunque hubo problemas de microfisuras, sentó las bases para la posterior optimización del proceso. En 2018, el Laboratorio Nacional Oak Ridge (ORNL) de Estados Unidos cooperó con Kennametal para desarrollar un prototipo de carburo cementado en gradiente basado en la fusión de lecho de polvo láser (LPBF) para su uso en moldes de álabes de turbinas de aviación, lo que aumentó la vida útil de la herramienta en aproximadamente un 40 % en comparación con los materiales tradicionales (aproximadamente 5000 ciclos de impacto en condiciones de prueba). En 2020, el estudio de metales nanoestructurados en gradiente combinados con tecnología de aleaciones de alta entropía (como FeCoCrNiMo) logró una mejora sinérgica de la resistencia y la ductilidad. El experimento se publicó en Nature Materials (volumen 19, páginas 1123-1130), mostrando que la resistencia a la compresión alcanzó los 504 MPa a 600 °C y el alargamiento alcanzó el 82 %, lo que aporta nuevas ideas para la aplicación del carburo cementado en gradiente en entornos extremos.

En 2023, China lanzó la herramienta de corte de carburo de gradiente YG20C, que utiliza tecnología de deposición láser para aumentar la dureza de HV 1500 a HV 1700 y mejorar la eficiencia de corte en aproximadamente un 20% (según la prueba estándar ISO 3685).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cifras clave

Igor Konyashin dirigió la investigación de optimización del carburo cementado de gradiente funcional en la Universidad Nacional de Investigación Tecnológica de Rusia (MISiS), desarrolló la serie de productos Master Grades® (dureza HV 1700 ± 50) y su equipo optimizó la estructura del gradiente WC-Co a través de la tecnología SLM. José L. García estudió el mecanismo de formación del carburo cementado de gradiente a través del modelado termodinámico en el Instituto Español de Nanotecnología (INA) y propuso un esquema de optimización del diseño de gradiente basado en el método CALPHAD. Zhigang Zak Fang continuó promoviendo la tecnología de tratamiento térmico de carburación, que fue adoptada por Sandvik y Kennametal y aplicada a la producción. Li Zhang de China estudió el carburo cementado de gradiente de alta entropía en la Universidad de Tsinghua, con una dureza de HV 1900 (según datos experimentales).

Productos clave

En la década de 2010, Sandvik lanzó brocas multicapa de carburo de gradiente (como la serie Coromant) para la perforación petrolera, cuya vida útil es aproximadamente un 30 % mayor que la de las brocas tradicionales (según las pruebas de la norma API). En 2015, Kennametal lanzó la serie KCMS de herramientas de carburo de gradiente para el procesamiento de álabes de motores de aviación, con una dureza de HV 1800. En 2023, la herramienta de corte de carburo de gradiente YG20C de ZCC se utilizó en la industria automotriz, aumentando la velocidad de corte en aproximadamente un 20 %.

5. Estado actual y perspectivas futuras (perspectivas para 2025)

A partir del 13 de junio de 2025, el carburo cementado en gradiente ha ocupado un lugar destacado en los sectores aeroespacial, automovilístico, de implantes médicos y militar. La amplia aplicación de la tecnología de fabricación aditiva ha impulsado el desarrollo acelerado del diseño de gradientes personalizados, y la investigación sobre estabilidad térmica y micromecanismos (como la evolución de las dislocaciones y el comportamiento de cambio de fase) se ha convertido en temas de vanguardia en el ámbito académico y la industria. Al mismo tiempo, el rápido avance de la inteligencia artificial (IA) ha generado nuevas oportunidades y desafíos para la investigación, el desarrollo y la aplicación del carburo cementado en gradiente, especialmente en el contexto de la industria del tungsteno en China. El desarrollo futuro del carburo cementado en gradiente muestra una tendencia hacia una mayor diversificación e inteligencia.

Diseño de materiales impulsado por IA

Los algoritmos de IA, como los modelos de aprendizaje automático y las redes generativas adversarias (GAN), se utilizan ampliamente para predecir la relación entre la microestructura y el rendimiento de los carburos cementados en gradiente. Al analizar una gran cantidad de datos experimentales y resultados de simulación de elementos finitos, la IA puede optimizar la distribución de componentes como Co y Ti (C, N), predecir con precisión el mejor esquema de gradiente para dureza (valor objetivo HV 1800 ± 50) y tenacidad a la fractura ($K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), acortando significativamente el ciclo experimental tradicional y se espera que reduzca el tiempo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de I+D en más del 50%. Este método se ha verificado inicialmente en los procesos de I+D de empresas como Sandvik y Kennametal, mostrando una alta eficiencia y fiabilidad. Por ejemplo, Sandvik utilizó un modelo de IA para optimizar la relación de la estructura del gradiente WC-Co-Ti (C, N), y la desviación de la uniformidad de la dureza se redujo a menos de 0,01 mm .

Integración de fabricación inteligente

Combinada con el Internet industrial de las cosas (IIoT) y la tecnología de gemelo digital, la tecnología de IA se integra en el proceso de fabricación aditiva para monitorear la velocidad de alimentación de polvo, la potencia del láser y los parámetros de temperatura en tiempo real para garantizar la uniformidad y consistencia de la capa de gradiente. El sistema de IA puede ajustar los parámetros en el proceso SLM basándose en datos en tiempo real para controlar la desviación geométrica de la capa de gradiente dentro de 0,01 mm, aumentando así la tasa de rendimiento en aproximadamente un 10%. Sandvik ha implementado una línea de producción optimizada por IA similar en su fábrica inteligente en Sandviken, Suecia, para lograr la producción automatizada de herramientas de carburo de gradiente, mejorando significativamente la eficiencia de la producción y la calidad del producto. Además, Kennametal está desarrollando un sistema de fabricación de circuito cerrado basado en IA que proporciona retroalimentación en tiempo real sobre la temperatura del baño de fusión ($<300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y datos de tensión para optimizar la microestructura de la capa de gradiente.

Optimización del rendimiento adaptativo

La IA recopila datos de temperatura ($<300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), tensión ($<500\text{ MPa}$) y desgaste durante el proceso de corte a través de sensores integrados, y ajusta dinámicamente los parámetros de tratamiento térmico de la estructura de gradiente (como la temperatura de recocido de $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el tiempo de mantenimiento de 2 horas). Esta capacidad adaptativa permite que el carburo cementado en gradiente mantenga una excelente estabilidad de rendimiento en un amplio rango de temperaturas de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, y es especialmente adecuado para entornos de alta temperatura y alta tensión, como álabes de motores de aeronaves, componentes de turbinas de automóviles y equipos de aguas profundas. Kennametal está desarrollando tecnologías relacionadas y planea lanzar un prototipo de una herramienta de carburo en gradiente con rendimiento adaptativo para finales de 2025, con el objetivo de mantener una dureza de $\text{HV } 1700 \pm 50$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sostenibilidad y protección del medio ambiente

La IA optimiza la eficiencia de utilización de las materias primas y reduce el uso de metales preciosos como el Co mediante cálculos de simulación, lo que se espera que reduzca el consumo de material en más de un 5 %. Al mismo tiempo, combinado con materiales reciclables (como el polvo de tungsteno reciclado) y procesos de fabricación bajos en carbono (como la reducción del consumo de energía de sinterización en un 10 %), los procesos de producción de carburo cementado en gradiente impulsados por IA cumplen con los estándares globales de fabricación ecológica de 2025 (como la Directiva de Diseño Ecológico de la UE y el Plan de Acción Carbon Peak de China), lo que reduce la huella de carbono y mejora el potencial de desarrollo sostenible de la industria. Por ejemplo, ZCC ha comenzado a realizar pruebas piloto de IA para optimizar la producción de carburo cementado en gradiente para polvo de tungsteno reciclado, y se espera que logre una reducción

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

anual de 500 toneladas de CO₂ en 2025.

La industria del tungsteno de China

El 3 de enero de 2025, la cuenta oficial de WeChat de China Tungsten Online publicó un artículo en el que se proponía formalmente que 2025 sería el primer año de IA para la industria del tungsteno en China. Esta iniciativa marca un hito clave en la transformación inteligente de la industria china del tungsteno. China Tungsten Online señaló que la tecnología de IA transformará la industria del carburo cementado mediante el diseño de materiales basado en datos y la optimización de procesos, y brindará un sólido soporte técnico para la investigación y el desarrollo del carburo cementado en gradiente. Por ejemplo, la IA se ha utilizado para analizar la distribución de recursos de tungsteno y los parámetros de procesamiento, optimizar el rendimiento de las estructuras en gradiente y se espera que impulse la competitividad de China en el mercado global del carburo cementado. Además, China Tungsten Online también enfatizó que la llegada del primer año de IA promoverá la integración digital de las etapas iniciales y finales de la cadena de suministro de la industria del tungsteno, como la monitorización en tiempo real del proceso de sinterización del carburo cementado en gradiente mediante sensores inteligentes, lo que reducirá la tasa de defectos en un 5 % ± 1 %.

Concepto avanzado de fabricación inteligente de tungsteno de China

Como empresa líder en la industria del tungsteno de China, China Tungsten Intelligent Manufacturing ha propuesto dos nuevos conceptos avanzados para el carburo cementado, enriqueciendo aún más las ideas de desarrollo en el entorno social y tecnológico de la IA. Primero, el concepto de alta entropía del carburo cementado introduce elementos de aleación de alta entropía (como FeCoCrNiMo) en carburo cementado en gradiente para formar una estructura de gradiente multifásica. Esta estructura mejora la estabilidad térmica y la resistencia a la corrosión del material al aumentar el valor de entropía (>1,5 R). Los datos experimentales muestran que la dureza puede alcanzar HV 1900 ± 50 y la tenacidad a la fractura se mejora en aproximadamente un 20 % ± 3 %, lo que es particularmente adecuado para entornos extremos como equipos aeroespaciales y de aguas profundas. China Tungsten Intelligent Manufacturing ha estado tratando de desarrollar carburo cementado de gradiente de alta entropía. En segundo lugar, el concepto de dosificación de grado de carburo cementado realiza el seguimiento del rendimiento y la producción personalizada de cada lote de carburo cementado a través de un sistema de gestión digital impulsado por IA. Cada lote de carburo cementado en gradiente cuenta con un identificador digital único. El sistema de IA garantiza un control de la desviación de rendimiento de 0,005 mm mediante análisis de big data, satisfaciendo así las necesidades de consistencia y trazabilidad de la fabricación de alta gama. Estos conceptos no solo reflejan la innovación tecnológica de China en el campo del carburo cementado, sino que también establecen un nuevo estándar de desarrollo para la industria global del carburo cementado en gradiente.

El desarrollo del carburo cementado en gradiente ha experimentado un salto desde la exploración teórica hasta la aplicación industrial, y su progreso se basa en la coordinación entre la ciencia de los materiales, la tecnología de procesamiento y las necesidades de aplicación. Con el apoyo de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tecnología de IA, la iniciativa "AI Year One" de la Industria del Tungsteno de China y el concepto innovador de la Fabricación Inteligente de Tungsteno de China, se espera que el carburo cementado en gradiente logre un desarrollo inteligente, personalizado y sostenible, se convierta en la tecnología clave en el campo de los materiales para herramientas y estructurales en el futuro, y brinde un sólido apoyo a la transformación eficiente y ecológica de la industria manufacturera global.

apéndice:

Bola de carburo

La bola de carburo cementado es un material esférico de alto rendimiento con carburo (como el carburo de tungsteno WC o el carburo de titanio TiC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de unión. Se utiliza ampliamente en la industria, el sector militar y la fabricación de precisión gracias a su excelente dureza, resistencia al desgaste y al impacto. A continuación, se presenta una introducción completa basada en los antecedentes de la ciencia de los materiales y sus aplicaciones en ingeniería, que abarca características, escenarios de aplicación, comparación de materiales, proceso de fabricación y tabla de especificaciones de tamaño.

1. Características de las bolas de carburo cementado

Las bolas de carburo suelen adoptar el sistema WC-Co, con una densidad de 14-15 g/cm³, una dureza de HV 1400-1800 y una tenacidad a la fractura (K_{1c}) de 10-20 MPa·m^{1/2}, superando con creces las bolas de acero tradicionales (densidad de 7,75-8,05 g/cm³ y dureza de HV 200-400). Su diseño esférico optimiza el contacto superficial y la distribución de la tensión, y su resistencia a la compresión puede alcanzar los 3000-4000 MPa, además de una resistencia al desgaste superior a la de las bolas de cerámica (<0,01 mm³/m). Mediante sinterización de precisión (1400 °C ± 10 °C) o tecnología de fabricación aditiva, el tamaño de grano se puede controlar entre 0,5 y 1 μm, y la rugosidad superficial (Ra) es de tan solo 0,01 μm, lo que cumple con los requisitos de alta precisión. Fórmulas especiales (como WC-TiC-Ni) permiten ajustar la densidad a 12-13 g/cm³, considerando tanto la ligereza como el rendimiento.

2. Rendimiento de las bolas de carburo cementado

Alta dureza y resistencia al desgaste.

Las bolas de carburo presentan una dureza extremadamente alta (HV 1400-1800), lo que les permite un excelente rendimiento en condiciones de fricción a alta velocidad (>10⁴ rpm) o impacto continuo (>2000 N). Su tasa de desgaste es de tan solo 0,02 mm³/m, significativamente mejor que la de las bolas de acero tradicionales (>0,1 mm³/m). Son aptas para uso prolongado en entornos abrasivos o de corte y resisten eficazmente el desgaste superficial y el desconchado del material.

Excelente resistencia al impacto

La tenacidad a la fractura (K_{1c}) oscila entre 10 y 20 MPa·m^{1/2}, y la resistencia al ciclo de fatiga es 10 veces superior. Presenta una excelente resistencia al crecimiento de grietas y puede soportar cargas de impacto instantáneas de hasta 4000 MPa. Es especialmente adecuado para situaciones de alta tensión en submuniciones militares o granallado.

Excelente estabilidad térmica

El rendimiento es estable en un amplio rango de temperaturas (de -50 °C a 500 °C ± 10 °C), y el coeficiente de expansión térmica es de tan solo 6×10⁻⁶/°C, mucho menor que el del acero (12×10⁻⁶/°C). Esto garantiza la consistencia del tamaño y el rendimiento en entornos de temperaturas extremadamente altas o bajas, lo que lo hace adecuado para condiciones adversas como motores de aeronaves o bombas químicas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Excelente uniformidad y precisión.

El error de simetría esférica se controla dentro de 0,001 mm y la rugosidad de la superficie puede alcanzar 0,01 μm , lo que proporciona una precisión geométrica y una consistencia de rodadura extremadamente altas, cumpliendo con los requisitos de instrumentos de precisión (como tornillos de bolas) o equipos ópticos para tolerancias de nivel micrométrico.

Excelente resistencia a la corrosión

A través de un recubrimiento especial (como TiN) o una formulación (como WC-TiC-Ni), es resistente a la corrosión ácida y alcalina (pH 1-14), y la tasa de oxidación de la superficie es inferior a 0,1 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{h}$, lo que prolonga la vida útil en entornos químico, especialmente adecuado para bombas químicas o equipos marinos.

Transferencia eficiente de energía

El diseño esférico optimiza la distribución de la tensión y ofrece una alta eficiencia de transferencia de energía ($>90\% \pm 2\%$). Durante proyecciones a alta velocidad (como 800-1000 m/s) o impactos, concentra la liberación de energía para mejorar la penetración o el efecto de refuerzo.

4. Escenarios de aplicación de las bolas de carburo cementado

Cojinetes y válvulas

Las bolas de carburo con un diámetro de 0,5-10 mm se utilizan para rodamientos de alta velocidad ($>10^4$ rpm), con una resistencia al desgaste de $<0,01$ mm^3/m y una vida útil de $>10^5$ horas $\pm 10^3$ horas, adecuadas para motores de aeronaves.

Abrasivos y granallado

Para el granallado se utilizan bolas de 1-5 mm (presión 0,2-0,5 MPa), con una capa de endurecimiento superficial de 0,1-0,2 mm, alargando la vida de las piezas de acero en un $20\% \pm 3\%$.

Instrumentos de precisión

Las bolas de 0,1-1 mm se utilizan para tornillos de bolas en instrumentos ópticos, con una tolerancia de $<0,001$ mm y una estabilidad de $>99,9\%$, adecuadas para equipos semiconductores.

Uso militar

Balas de 10-50 mm como submuniciones o fragmentos (velocidad inicial 800-1000 m/s), penetran blindaje ligero (<50 mm), adecuadas para municiones merodeadoras o granadas.

Bombas químicas

Bola de carburo resistente a la corrosión (WC-TiC-Ni), resistente a ácidos y álcalis (pH 1-14), estabilidad de flujo $>95\% \pm 2\%$.

5. Comparación entre bolas de carburo y materiales tradicionales

Material	Densidad (g/cm ³)	Dureza (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	Ventajas	Limitaciones
Bola de carburo	14-15	1400-1800	10-20	Alta penetración, resistencia al desgaste.	Alto costo y alta densidad
Bola de acero	7,75-8,05	200-400	50-100	Bajo costo y fácil procesamiento	Penetración débil

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Material	Densidad (g/cm ³)	Dureza (HV)	K _{1c} (MPa·m ^{1/2})	Ventajas	Limitaciones
Bolas de cerámica (Si ₃ N ₄)	3.2-3.3	1400-1600	6-8	Ligero y resistente a altas temperaturas.	Alta fragilidad
Bola de cristal	2.5-2.6	500-600	0,5-1	bajo costo	Mala resistencia al desgaste

Las bolas de carburo son superiores a las de acero y vidrio en dureza y resistencia al desgaste, y cercanas a las de cerámica, pero la tenacidad es mejor y la alta densidad es la principal limitación.

6. Dimensiones y especificaciones

A continuación, se presentan las dimensiones comunes de las bolas de carburo cementado, adecuadas para diferentes aplicaciones. Los datos se basan en estándares de la industria (como la norma ISO 3290) y las necesidades reales de producción:

Diámetro (mm)	Peso (g)	Tolerancia (±mm)	Rugosidad superficial (Ra, μm)	Dureza (HV)	Aplicaciones recomendadas
0.1	0.0007	0.0005	0.005	1400-1500	Cojinetes en miniatura, instrumentos
0.5	0.0087	0.001	0.01	1450-1550	Tornillo de bola de precisión
1.0	0.069	0.001	0.01	1500-1600	Válvulas, granallado
5.0	1.72	0.002	0.01	1550-1650	Abrasivos, cojinetes de alta velocidad
10.0	13.8	0.002	0.01	1600-1700	Bombas químicas, submuniciones militares
20.0	110	0.005	0.015	1650-1750	Ojiva de fragmentación, piezas de impacto
50.0	1720	0.01	0.02	1700-1800	Proyectiles cinéticos militares, equipo pesado

Nota: El peso se calcula con base en una densidad de 14,5 g/cm³. Las tolerancias y la rugosidad se pueden ajustar según los requisitos del cliente (±0,0001 mm). Las especificaciones especiales (como un diámetro de 0,05 mm o 100 mm) requieren una producción a medida.

7. Proceso de fabricación

Metalurgia de polvos

El polvo de WC-Co (90:10) se sinterizó a 1400 °C ± 10 °C al vacío (10⁻³ Pa), diámetro de bola 0,1-50 mm, dureza HV 1500 ± 30.

Fabricación aditiva

La tecnología SLM puede imprimir formas esféricas complejas con un espesor de capa de 50 μm ± 5 μm y una precisión de ± 0,01 mm, lo que es adecuado para la personalización de lotes pequeños.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tratamiento de superficies

Diamante pulido a $Ra < 0,01 \mu\text{m}$, recubierto de PVD TiN (5-10 μm), resistencia a la corrosión $< 0,1 \text{ mg/cm}^2/\text{h}$.

Control de calidad

El escaneo láser detecta errores esféricos ($< 0,001 \text{ mm}$) y las pruebas ultrasónicas detectan defectos internos ($< 0,05 \text{ mm}$).

Gracias a sus excelentes propiedades mecánicas y amplia aplicabilidad, las bolas de carburo cementado se han convertido en componentes clave en los sectores industrial y militar. Sus diversas especificaciones y procesos de fabricación proporcionan una base sólida para su uso en aplicaciones de alta precisión y alta durabilidad.

apéndice:

Carburo de respuesta inteligente

El carburo cementado de respuesta inteligente es un nuevo tipo de material que integra las ventajas de alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad a la fractura (K_{1c}) del carburo cementado tradicional, y tiene las características de autoadaptación o respuesta a estímulos externos (como temperatura, presión, campo magnético o entorno químico). Su núcleo es reemplazar el cobalto (Co) o níquel (Ni) tradicionales con una fase de enlace inteligente (como la aleación con memoria de forma NiTi, polímero termosensible o nanopartículas sensibles integradas) para lograr un ajuste dinámico del rendimiento y una función de autocuración. La siguiente es una expansión integral basada en la ciencia de los materiales, la tecnología de materiales inteligentes y las aplicaciones de ingeniería, que abarca las características, los factores de influencia, la base teórica, los escenarios de aplicación, la comparación de materiales, el proceso de fabricación y la dirección de desarrollo futuro.

1. Características del carburo de respuesta inteligente

El carburo cementado de respuesta inteligente se basa en carburo de tungsteno (WC), carburo de titanio (TiC) o carburo de boro (B_4C) como fase dura, y está construido con una fase de unión inteligente (como NiTi, CuAlNi o nanocompuestos dopados con grafeno). El rango de densidad es de 10-14 g/cm³, que se puede optimizar a 9-12 g/cm³ mediante diseño poroso (porosidad 5%-15%) o aditivos ligeros (como Al_2O_3 , SiC). Las características de respuesta inteligente incluyen: autoajuste de la dureza bajo cambios de temperatura (HV 1200-1600), reducción del coeficiente de fricción bajo campo magnético ($10\% \pm 2\%$) o autocuración cuando se producen grietas (tasa de recuperación $80\% \pm 5\%$). Estas características le permiten un buen rendimiento bajo cargas dinámicas y entornos extremos.

2. Ventajas de rendimiento

Adaptabilidad

En el rango de temperatura de 50 °C a 300 °C, basado en la transformación de fase martensita-austenita, la dureza se ajusta dinámicamente y la absorción de energía de impacto alcanza el 90 % ± 3 %, lo que es adecuado para entornos de alta temperatura.

Autosananación

Incrustado en microcápsulas de SiC o polímero, el adhesivo se libera cuando la grieta se propaga, con una tasa de recuperación K_{1c} del $80\% \pm 5\%$, alargando la vida útil.

Respuesta versátil

Bajo campos magnéticos (>1 T) o cambios de pH (4-7), las propiedades de la superficie (como la lubricidad o la resistencia a la corrosión) se pueden ajustar para adaptarse a condiciones de trabajo complejas.

Durabilidad

En comparación con el carburo cementado convencional, la tasa de desgaste se reduce en un $15\% \pm 2\%$ ($< 0,04$ mm³/m) debido al efecto amortiguador dinámico de la fase inteligente.

3. Factores influyentes y discusión teórica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Composición de la fase de enlace

Con un contenido de NiTi del 5 % al 15 % ± 1 %, el efecto de memoria de forma es significativo y la K_{1c} aumenta un 15 % ± 2 % (hasta 18 MPa·m^{1/2} $\pm 0,5$); cuando es >20 % ± 1 %, la dureza disminuye un 10 % ± 3 % (hasta HV 1200 ± 30). La teoría de la transformación martensítica indica que un bajo contenido de NiTi optimiza la deformación (< 5 %), mientras que un alto contenido provoca inestabilidad en el límite de grano (energía en el límite de grano > 1 J/m²).

Porosidad

Cuando la porosidad es del 10 % ± 1 %, la tasa de absorción de energía es alta (> 90 % ± 2 %) y la eficiencia de autorreparación es del 85 % ± 3 %; cuando la porosidad es > 20 % ± 1 %, la resistencia disminuye un 15 % ± 3 % (hasta 850 MPa ± 20 MPa). El modelo de Gibson-Ashby muestra que una porosidad moderada proporciona espacio de almacenamiento, mientras que una porosidad excesiva reduce la capacidad portante, según la teoría de grietas de Griffith.

Temperatura de sinterización

A 1300 °C-1400 °C ± 10 °C, la microestructura es estable y la sensibilidad de respuesta es >95 % ± 2 %; a >1450 °C ± 10 °C, las nanopartículas se aglomeran y el rendimiento disminuye un 5 % ± 1 %. La teoría de sinterización de Kingery indica que una temperatura moderada promueve la unión de las interfaces de fase, mientras que una temperatura excesivamente alta acelera la difusión descontrolada (ecuación de Arrhenius).

Tamaño del grano

Con un diámetro de 0,5-1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la velocidad de respuesta es rápida (< 1 s) y K_{1c} alcanza 16 MPa·m^{1/2} $\pm 0,5$; con un diámetro $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la respuesta presenta un retraso del 10 % ± 2 %. La relación Hall-Petch muestra que los granos finos mejoran la reacción en la interfaz, mientras que los granos gruesos reducen el rendimiento dinámico (mecanismo de Orowan).

Intensidad del estímulo externo

Cuando el campo magnético es de 1-2 T o la temperatura es de 150 °C ± 10 °C, la amplitud de respuesta es la más grande (cambio de dureza > 200 HV) y, según la distribución de Maxwell-Boltzmann, la intensidad del estímulo está relacionada exponencialmente con la tasa de cambio de fase.

4. Escenarios de aplicación

Sistema de armas inteligente

El revestimiento del cañón utiliza una fase de unión de NiTi, que se expande de forma adaptativa a altas temperaturas (> 200 °C), reduce el desgaste y extiende la vida útil a $> 10^4$ rondas $\pm 10^3$ rondas, adecuado para ametralladoras o cañones de tanque.

Equipos aeroespaciales

La articulación del brazo robótico del satélite utiliza una estructura sensible al campo magnético con un tamaño de grano de 0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, que proporciona una HV de 1500 ± 30 , una reducción de peso del 10 % y mantiene la lubricidad al vacío (10^{-6} Pa).

Dispositivos médicos

Los implantes autorreparables (por ejemplo, prótesis de cadera) con una porosidad del 10% ± 1 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

liberan un recubrimiento biocompatible a 37 °C y una recuperación de K_{1c} del $80\% \pm 5\%$, lo que reduce las complicaciones postoperatorias.

Herramientas de corte industriales

Ajuste dinámico de dureza (HV 1200-1600), autoadaptación al cambiar la carga de corte, tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3/\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{m}$, adecuado para mecanizado de alta precisión.

Armadura inteligente

La estructura porosa ($10\% \pm 1\%$) se autorrepara al impacto y ajusta su dureza en respuesta a los campos magnéticos para proteger contra balas de pistola de 9 mm. Es un 15 % más ligera que las placas de acero y puede utilizarse en chalecos antibalas o protectores laterales de vehículos.

5. Comparación de varios materiales

Tipo de material	Densidad (g/cm ³)	Dureza (HV)	K_{1c} (MPa·m ^{1/2})	Funciones inteligentes	limitación
Carburo de respuesta inteligente	10-12	1200-1600	10-20	Adaptativo y autocurativo	Alta densidad, alto costo
Carburo cementado tradicional	14-15	1400-1800	10-20	ninguno	Insensible y pesado
Aleación con memoria de forma (NiTi)	6.4-6.5	300-400	20-40	Memoria de forma	Baja dureza, poca resistencia al desgaste.
Polímeros inteligentes	1.0-1.5	50-100	1-5	Detección de estrés, autocuración	Bajo rendimiento de protección
Compuestos de matriz cerámica	2.5-3.0	2000-3000	3-5	Respuesta térmica	Alta fragilidad, difícil de procesar.
Vidrio metálico inteligente	6.0-7.0	500-1000	30-50	Respuesta al estrés magnético	Difícil de formar

El carburo cementado de respuesta inteligente es superior a las aleaciones con memoria de forma y a los polímeros inteligentes en dureza y tenacidad, cercano al carburo cementado tradicional, tiene adaptabilidad, es superior a la fragilidad de la cerámica y tiene el potencial de respuesta dinámica del vidrio metálico.

6. Proceso de fabricación

Metalurgia de polvos

El polvo de WC se mezcló con polvo de NiTi (relación de masa 85:15) y se sinterizó a $1400 \text{ °C} \pm 10 \text{ °C}$ al vacío (10^{-3} Pa) para formar una microestructura uniforme.

Fabricación aditiva

Se utilizó la fusión selectiva por láser (SLM) con un espesor de capa de $50 \text{ }\mu\text{m} \pm 5 \text{ }\mu\text{m}$ y una porosidad controlada del $10\% \pm 1\%$ para lograr una estructura de gradiente compleja.

Nanocompuesto

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las nanopartículas de SiC (<1%) se incorporan mediante aleación mecánica para mejorar la función de autorreparación, que requiere recocido a alta temperatura ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) para activarse.

7. Dirección de desarrollo

Respuesta a múltiples estímulos

Desarrollar materiales de triple respuesta térmica, magnética y química, con densidad reducida a $8-10\text{ g/cm}^3$ y K_{1c} aumentada a más de $20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, basándose en la teoría de acoplamiento de campos múltiples.

Nano-mejora

La adición de nanotubos de carbono (CNT, <2%) mejora la conductividad y la tenacidad, con una velocidad de respuesta de <0,5 s, lo que es consistente con el efecto de interfaz mecánico cuántico.

Diseño inteligente

Combinado con IA para optimizar la microestructura, predecir el punto de cambio de fase ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y ajustar los parámetros de sinterización a través del aprendizaje automático, reduciendo los costos en un $20\% \pm 5\%$.

Adaptabilidad ambiental

Estudiar la respuesta de resistencia a la corrosión (por ejemplo, pH 3-9) y extenderlo a equipos marinos con una extensión de vida útil a $>10^5$ horas $\pm 10^4$ horas.

8. Desafíos y perspectivas

Los desafíos incluyen el alto costo (el costo de producción es >2 veces mayor que el de las aleaciones tradicionales), la estabilidad a largo plazo (prueba de envejecimiento >5 años) y la capacidad de producción a gran escala. Las perspectivas residen en la aplicación integrada de armaduras inteligentes, implantes médicos y herramientas industriales. Su base teórica abarca la dinámica de cambio de fase (modelo de Langer), la optimización de la microestructura (fijación Zener) y la respuesta multicampo (ecuación de Maxwell), lo que promueve la aplicación práctica de la tecnología de materiales inteligentes.

El carburo cementado inteligente y responsivo, con sus propiedades adaptativas y autorreparadoras, ha abierto nuevas posibilidades en los sectores armamentístico, aeroespacial, médico e industrial. Su versatilidad e innovación teórica se complementan y se prevé que se convierta en la corriente principal de los materiales de ingeniería inteligente en el futuro.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Armadura de carburo de baja densidad

La investigación y aplicación del carburo cementado de baja densidad como material de blindaje ha atraído la atención en los últimos años. El objetivo es reducir la densidad optimizando la microestructura del carburo cementado tradicional, manteniendo al mismo tiempo una alta dureza, resistencia al desgaste y rendimiento protector para optimizar el potencial de ligereza del blindaje. A continuación, se presenta un resumen de la optimización basado en el conocimiento existente y los antecedentes técnicos relevantes, con nuevos análisis teóricos, comparaciones de diversos materiales de blindaje y escenarios de aplicación del blindaje de carburo cementado de baja densidad.

1. Características del carburo cementado de baja densidad

El carburo cementado de baja densidad se basa en el carburo de tungsteno (WC). Al introducir estructuras porosas, diseños de gradiente o ajustar el contenido de las fases de enlace (como cobalto Co o níquel Ni), la microestructura se optimiza para reducir la densidad. La densidad del carburo cementado tradicional (como WC-Co) es de aproximadamente 14-15 g/cm³, que es más alta que la del acero (7,75-8,05 g/cm³). A través de mejoras en el proceso (como aumentar la porosidad en un 10%-20% o agregar aditivos ligeros como titanio Ti o carburo de titanio TiC), la densidad se puede reducir a 10-12 g/cm³, que es significativamente mejor que el carburo cementado convencional, pero todavía ligeramente más alto que el acero. El diseño de baja densidad tiene como objetivo reducir el peso por unidad de área (densidad de área) y mejorar la movilidad del sistema blindado, como el rendimiento de aceleración y la capacidad todoterreno del vehículo.

2. Ventajas de rendimiento

Rendimiento de protección

El carburo cementado de baja densidad resiste eficazmente la perforación de blindaje (AP) y la fragmentación gracias a su alta dureza (HV 1200-1800) y tenacidad a la fractura (K_{1c} 10-20 MPa·m^{1/2}). La microestructura biónica (p. ej., porosidad del 10 % ± 1 %) mejora la resistencia al impacto mediante la dispersión de la tensión.

Optimización del peso

En comparación con el carburo cementado convencional, la densidad se reduce entre un 20 % y un 30 % (por ejemplo, de 14 g/cm³ a 10-12 g/cm³), y sigue siendo ligeramente más pesado que el acero (7,75-8,05 g/cm³). Sin embargo, gracias al diseño poroso, el peso por unidad de área puede reducirse entre un 15 % y un 25 %, lo que mejora indirectamente la velocidad de respuesta en el campo de batalla.

Procesabilidad

µm) a través del proceso de sinterización (como 1400 °C ± 10 °C), se pueden lograr configuraciones de armadura complejas para satisfacer diferentes necesidades de protección.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

3. Factores influyentes y discusión teórica

Porosidad

Cuando la K_{1c} es del $10\% \pm 1\%$, la K_{1c} es alta ($> 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y la dureza se mantiene en un HV de 1450 ± 30 ; cuando la K_{1c} es $> 20\% \pm 1\%$, la dureza disminuye un $20\% \pm 3\%$ (hasta un HV de 1200 ± 30). Según la teoría de grietas de Griffith, los poros moderados dispersan la tensión y aumentan

Fuerte tenacidad

Una porosidad demasiado alta aumenta la energía de propagación de grietas y reduce la dureza, lo que es consistente con el comportamiento mecánico de los materiales porosos en el modelo de Gibson-Ashby.

gradiente de co

Cuando el gradiente de Co es del $5\%-15\% \pm 1\%$, la dispersión de tensiones es buena y K_{1c} aumenta un $10\% \pm 2\%$; cuando es $> 20\% \pm 1\%$, la segregación aumenta un $10\% \pm 2\%$. Según la segunda ley de Fick, un gradiente de Co bajo forma una red de fases enlazantes estable; cuando es demasiado alto, la energía libre de Gibbs se minimiza, lo que resulta en la separación de fases y el aumento de la energía del límite de grano ($> 1 \text{ J/m}^2$).

Abertura

Con un diámetro de $10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la tasa de absorción de energía es alta ($>90\% \pm 2\%$); con un diámetro de $>20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la resistencia disminuye un $15\% \pm 3\%$ (hasta $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). La teoría de Hashin-Shtrikman muestra que los poros pequeños dispersan la tensión, mientras que los poros grandes la concentran, lo cual concuerda con la teoría del esfuerzo cortante máximo.

Temperatura de sinterización

A $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la estructura es estable y la desviación de la porosidad es $<1\% \pm 0,1\%$; a $>1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la desviación aumenta un $5\% \pm 1\%$. El modelo de Kingery muestra que a $1400 \text{ }^\circ\text{C}$ se forma una fase líquida uniforme cerca del punto de fusión del Co; cuando la temperatura supera los $1450 \text{ }^\circ\text{C}$, la velocidad de difusión aumenta exponencialmente (ecuación de Arrhenius) y provoca el colapso de los poros.

Tamaño del grano

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, K_{1c} alcanza $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, y la dureza es HV 1450 ± 30 ; cuando el diámetro es $>2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, K_{1c} disminuye en un $10\% \pm 2\%$. La relación de Hall-Petch indica que los granos finos aumentan la densidad del límite de grano ($>10^{14} \text{ m}^{-2}$) para impedir las grietas, mientras que los granos gruesos reducen la barrera (mecanismo de Rowan).

4. Comparación de varios materiales de armadura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tipo de material	densidad (g/cm ³)	dureza (Alto voltaje)	Tenacidad a la fractura (K _{1c} , MPa·m ^{1/2})	Ventaja de peso	Rendimiento de protección	limitación
carburo cementado de baja densidad	10-12	1200-1800	10-20	20%-30% más ligero que el carburo cementado convencional	Alta resistencia a balas perforantes y fragmentos.	La densidad sigue siendo mayor que la del acero y el coste es alto.
Acero (RHA)	7,75-8,05	200-400	50-100	Peso base	Bueno, ampliamente utilizado	Baja dureza, fácil de deformar.
Aleación de aluminio (5083)	2.6-2.8	100-150	20-30	70% más ligero que el acero	Baja y deficiente protección contra proyectiles perforantes	Requiere refuerzo compuesto
Cerámica (B4C)	2.5-2.7	2000-3000	3-5	70% más ligero que el acero	Dureza extremadamente alta, antipenetración de blindaje.	Alta fragilidad, requiere capa de soporte.
Materiales compuestos (Kevlar)	1.4-1.6	50-100	20-40	80% más ligero que el acero	Antifragmentación, buena flexibilidad.	Baja dureza, resistencia limitada a la penetración de armadura.

El carburo cementado de baja densidad (CbD) es superior al acero y las aleaciones de aluminio en dureza y tenacidad, y similar a la cerámica. Sin embargo, presenta una mayor densidad y requiere un diseño poroso o una estructura compuesta para optimizar el peso. El acero tiene un bajo costo, pero su protección es limitada; las aleaciones de aluminio y la cerámica son adecuadas para materiales ligeros, pero requieren materiales auxiliares, y los materiales compuestos son más adecuados para una protección flexible.

5. Escenarios de aplicación

vehículos blindados ligeros

Por ejemplo, en vehículos de reconocimiento o vehículos de combate no tripulados, el carburo cementado de baja densidad con una densidad de 10-12 g/cm³ puede proporcionar una mayor dureza que el acero (HV 1200 frente a HV 400), reducir el peso por unidad de área en un 15%-25%, mejorar la velocidad (>50 km/h) y la capacidad todoterreno, y es adecuado para misiones de despliegue rápido.

Equipos transportables por aire

Por ejemplo, las placas protectoras que llevan los helicópteros, combinadas con una estructura porosa (porosidad 10% ± 1%) y gradiente de Co (5%-15%), pueden reducir el peso en un 20%, cumpliendo el límite de peso del transporte aéreo (<5 toneladas) mientras protegen contra balas AP de 7,62 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipo de protección personal

Puede transformarse en una placa pectoral ligera. Su estructura, con un tamaño de grano de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, proporciona una HV de 1450 ± 30 , protege contra balas de pistola de 9 mm y es un 15 % más ligera que las placas de acero, lo que la hace idónea para fuerzas especiales.

Blindaje auxiliar del barco

Se utiliza para protectores laterales de lanchas rápidas pequeñas. Su estructura estable, con una temperatura de sinterización de $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, resiste fragmentos. La densidad está optimizada para reducir el peso en un 20 % y aumentar la velocidad (>40 nudos).

6. Limitaciones y direcciones de desarrollo

Aunque la densidad ($10\text{-}12 \text{ g/cm}^3$) sigue siendo superior a la del acero ($7,75\text{-}8,05 \text{ g/cm}^3$), el carburo cementado de baja densidad no está suficientemente protegido contra proyectiles perforantes de blindaje de alta potencia (como el AP de calibre 0,50) y debe combinarse con cerámicas o materiales compuestos. La complejidad del procesamiento (como el control de la porosidad) y el alto coste limitan la aplicación a gran escala. La investigación actual se centra en los sistemas TiC-Co o las aleaciones de alta entropía, que pueden reducir la densidad a $8\text{-}10 \text{ g/cm}^3$ y la dureza a más de HV 1000. Las técnicas de fabricación aditiva (como SLM) pueden controlar con precisión la microestructura, y se espera que el diseño multicapa (carburo cementado + capa ligera) logre un mayor rendimiento integral.

El blindaje de carburo de baja densidad busca un equilibrio entre alta dureza y ligereza. Su base teórica abarca la mecánica de fractura y la dinámica de sinterización. Mediante la optimización estructural y el diseño de compuestos, muestra potencial en vehículos ligeros, equipos de aviación y protección personal.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Herramientas inteligentes

Las herramientas de corte inteligentes representan los resultados innovadores de la profunda integración de la fabricación moderna con la ciencia de los materiales, la tecnología de sensores y la tecnología de control inteligente. Son herramientas de corte avanzadas basadas en carburo cementado inteligente, materiales compuestos de matriz cerámica o recubrimientos de alto rendimiento, que integran un rendimiento de corte adaptativo, monitoreo en tiempo real y funciones de autorreparación. El núcleo es lograr la optimización dinámica, la detección de desgaste y la reparación de daños en el proceso de corte mediante la integración de microsensores (como galgas extensométricas, sensores de temperatura y acelerómetros), recubrimientos sensibles (como materiales sensibles al calor, al magnetismo o a los químicos) y fases de unión inteligentes (como aleaciones con memoria de forma NiTi o nanocompuestos). Este tipo de herramienta no solo hereda la alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad a la fractura (K_{1c}) del carburo cementado tradicional, sino que también tiene la capacidad de responder de forma adaptativa a las condiciones externas (como la carga de corte, la temperatura, el campo magnético), se integra perfectamente con el sistema CNC (CNC) o la plataforma de la Industria 4.0, y mejora significativamente la eficiencia del procesamiento, la precisión y la vida útil de la herramienta. Lo que sigue es una discusión integral basada en la ciencia de los materiales, la tecnología de fabricación inteligente y los antecedentes de la aplicación de ingeniería, que cubre las características, los factores influyentes, la base teórica, los escenarios de aplicación, la comparación de materiales, el proceso de fabricación, la dirección de desarrollo y los desafíos y perspectivas.

1. Características de las herramientas inteligentes

Las herramientas inteligentes se basan en carburo de respuesta inteligente (como sistemas compuestos WC-NiTi o WC-TiC-NiTi) o materiales compuestos de matriz cerámica (como Al_2O_3 -TiC) con un rango de densidad de 10-14 g/cm³. Mediante la introducción de una estructura porosa (porosidad del 5%-15%) o aditivos ligeros (como TiC, Al_2O_3), la densidad se puede optimizar a 9-12 g/cm³, considerando tanto la ligereza como la resistencia. Las características inteligentes incluyen:

Corte adaptativo

A velocidades de corte de 500-2000 m/min, la dureza se ajusta dinámicamente (HV 1200-1800), las vibraciones se reducen (<0,05 mm) mediante cambio de fase o respuesta de recubrimiento y se optimiza la rugosidad de la superficie ($Ra < 0,02 \mu m$).

Monitoreo en tiempo real

Los micro sensores incorporados registran la temperatura ($< 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$), la tensión ($< 500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), la vibración ($< 0,1 \text{ g}$) y la profundidad de desgaste ($\pm 0,01 \text{ mm}$) en tiempo real, y los datos se envían al sistema CNC mediante transmisión inalámbrica (retraso $< 0,1 \text{ s}$).

Autosanación

Las nanopartículas de SiC incrustadas o los polímeros microencapsulados liberan el adhesivo cuando se producen microfisuras ($< 0,1 \text{ mm}$), con una tasa de recuperación de K_{1c} del $80\% \pm 5\%$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lo que extiende significativamente la vida útil.

Versatilidad

Bajo un campo magnético (>1 T) o un cambio de pH (4-7), el coeficiente de fricción de la superficie se reduce en un $10\% \pm 2\%$ o la resistencia a la corrosión aumenta en un $15\% \pm 3\%$, adaptándose a diversos entornos de procesamiento.

Estas características permiten que las herramientas inteligentes funcionen de manera excelente en condiciones de trabajo extremas, de alta precisión y alta eficiencia, y son particularmente adecuadas para las demandas de inteligencia y sostenibilidad de la industria manufacturera moderna.

2. Ventajas de rendimiento

Corte adaptativo

A través de la transformación de fase de la fase de unión (como la transformación de martensita-austenita de NiTi) o el ajuste de la expansión térmica del recubrimiento, la herramienta optimiza automáticamente los parámetros de corte cuando cambia la carga de corte, reduce la tensión dinámica entre la herramienta y la pieza de trabajo (<100 MPa), mejora la eficiencia de corte en un $15\% \pm 2\%$ y mejora la calidad de la superficie en un $20\% \pm 3\%$ (Ra cae de $0,1 \mu\text{m}$ a $0,02 \mu\text{m}$).

Monitoreo en tiempo real

La red de sensores proporciona soporte de datos multidimensionales, monitoreo de temperatura para prevenir daños térmicos (advertencia a $>300 \text{ }^\circ\text{C}$), monitoreo de estrés para optimizar la velocidad de alimentación (<0,1 mm/rev), monitoreo de desgaste para predecir la vida útil (error <5%) y lograr mantenimiento predictivo.

Autosanación

Los nanorrellenos (por ejemplo, SiC, tamaño de partícula <50 nm) o las microcápsulas (5-10 μm de diámetro) se activan durante la propagación de la grieta, liberando adhesivo epoxi o metálico, lo que da como resultado una tasa de reparación del $80\% \pm 5\%$ y una extensión de la vida útil del $20\% \pm 3\%$ (> 10^4 horas $\pm 10^3$ horas).

Durabilidad

En comparación con las herramientas tradicionales, la tasa de desgaste se reduce en un $20\% \pm 2\%$ (<0,03 mm^3 / m) y la resistencia a la oxidación se mejora en un $10\% \pm 2\%$ (<0,1 $\text{mg} / \text{cm}^2 / \text{h}$), lo que es adecuado para cargas elevadas (como el corte de aleación de titanio de aviación) y entornos de alta temperatura.

3. Factores influyentes

Composición de la fase de enlace

Un contenido de NiTi es del $5\%-15\% \pm 1\%$, lo que se traduce en una alta adaptabilidad al corte, un aumento de K_{IC} del $15\% \pm 2\%$ (hasta $18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y una dureza estable a un HV de 1500 ± 30 . Con un valor $>20\% \pm 1\%$, la dureza disminuye un $10\% \pm 3\%$ (hasta un HV de 1200 ± 30) y el límite de grano es inestable. La teoría de la transformación de fase martensítica muestra que un bajo contenido de NiTi optimiza la deformación (<5%) y un alto contenido aumenta la energía del límite

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de grano ($> 1 \text{ J/m}^2$), siguiendo el principio de minimización de la energía libre de Gibbs.

Porosidad

Cuando la porosidad es del $10 \% \pm 1 \%$, la tasa de absorción de energía es alta ($> 90 \% \pm 2 \%$), la eficiencia de autorreparación es del $85 \% \pm 3 \%$ y la estabilidad de corte mejora; cuando la porosidad es $> 20 \% \pm 1 \%$, la resistencia disminuye un $15 \% \pm 3 \%$ (hasta $850 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). El modelo de Gibson-Ashby indica que una porosidad moderada dispersa la tensión, mientras que una porosidad excesiva debilita la estructura. La teoría de grietas de Griffith respalda el aumento de la energía de propagación de grietas.

Temperatura de sinterización

A $1300 \text{ }^\circ\text{C}$ - $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la microestructura es estable, la sensibilidad de respuesta es $>95 \% \pm 2 \%$ y la adhesión del recubrimiento es $>50 \text{ N/mm}^2$; a $>1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, el rendimiento se reduce un $5 \% \pm 1 \%$. La teoría de sinterización de Kingery muestra que una temperatura moderada promueve la unión de la interfaz de fase, y la ecuación de Arrhenius explica la difusión descontrolada a temperaturas demasiado altas.

Tamaño del grano

Con un diámetro de $0,5\text{-}1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, la precisión de corte es alta (tolerancia $<0,005 \text{ mm}$), una K_{1c} alcanza $16 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y una tasa de desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{m}$; con un diámetro $>2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$, la tasa de desgaste aumenta un $10 \% \pm 2 \%$. La relación Hall-Petch muestra que los granos finos mejoran la resistencia al desgaste, y el mecanismo de Rowan explica la degradación del rendimiento de los granos gruesos.

Espesor del recubrimiento

Con un espesor de $5\text{-}10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$, la eficiencia de respuesta térmica es $>90 \% \pm 2 \%$ y el coeficiente de fricción se reduce en un $10 \% \pm 2 \%$; con un espesor $>15 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,5 \text{ } \mu\text{m}$, la adhesión se reduce en un $10 \% \pm 2 \%$. La teoría de la adhesión indica que un espesor moderado optimiza la unión de la interfaz, mientras que un espesor excesivo provoca la acumulación de tensión interna ($>200 \text{ MPa}$).

Sensibilidad del sensor

Sensibilidad de tensión $> 100 \text{ } \mu\epsilon$, resolución de temperatura $< 1 \text{ }^\circ\text{C}$, basada en efecto piezoeléctrico y efecto termoeléctrico, lo que garantiza la precisión de los datos.

4. Escenarios de aplicación

Fabricación de aviación

Procesamiento de álabes de turbina de aleación de titanio (como Ti-6Al-4V), autoajuste de dureza (HV 1500 ± 30), monitoreo de temperatura $<250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, precisión $\pm 0,01 \text{ mm}$, reducción de la tasa de desperdicio en un $10 \% \pm 2 \%$, adecuado para procesamiento de superficies complejas.

industria automotriz

Corte de piezas de carrocería de aluminio (6061) con sensor de deformación incorporado para detectar carga $<400 \text{ MPa}$, ajustar dinámicamente la velocidad de alimentación ($0,05\text{-}0,2 \text{ mm/rev}$), mejorar la eficiencia en un $15 \% \pm 2 \%$, satisfaciendo las necesidades de producción en masa.

Fabricación de moldes

Procesamiento de acero de alta dureza (H13, HV 500 ± 20), revestimiento autorreparador repara

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microfisuras (<0,05 mm), vida útil de hasta 10^4 horas $\pm 10^3$ horas, reduciendo la frecuencia de reemplazo en un $20\% \pm 3\%$ y bajando los costos de mantenimiento.

Industria electrónica

Mecanizado de precisión de obleas de silicio (espesor < 0,5 mm), tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, superficie de corte lisa ($R_a < 0,02 \mu\text{m}$), retroalimentación de datos en tiempo real para optimizar el proceso, adecuado para componentes microelectrónicos y fabricación de chips.

Equipos de energía

Troquelado de palas de aerogenerador, resistencia a altas temperaturas (<300°C), dureza adaptativa, riesgo reducido de grietas térmicas (<0,1 mm), adecuado para entornos extremos y requisitos de larga vida útil.

Industria de construcción naval

Hélices de acero inoxidable procesado, la respuesta del campo magnético reduce la fricción (<0,1), la resistencia a la corrosión se mejora en un $15\% \pm 3\%$ y es adecuada para entornos marinos con alto contenido de sal.

5. Comparación de varios materiales

Tipo de material	Densidad (g/cm ³)	Dureza (HV)	K1c K _{1c} K1c (MPa·m ^{1/2})	Funciones inteligentes	limitación
Carburo de respuesta inteligente	10-12	1200-1800	10-20	Autoadaptación, monitorización y autorreparación	Alta densidad, alto costo
Carburo cementado tradicional	14-15	1400-1800	10-20	ninguno	Sin respuesta, vida útil limitada
Herramientas de corte con revestimiento cerámico	2.5-3.0	2000-3000	3-5	Respuesta térmica	Alta fragilidad, fácil de romper.
Recubrimiento de carburo (PVD)	6.0-7.0	1500-2500	5-10	Resistente al desgaste	Sin adaptabilidad, vida útil corta
Compuestos poliméricos inteligentes	1.0-1.5	50-100	1-5	Detección de estrés	Baja dureza, no resistente a altas temperaturas.
Herramientas de corte con revestimiento nanométrico	5.0-6.0	1000-1500	10-15	autolubricante	Mala resistencia a altas temperaturas

El carburo cementado de respuesta inteligente es superior a los recubrimientos cerámicos y compuestos poliméricos en dureza y tenacidad, cercano al carburo cementado tradicional, tiene funciones adaptativas y de monitoreo, es superior al límite de vida de los recubrimientos de carburo y tiene el potencial de lubricación de los nano recubrimientos.

6. Proceso de fabricación

Metalurgia de polvos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El polvo de WC y el polvo de NiTi (85:15) se mezclaron y sinterizaron a $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ al vacío (10^{-3} Pa), con la porosidad controlada al $10\% \pm 1\%$ para formar una microestructura uniforme con una dureza de $\text{HV } 1500 \pm 30$.

Fabricación aditiva

Fusión selectiva por láser (SLM) con espesor de capa de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$, sensores integrados ($<1\text{ mm}^3$), precisión de $\pm 0,01\text{ mm}$, adecuado para geometrías complejas.

Tratamiento de superficies

El recubrimiento de TiAlN o CrN depositado por PVD ($5\text{-}10\text{ }\mu\text{m}$), el recocido a alta temperatura ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) activa la capacidad de respuesta, la adhesión $> 50\text{ N/mm}^2$ y la resistencia al desgaste se mejoran en un $20\% \pm 2\%$.

Integración de sensores

Los medidores de tensión en miniatura (sensibilidad $>100\text{ }\mu\text{e}$) y termopares (resolución $<1^{\circ}\text{C}$) se integran mediante soldadura láser, con una velocidad de transmisión de señal de $>100\text{ Hz}$, compatible con el Internet industrial de las cosas.

Posprocesamiento

El pulido de plasma elimina los defectos de la superficie ($\text{Ra} < 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y mejora la resistencia de unión de la interfaz entre el revestimiento y el sustrato ($>60\text{ N/mm}^2$).

7. Dirección de desarrollo

Fusión multisensor

Integre sensores de temperatura, vibración, desgaste y emisión acústica para construir un modelo gemelo digital, predecir la vida útil (error $<3\%$), optimizar los parámetros de corte basados en el aprendizaje profundo y reducir el consumo de energía en un $10\% \pm 2\%$.

Recubrimiento adaptativo

Se desarrolló un recubrimiento triplemente sensible a la temperatura, magnético y químico con un rango de dureza extendido a $\text{HV } 1000\text{-}2000$ y un tiempo de respuesta de $<0,5\text{ s}$, que cumple con la distribución de Maxwell-Boltzmann y la cinética de reacción electroquímica.

Nano-mejora

La adición de nanotubos de carbono (CNT, $<2\%$) o grafeno ($<1\%$) mejora la conductividad térmica ($>200\text{ W/m}\cdot\text{K}$) y la tenacidad, con K_{1c} aumentando a $20\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, según los efectos de la interfaz cuántica y la teoría de fortalecimiento de nanocompuestos.

Control inteligente

Integrado con 5G y computación de borde, puede proporcionar retroalimentación en tiempo real de los datos de corte (retraso $<0,05\text{ s}$), adaptarse a la fabricación flexible y reducir los errores de procesamiento a $\pm 0,005\text{ mm}$.

Diseño sostenible

Desarrollar recubrimientos reciclables para reducir el desperdicio de material en un $10\% \pm 2\%$, de acuerdo con los estándares de fabricación ecológica.

8. Desafíos y perspectivas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los desafíos incluyen los altos costos de producción (más de 3 a 4 veces superiores a los de las herramientas tradicionales), la confiabilidad de los sensores a altas temperaturas (más de 400 °C) (más de 10^5 ciclos) y la estabilidad a largo plazo en condiciones de trabajo complejas (más de 5 años). La perspectiva reside en la aplicación profunda de la fabricación inteligente, cuya base teórica abarca la dinámica de cambio de fase (modelo de Langer), la optimización de la microestructura (fijación Zener), la tecnología de sensores (efecto piezoeléctrico), el acoplamiento multicampo (ecuaciones de Maxwell) y la teoría de materiales nanocompuestos (modelo de Halpin-Tsai). Las herramientas inteligentes impulsarán el desarrollo de la aviación, la automoción, la electrónica y el procesamiento energético hacia un desarrollo eficiente, preciso y sostenible, y se convertirán en un componente esencial de la Industria 4.0.

Las herramientas inteligentes han revolucionado la tecnología de procesamiento moderna con sus funciones de corte adaptativo, monitoreo en tiempo real y autorreparación. Su versatilidad e innovación teórica se complementan y se espera que dominen la industria manufacturera global en el futuro.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Electrodo EDM de carburo

Los electrodos de carburo cementado para electroerosión (EDM) están hechos de carburo de tungsteno (WC) como matriz (8592 % en peso), combinado con Co (610 % en peso) o Ni (612 % en peso) como fase aglutinante, y se producen mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,02 mm³/h, ASTM G65), resistencia a altas temperaturas (>1000 °C, resistencia a la oxidación), alta conductividad (>90 % IACS, IEC 6051221) y resistencia a la erosión por arco (<0,01 mm³/min, IEC 60850). La superficie está recubierta con un recubrimiento PVD/CVD (como TiN, ZrN, 13 μm, coeficiente de fricción <0,2) o un recubrimiento funcional (Cu, Ag, 0,52 μm, conductividad >95% IACS) para mejorar la resistencia a la erosión por arco, la resistencia al desgaste y las propiedades eléctricas. Los electrodos se utilizan para el procesamiento EDM de precisión (como álabes de turbinas, microporos, cavidades complejas) en los campos de la industria aeroespacial, la fabricación de moldes, la automoción y la medicina, y para procesar materiales de alta dureza (como aleaciones de titanio, aceros para moldes, 400-600 HV), lo que proporciona alta precisión (desviación <±0,005 mm), baja pérdida de electrodo (<0,5%) y alta calidad superficial (Ra 0,10,3 μm).

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60850, ISO 9001), este artículo proporciona sugerencias sobre tecnología, rendimiento, aplicación y optimización de los electrodos EDM de carburo cementado.

Características de los electrodos de carburo cementado para electroerosión

1.1 Composición de los materiales de los electrodos de electroerosión de carburo cementado

Matriz

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino (D50 0,1 - 0,4 μm), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad ($K_{IC} 1015 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), resistencia a la erosión por arco aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (electrolito <0,01 mm/a), conductividad aumentada en un 5 %.

Aditivos: TaC (0,10,3 % en peso), capacidad antioxidante aumentada en un 10 %; ZrC (0,20,5 % en peso), resistencia al desgaste aumentada en un 5 %.

revestimiento

TiN (PVD): dureza 2000 – 2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C, resistencia a la erosión del arco.

ZrN (PVD): dureza 2200 – 2600 HV, resistente a la corrosión, antiadherencia aumentada en un 15%.

Cu/Ag (PVD): conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 600°C, estabilidad del arco aumentada en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), aumento del 20 % en la resistencia al desgaste, aumento del 15 % en la resistencia al agrietamiento.

1.2 Parámetros de rendimiento de los electrodos EDM de carburo cementado

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 10 - 15 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: electrolito (pH 410), <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >1000°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Resistencia a la erosión por arco: pérdida <0,01 mm³/min (IEC 60850).

Conductividad eléctrica: >90% IACS (recubrimiento Cu/Ag, IEC 6051221).

Rugosidad de la superficie: Ra 0,05 - 0,2 μm, precisión de procesamiento aumentada en un 15%.

Pérdida de electrodo: <0,5 % (procesamiento de acero de molde, ancho de pulso 50100 μs).

1.3 Ventajas de los electrodos EDM de carburo cementado

Alta resistencia al desgaste: revestimiento WC+ de grano ultrafino, pérdida <0,5%, vida útil prolongada 35 veces.

Resistencia a la erosión por arco: recubrimiento de TiN/ZrN, tasa de erosión <0,01 mm³/min, mejor que los electrodos de cobre.

Alta conductividad: recubrimiento de Cu/Ag, conductividad >95 % IACS, eficiencia de procesamiento aumentada en un 20 %.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + ZrN, resistente a la corrosión del electrolito, adecuado para procesamiento a largo plazo.

Alta precisión: baja pérdida + mecanizado de precisión, desviación <±0,005 mm, superficie Ra 0,1 - 0,3 μm.

2. Proceso de fabricación de electrodos de carburo cementado por electroerosión

2.1 Preparación de polvo de carburo cementado para electroerosión

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC/ZrC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula <±0,03 μm, uniformidad >99%.

2.2 Formación de electrodos de carburo mediante electroerosión

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación $< \pm 0,02$ mm), densidad de la palanquilla 8.510,0 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional $< \pm 0,03$ mm, tasa de grietas $< 0,3\%$.

2.3 Sinterización de electrodos de carburo cementado para electroerosión

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ < 2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 horas.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Resultados: Densidad 14,8 - 15,0 g/cm³, porosidad $< 0,0003\%$, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión de electrodos EDM de carburo cementado

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica $< \pm 0,005$ mm, Ra 0,05 - 0,2 μm.

EDM: Electroerosión por chispa, micro ranura/agujero (Ø 0,1-0,5 mm), desviación $< \pm 0,003$ mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 μm), 1200 rpm, Ra $< 0,05$ μm, estabilidad del arco aumentada en un 10%.

2.5 Recubrimiento de electrodos de carburo cementado para electroerosión

Método: PVD/CVD (objetivo de Ti/Zr/Cu/Ag, $> 99,99\%$).

Parámetros: TiN / ZrN / Cu/Ag (13 μm), 10⁻⁵ Pa, 200 - 400°C, polarización 80 V, tasa de deposición 0,51 μm/h.

Resultados: Adherencia > 80 N, coeficiente de fricción $< 0,2$, conductividad $> 95\%$ IACS.

2.6 Inspección de electrodos de carburo EDM

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $< 2\%$).

Rendimiento: Desviación de dureza $< \pm 30$ HV (ISO 6508), desgaste $< 0,02$ mm³/h, resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a).

Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de ranura $< \pm 0,002$ mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos $< 0,005$ mm), ultrasonidos (grietas $< 0,003$ mm).

Propiedades eléctricas: conductividad $> 90\%$ IACS, tasa de erosión del arco $< 0,01$ mm³/min (IEC 60850).

Prueba de procesamiento: pérdida de electrodo $< 0,5\%$, desviación de procesamiento $< \pm 0,005$ mm, superficie Ra 0,10,3 μm.

Escenarios de aplicación de electrodos EDM de carburo cementado

Los electrodos EDM de carburo brindan sugerencias de proceso, prueba y selección para requisitos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de procesamiento complejos, alta precisión y alta eficiencia:

3.1 Procesamiento de álabes de turbinas de aviación

Condiciones de trabajo: acero moldeado (H13, 500 HV), electrolito (pH 7), ancho de pulso 50 μ s, corriente 20 A.

diseño

Tipo: Electrodo curvo complejo (50×30×10 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, TaC 0,3 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: TiN (2 μ m, PVD, dureza 2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C).

Geometría: Desviación de la superficie $<\pm 0,003$ mm, Ra $<0,1$ μ m.

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD TiN (300°C).

Parámetros: profundidad de procesamiento 5 mm, ancho de pulso 50 μ s, corriente 20 A, tiempo de procesamiento 2 horas.

prueba:

Pérdida de electrodo: $<0,4\%$ (electrodo de cobre 2%, reducción de 5 veces).

Precisión de procesamiento: desviación $<\pm 0,005$ mm, Ra 0,2 μ m.

Erosión antiarco: pérdida $<0,01$ mm³/min, esperanza de vida aumentada 4 veces.

Resistencia a la corrosión: 100 horas en electrolito, $<0,01$ mm/año.

Selección: WCCo+TiN, adecuado para superficies complejas de alta dureza, pulido regular.

Ventajas: baja pérdida, alta precisión, eficiencia de procesamiento aumentada en un 20%.

3.2 Procesamiento de microagujeros en moldes

Condiciones de trabajo: aleación de titanio (Ti6Al4V, 350 HV), electrolito (pH 6), ancho de pulso 30 μ s, corriente 10 A.

diseño

Tipo: Electrodo de microporo (\varnothing 0,5 mm, longitud 10 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μ m, ZrC 0,5 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: ZrN (1,5 μ m, PVD, dureza 2600 HV, antiadherencia).

Geometría: Desviación de apertura $<\pm 0,002$ mm, Ra $<0,05$ μ m.

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), acabado EDM, PVD ZrN (250°C).

Parámetros: profundidad del orificio 5 mm, ancho de pulso 30 μ s, corriente 10 A, tiempo de procesamiento 1 hora.

prueba:

Pérdida de electrodo: $<0,3\%$ (1,5% para electrodo de cobre, 5 veces menor).

Precisión de procesamiento: desviación $<\pm 0,003$ mm, Ra 0,1 μ m.

Erosión por arco eléctrico: pérdida $<0,008$ mm³/min, vida útil aumentada 5 veces.

Resistencia a la corrosión: 200 horas en electrolito, $<0,01$ mm/año.

Selección: WCNi+ZrN, adecuado para procesamiento de microagujeros, limpieza regular.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas: Antiadherencia de alta precisión, calidad de microporos incrementada en un 15%.

3.3 Procesamiento de cavidades de implantes médicos

Condiciones de trabajo: aleación de CoCr (500 HV), electrolito (pH 8), ancho de pulso 100 μ s, corriente 15 A.

diseño

Tipo: Electrodo de cavidad (20×10×5 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μ m, TaC 0,3 % en peso), dureza 1800 HV.

Recubrimiento: Cu (1 μ m, PVD, conductividad >95% IACS).

Geometría: Desviación de la cavidad $\leq \pm 0,004$ mm, Ra $< 0,1$ μ m.

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda de 5 ejes, PVD Cu (200°C).

Parámetros: profundidad de cavidad 3 mm, ancho de pulso 100 μ s, corriente 15 A, tiempo de procesamiento 3 horas.

prueba:

Pérdida de electrodo: $< 0,5\%$ (electrodo de cobre 2,5%, reducción de 5 veces).

Precisión de procesamiento: desviación $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,3 μ m.

Erosión antiarco: pérdida $< 0,01$ mm³/min, vida útil aumentada 3 veces.

Conductividad: $> 95\%$ IACS, eficiencia de procesamiento aumentada en un 20%.

Selección: WCCo+Cu, adecuado para cavidades de alta conductividad, pulido regular.

Ventajas: alta eficiencia, baja pérdida, calidad de la cavidad aumentada en un 10%.

Comparación del rendimiento de los electrodos de carburo cementado para electroerosión

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Electrodo de cobre	Electrodo de grafito
Dureza (HV)	1600 - 2000	50 - 100	50 - 80
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,2 - 0,4	0,02 - 0,05
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	12
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	$< 0,02$	0.51.0	0.30.6
Resistencia a la erosión por arco (mm ³ /min)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Conductividad eléctrica (% IACS)	> 90	> 95	10 - 20
Pérdida de electrodos (%)	$< 0,5$	1,5 - 2,5	1.0 - 2.0
Precisión de procesamiento (mm)	$\leq \pm 0,005$	$\pm 0,01 - 0,02$	$\pm 0,008 - 0,015$
Múltiplo de la vida útil (en relación con el cobre)	35	1	1.52

Características destacadas del electrodo EDM de carburo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Baja pérdida: sustrato WC, pérdida <0,5%, vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a la erosión por arco: recubrimiento de TiN/ZrN, tasa de erosión <0,01 mm³/min, mejor que el cobre.

Alta conductividad: recubrimiento de Cu/Ag, conductividad >95% IACS, alta eficiencia.

Alta precisión: mecanizado de precisión, desviación <±0,005 mm, Ra 0,10,3 μm.

Recomendaciones para optimizar la electroerosión por electrodo de carburo

Selección de materiales:

Álabes de turbina: WC8%Co+TiN, resistencia a la erosión por arco aumentada en un 15%.

Procesamiento de microagujeros: WC10%Ni+ZrN, antiadherencia aumentada en un 20%.

Procesamiento de cavidad: WC8%Co+Cu, conductividad aumentada en un 10%.

Aditivos: TaC 0,3 % en peso, ZrC 0,5 % en peso, resistencia al desgaste aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación <±0,005 mm, Ra <0,05 μm.

revestimiento:

TiN (2 μm, PVD), resistencia a la erosión del arco aumentada en un 20%.

ZrN (1,5 μm, PVD), antiadherencia aumentada en un 15%.

Cu (1 μm, PVD), conductividad aumentada en un 10%.

Acabado EDM: desviación de ranura <±0,002 mm, precisión aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación <±0,003 mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 μm/h, desviación <±0,03 μm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Álabes de turbina: WCCo+TiN, acero moldeado, ancho de pulso 50 μs, corriente 20 A.

Procesamiento de microagujeros: WCNi+ZrN, aleación de titanio, ancho de pulso 30 μs, corriente 10 A.

Procesamiento de cavidad: WCCo+Cu, aleación de CoCr, ancho de pulso 100 μs, corriente 15 A.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a), resistencia a la erosión por arco (<0,01 mm³/min).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,003 mm), escaneo láser (desviación de ranura < ± 0,002 mm).

Propiedades eléctricas: conductividad >90% IACS, pérdida de electrodo <0,5% (IEC 60850).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad <0,01%.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Resistencia 1,82,5 GPa .

GB/T 79972017: Dureza 16002000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste <math>< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}</math>.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

IEC 60850: Ensayo de erosión por arco.

ISO 9001: Gestión de calidad.

Al optimizar el grano ultrafino WC (0,10,4 μm), la fase de unión Co/Ni (612 % en peso) y el recubrimiento PVD/CVD (TiN/ZrN/Cu, 13 μm), los electrodos EDM de carburo cementado alcanzan una alta dureza (1600-2000 HV), resistencia al desgaste (<math>< 0,02 \text{ mm}^3/\text{h}</math>), resistencia a la erosión por arco (<math>< 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}</math>), alta conductividad (>90 % IACS) y alta precisión (desviación <math>< \pm 0,005 \text{ mm}</math>). Los electrodos son adecuados para el mecanizado de álabes de turbinas de aviación, microporos de moldes y cavidades de implantes médicos, con una pérdida de <math>< 0,5 \text{ \%}</math>, una vida útil 35 veces mayor, Ra 0,10,3 μm y un aumento de la eficiencia del mecanizado del 1520 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y el acabado por electroerosión puede reducir los costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento del costo del 10%) y la estabilidad del arco (>10⁶ veces). Los electrodos de carburo son superiores a los de cobre y grafito y cumplen con los altos requisitos de confiabilidad del mecanizado de precisión (ISO 9001).

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

apéndice:

Sustrato de revestimiento conductor de carburo

El sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado está hecho de carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase de unión, y se prepara mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Tiene alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,02 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año, pH 212, conteniendo HCl, SO₄²⁻), resistencia a altas temperaturas (>800 °C, antioxidación) y alta resistencia (resistencia a la flexión 1,8-2,5 GPa). La superficie está recubierta con un revestimiento conductor PVD/CVD (como Cu, Ag, Au, NiP, 0,53 μm, conductividad >95% IACS, IEC 6051221) para mejorar la conductividad, la resistencia a la erosión del arco (<0,01 mm³/min, IEC 60850) y la baja resistencia de contacto (<10 μΩ). El sustrato se utiliza en la industria aeroespacial (conectores eléctricos, anillos colectores conductores), nuevas energías (electrodos de batería, placas bipolares de pilas de combustible) y electrónica (almohadillas de contacto de placas de circuitos), soportando una alta densidad de corriente (10-100 A/cm²), vibración (1050 g) y entornos corrosivos (niebla salina, calor húmedo), proporcionando una alta conductividad (>95% IACS), bajas pérdidas (<0,5%) y una larga vida útil (>10⁶ ciclos), con una rugosidad superficial de Ra 0,050,2 μm.

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 6051221, ISO 9001), este artículo proporciona sugerencias de sustrato, proceso, rendimiento, aplicación y optimización del recubrimiento conductor de carburo cementado.

Características del sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado

1.1 Composición del material del sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado

Sustrato de revestimiento conductor de carburo:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino (D50 0,1 - 0,4 μm), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad (KIC 1015 MPa·m^{1/2}), resistencia a la fatiga aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (HCl, SO₄²⁻ <0,01 mm/año), conductividad aumentada en un 5 %.

Aditivos: TaC (0,1 - 0,3 % en peso) aumenta la resistencia a la oxidación en un 10 %; ZrC (0,2 - 0,5 % en peso) aumenta la resistencia al desgaste en un 5 %.

Sustrato de revestimiento conductor de carburo revestimiento conductor:

Cu (PVD): conductividad >98% IACS, resistencia a la temperatura 600°C, resistencia de contacto <8 μΩ.

Ag (PVD): conductividad >99% IACS, resistencia a la temperatura 650°C, resistencia a la erosión del arco.

Au (PVD): conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 700°C, resistencia a la corrosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumentada en un 20%.

NiP (recubrimiento químico): conductividad >90% IACS, dureza 800-1000 HV, resistencia a la corrosión.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), aumento del 20 % en la resistencia al desgaste, aumento del 15 % en la resistencia al agrietamiento.

Modificación de la superficie: Nanotexturizado (tamaño de la característica 50 - 200 nm), aumento del 15% en el área de contacto, reducción del 10% en la resistencia.

1.2 Parámetros de rendimiento del sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >800°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Conductividad eléctrica: >95% IACS (IEC 6051221).

Resistencia de contacto: <10 μΩ (IEC 6051221).

Resistencia a la erosión por arco: pérdida <0,01 mm³/min (IEC 60850).

Rugosidad superficial: Ra 0,05 – 0,2 μm, estabilidad de contacto aumentada en un 20%.

Ciclo de vida: >10⁶ veces (10100 A/cm², MILSTD810G).

1.3 Ventajas del sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado

Alta conductividad: recubrimiento de Cu/Ag/Au, conductividad >95% IACS, resistencia de contacto <10 μΩ.

Alta resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, desgaste <0,02 mm³/h, vida útil prolongada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Au/NiP, resistente a la niebla salina/humedad y calor, mejor que a base de cobre.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento de Au, antioxidante, adecuado para entornos de alta temperatura (700 °C).

Resistencia a la erosión por arco: recubrimiento de Ag/Au, pérdida <0,01 mm³/min, adecuado para altas corrientes.

Proceso de fabricación de sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC/ZrC (D50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO_2 , 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula $<\pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformidad $>99\%$.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación $\pm 0,02 \text{ mm}$), densidad de la palanquilla 8,5 - 10,0 g/cm^3 .

Resultados: Desviación dimensional $<\pm 0,03 \text{ mm}$, tasa de grietas $<0,3\%$.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H_2 ($\text{O}_2 <2 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 22,5 horas.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Resultados: Densidad 14,8 - 15,0 g/cm^3 , porosidad $<0,0003\%$, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica $<\pm 0,005 \text{ mm}$, $\text{Ra } 0,050,2 \mu\text{m}$.

EDM: Mecanizado por electrochispa, micro ranura/agujero ($\text{Ø } 0,1-0,5 \text{ mm}$), desviación $<\pm 0,003 \text{ mm}$.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,3 - 0,5 μm), 1200 rpm, $\text{Ra } <0,05 \mu\text{m}$, resistencia de contacto reducida en un 10%.

2.5 Recubrimiento conductor

Método: PVD (objetivo Cu/Ag/Au, $>99,99\%$) o recubrimiento químico (NiP).

Parámetros: Cu/Ag/Au (0,53 μm), 10^{-5} Pa , 200400°C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 $\mu\text{m/h}$; NiP (13 μm), pH 4,55,5, 85°C.

Resultados: Adhesión $>80 \text{ N}$, conductividad $>95\%$ IACS, resistencia de contacto $<10 \mu\Omega$.

2.6 Modificación de la superficie

Métodos: Micromaquinado láser (longitud de onda 1064 nm) para generar nanotexturas (tamaño de característica 50 - 200 nm).

Parámetros: potencia 1020 W, frecuencia 50 kHz, velocidad de escaneo 500 mm/s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados: El área de contacto aumentó un 15%, la resistencia de contacto disminuyó un 10% y la estabilidad conductiva aumentó un 20%.

2.7 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,1 - 0,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: Desviación de dureza < ± 30 HV (ISO 6508), desgaste <0,02 mm^3/h , resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a).

Geometría: CMM (desviación < $\pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de superficie < $\pm 0,002$ mm).

Ensayos no destructivos: rayos X (defectos < 0,005 mm), ultrasonidos (grietas < 0,003 mm).

Propiedades eléctricas: conductividad >95% IACS, resistencia de contacto <10 $\mu\Omega$, resistencia a la erosión del arco <0,01 mm^3/min (IEC 6051221).

Pruebas ambientales: MILSTD810G (niebla salina 1000 horas, calor húmedo 85 °C/85 % HR, vibración 50 g).

Escenarios de aplicación de sustratos de revestimiento conductor

Los sustratos de revestimiento conductor de carburo brindan alta conductividad, resistencia al desgaste y requisitos ambientales extremos, proceso, pruebas y sugerencias de selección:

3.1 Conector eléctrico de aviación

Condiciones de funcionamiento: 50 A/cm^2 , 10 g de vibración, 55°C a 200°C, niebla salina (5% NaCl), 10^6 ciclos.

diseño

Tipo: Pasador de contacto (\varnothing 2 mm, longitud 10 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , ZrC 0,5 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: Au (1 μm , PVD, conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 700°C).

Geometría: desviación de redondez < $\pm 0,002$ mm, Ra < 0,05 μm , nanotextura 50 - 100 nm.

Procesos: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD Au (250°C), micromecanizado láser.

Parámetros: densidad de corriente 50 A/cm^2 , vibración 10 g, frecuencia de conexión y desconexión 1 Hz.

prueba:

Vida útil: 2×10^6 veces (5×10^5 veces para sustrato de cobre, 4 veces más).

Tasa de desgaste: <0,01 mm^3/h , resistencia a la corrosión <0,01 mm/a .

Resistencia de contacto: <8 $\mu\Omega$, conductividad >95% IACS.

Resistencia a la vibración: 10 g, 10^6 veces, sin fallos.

Selección: WCNi+Au, adecuado para corrosión de alta corriente y NDT regular.

Ventajas: Baja resistencia, resistencia a la corrosión, confiabilidad de conexión aumentada en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Placas bipolares de pilas de combustible

Condiciones de funcionamiento: 100 A/cm², 80°C, calor húmedo (95% HR), electrolito ácido (pH 3), 10⁷ ciclos.

diseño

Tipo: Placa bipolar (100×100×2 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm, TaC 0,3 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: NiP (2 μm, recubierto químicamente, conductividad >90% IACS, dureza 1000 HV).

Geometría: Desviación del canal de flujo <±0,003 mm, Ra <0,1 μm, nanotextura 100 - 200 nm.

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, recubrimiento químico NiP (85°C), micromecanizado láser.

Parámetros: densidad de corriente 100 A/cm², temperatura 80°C, frecuencia de ciclo 0,1 Hz.

Prueba:

Vida útil: 1,5×10⁷ veces (3×10⁶ veces para acero inoxidable, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Resistencia de contacto: <10 μΩ, conductividad >90% IACS.

Resistencia al calor y la humedad: 95 % HR, 1000 horas, sin corrosión.

Selección: WCCo+NiP, adecuado para calor ácido y húmedo, limpieza regular.

Ventajas: resistencia a la corrosión, alta conductividad, eficiencia de la batería aumentada en un 15%.

3.3 Almohadillas de contacto de la placa de circuito electrónico

Condiciones de funcionamiento: 20 A/cm², vibración de 5 g, 40°C a 150°C, ambiente seco, 10⁶ contactos.

diseño

Tipo: Almohadilla de contacto (5×5×0,5 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,10,4 μm, ZrC 0,5 % en peso), dureza 1800 HV.

Recubrimiento: Ag (1 μm, PVD, conductividad >99% IACS, resistencia a la temperatura 650°C).

Geometría: Desviación de planaridad <±0,002 mm, Ra <0,05 μm, nanotextura 50100 nm.

Procesos: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD Ag (200°C), micromecanizado láser.

Parámetros: densidad de corriente 20 A/cm², vibración 5 g, frecuencia de contacto 1 Hz.

prueba:

Vida útil: 2×10⁶ veces (4×10⁵ veces para sustrato de cobre, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,01 mm³/h, resistencia a la erosión por arco: <0,01 mm³/min.

Resistencia de contacto: <7 μΩ, conductividad >99% IACS.

Resistencia a la vibración: 5 g, 10⁶ veces, sin fallos.

Selección: WCCo+Ag, adecuado para contacto de alta frecuencia y pulido regular.

Ventajas: baja resistencia al arco, estabilidad de contacto aumentada en un 20%.

Comparación del rendimiento del sustrato de revestimiento conductor de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	sustrato de cobre	Sustrato de acero inoxidable
Dureza (HV)	1600 - 2000	50 - 100	200 - 300
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,2 - 0,4	0,5 - 0,8
Tenacidad (K_{IC} , $MPa \cdot m^{1/2}$)	10 - 15	20 - 30	50 - 70
Resistencia al desgaste (mm^3/h)	<0,02	0,5 - 1,0	0,2 - 0,5
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Conductividad eléctrica (% IACS)	>95	>98	veintitrés
Resistencia de contacto ($\mu\Omega$)	<10	<5	50 - 100
Resistencia a la erosión por arco (mm^3/min)	<0,01	0,05 - 0,1	0,03 - 0,06
Múltiplo de la vida útil (en relación con el cobre)	35	1	1.52

Características destacadas del sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado:

Alta conductividad: recubrimiento de Cu/Ag/Au, conductividad >95% IACS, resistencia de contacto <10 $\mu\Omega$.

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste <0,02 mm^3/h , vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Au/NiP, resistente a la niebla salina/humedad y calor, mejor que a base de cobre.

Resistencia a la erosión por arco: recubrimiento de Ag/Au, pérdida <0,01 mm^3/min , adecuado para altas corrientes.

Sugerencias de optimización para sustratos de recubrimiento conductor de carburo cementado

Selección de materiales:

Conector eléctrico: WC10%Ni+Au, resistencia a la corrosión y conductividad aumentadas en un 15%.

Placa bipolar de pila de combustible: WC8%Co+NiP, resistencia al ácido aumentada en un 20%.

Almohadilla de contacto de la placa de circuito: WC8%Co+Ag, resistencia al arco aumentada en un 15%.

Aditivos: TaC 0,3 % en peso, ZrC 0,5 % en peso, resistencia al desgaste aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, conductividad aumentada en un 10%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación $\leq \pm 0,005$ mm, Ra <0,05 μm .

revestimiento:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Au (1 μm , PVD), resistencia de contacto reducida en un 10%.

NiP (2 μm , recubrimiento químico), resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.

Ag (1 μm , PVD), conductividad aumentada en un 5%.

Micromecanizado láser: Nanotextura 50200 nm, área de contacto aumentada en un 15%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación $< \pm 0,003$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $< \pm 0,03$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Conector eléctrico: WCNi+Au, 50 A/cm², 55°C a 200°C, niebla salina.

Placa bipolar: WCCo+NiP, 100 A/cm², 80°C, electrolito ácido.

Almohadilla de contacto: WCCo+Ag, 20 A/cm², 40°C a 150°C, ambiente seco.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $< 2\%$).

Rendimiento: ASTM G65 ($< 0,02$ mm³/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), conductividad eléctrica ($> 95\%$ IACS).

Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de superficie $< \pm 0,002$ mm).

Entorno: MILSTD810G (niebla salina 1000 horas, calor húmedo 85 °C/85 % HR, vibración 50 g).

Propiedades eléctricas: resistencia de contacto < 10 $\mu\Omega$, resistencia a la erosión del arco $< 0,01$ mm³ / min (IEC 6051221).

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $< \pm 0,1$ g/cm³.

GB/T 38512015: Resistencia 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,02$ mm³/h.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

IEC 6051221: Propiedades de contacto eléctrico.

IEC 60850: Ensayo de erosión por arco.

ISO 9001: Gestión de calidad.

El sustrato de recubrimiento conductor de carburo cementado logra alta dureza (1600 - 2000 HV), resistencia al desgaste ($< 0,02$ mm³/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), alta conductividad ($> 95\%$ IACS) y baja resistencia de contacto (< 10 $\mu\Omega$) mediante la optimización del grano ultrafino WC (0,10,4 μm), fase de unión Co/Ni (612 % en peso), recubrimiento conductor de PVD/recubrimiento químico (Cu/Ag/Au/NiP, 0,53 μm) y superficie nanotexturizada. El sustrato es adecuado para conectores eléctricos de aviación, placas bipolares de celdas de combustible y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

almohadillas de contacto de placas de circuitos electrónicos, con una vida útil aumentada en 35 veces, Ra 0,05 - 0,2 μm y un aumento de la eficiencia de conductividad del 15 - 20 %. La optimización del tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y el micromecanizado láser pueden reducir los costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento del costo del 10%) y la uniformidad del recubrimiento (desviación $<\pm 0,03 \mu\text{m}$). El sustrato de carburo es superior a los sustratos de cobre y acero inoxidable y cumple con los requisitos de conductividad de alta fiabilidad (ISO 9001).

apéndice:

Piezas de carburo cementado para reducción de peso en aviación

Los componentes de carburo cementado para la reducción de peso en aviación están hechos de carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{año}$, pH 212, con HCl, SO_4^{2-}), resistencia a altas temperaturas ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$, resistencia a la oxidación) y resistencia a la fatiga ($>10^6$ veces, MILSTD810G). Al optimizar la relación y la estructura del material (como la estructura porosa y la pared delgada), la densidad de las piezas se reduce a $8-12 \text{ g/cm}^3$ (un 20-40 % más ligera que el carburo cementado tradicional de $14,8-15,0 \text{ g/cm}^3$) y la relación resistencia-peso ($>200 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$) es mejor que la de la aleación de titanio ($100-150 \text{ MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$). La superficie se recubre con un revestimiento PVD/CVD (como TiN, Al_2O_3 , $13 \text{ }\mu\text{m}$, coeficiente de fricción $<0,2$) o un revestimiento funcional (Au, Ag, $0,52 \text{ }\mu\text{m}$, conductividad $>90 \text{ } \%$ IACS) para mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y las propiedades eléctricas. Los componentes se utilizan en la industria aeroespacial (como conectores de alas, fijaciones y soportes) y están sometidos a altas tensiones ($100-500 \text{ MPa}$), vibraciones ($10-100 \text{ g}$) y entornos extremos ($55 \text{ }^\circ\text{C}$ a $800 \text{ }^\circ\text{C}$). Su vida útil es 35 veces superior a la de los materiales tradicionales (como acero inoxidable, aleación de titanio, $300-600 \text{ HV}$), y su rugosidad superficial es de $\text{Ra } 0,050,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100), este artículo proporciona sugerencias sobre la producción, proceso, rendimiento, aplicación y optimización de componentes reductores de peso de aviación de carburo cementado.

Características de los componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado

1.1 Piezas de reducción de peso de aviación de carburo cementado

Composición del material

Matriz:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino ($\text{D}_{50} 0,1 - 0,4 \text{ }\mu\text{m}$), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad ($K_{IC} 10 - 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), resistencia a la fatiga aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/a}$), resistencia a la oxidación a alta temperatura.

Aditivos: Cr₃C₂ (0,20,5 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5 %;

TaC (0,10,3 % en peso) aumenta las propiedades antioxidantes en un 10 %.

Pérdida de peso:

Estructura porosa: porosidad 5 - 15%, tamaño de poro 50 - 200 μm , reducción de densidad 20 - 30%.

Pared delgada: espesor de pared 0,52 mm, reducción de peso 10 - 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Refuerzo compuesto: fibra de carbono/CNT (13 % en peso), relación resistencia-peso aumentada en un 15 %.

revestimiento:

TiN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C, resistencia al desgaste.

Al₂O₃ (CVD): dureza 1800 - 2200 HV, resistencia a la temperatura 1000°C, resistencia a la corrosión.

Au/Ag (PVD): conductividad >90% IACS, resistencia a temperaturas 500 - 600 °C, antioxidación.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), resistencia al desgaste aumentada en un 20 %, resistencia al agrietamiento aumentada en un 15 %.

1.2 Parámetros de rendimiento de los componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 10 - 15 MPa·m^{1/2} (a base de Co 12 - 15, a base de Ni 10 - 12).

Relación resistencia-peso: >200 MPa·cm³/g (Aleación de titanio 100 - 150).

Densidad: 8 - 12 g/cm³ (reducción de peso del 20 - 40%).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >800°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Resistencia a la fatiga: >10⁶ veces (100 - 500 MPa, MILSTD810G).

Conductividad eléctrica: >90% IACS (recubrimiento Au/Ag, IEC 6051221).

Rugosidad superficial: Ra 0,05 - 0,2 μm, estabilidad de contacto aumentada en un 20%.

1.3 Ventajas de los componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado

Alta resistencia y baja densidad: pared porosa/delgada, relación resistencia-peso >200 MPa·cm³/g, reducción de peso del 20 - 40%.

Alta resistencia al desgaste: revestimiento WC+ de grano ultrafino, la vida útil aumenta 35 veces y la tasa de fallas se reduce en un 30%.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiN / Al₂O₃, antioxidante, adecuado para entornos de alta temperatura (800 °C).

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Al₂O₃, resistente al combustible de aviación/niebla salina, adecuado para entornos hostiles.

Resistencia a la fatiga: Co/Ni de alta tenacidad, soporta vibraciones de alta frecuencia (>10⁶ veces), mejor que la aleación de titanio.

Proceso de fabricación de piezas de reducción de peso de aviación de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm , pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), Cr₃C₂/TaC (D50 0,51 μm), fibra de carbono/CNT (D50 0,10,5 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformidad >99%.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) + fabricación aditiva (asistida por impresión 3D).

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación $\leq \pm 0,02 \text{ mm}$), densidad de la palanquilla 8,5 - 10,0 g/cm³.

Impresión 3D: SLM (fusión selectiva por láser), polvo WCNi, espesor de capa 30 - 50 μm , porosidad 5 - 15%.

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$, desviación de porosidad $\leq \pm 0,5\%$, tasa de grietas <0,3%.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 horas.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 horas.

Resultados: Densidad 8 - 12 g/cm³, porosidad <0,0003%, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra 0,050,2 μm .

EDM: Mecanizado por electrochispa, microagujeros/ranuras (\varnothing 0,1-0,5 mm), desviación $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 μm), 1200 rpm, Ra <0,05 μm , coeficiente de fricción reducido en un 10%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivos Ti/Al/Au/Ag, >99,99%).

Parámetros: TiN / Al₂O₃ / Au/Ag (13 μm), 10⁻⁵Pa, 200 - 400°C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 $\mu\text{m} / \text{h}$.

Resultados: Adherencia >80 N, coeficiente de fricción <0,2, conductividad >90% IACS.

2.6 Detección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microestructura: SEM (grano 0,1 - 0,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $<2\%$).
Rendimiento: Desviación de dureza $<\pm 30$ HV (ISO 6508), desgaste $<0,02$ mm^3/h , resistencia a la corrosión ($<0,01$ mm/a).
Geometría: CMM (desviación $<\pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de apertura $<\pm 0,002$ mm).
Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos $< 0,005$ mm), ultrasonidos (grietas $< 0,003$ mm).
Pruebas ambientales: MILSTD810G (55 °C a 800 °C, vibración de 100 g, 10^6 ciclos).
Pruebas mecánicas: resistencia a la fatiga ($>10^6$ veces, MILSTD810G), relación resistencia-peso (>200 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3 / \text{g}$).

Escenarios de aplicación de piezas de reducción de peso para aviación

Las piezas de carburo cementado para reducción de peso en aviación brindan sugerencias de procesos, pruebas y selección para requisitos de alta resistencia, baja densidad y entornos extremos:

3.1 Conector de ala de piezas de reducción de peso de aviación de aleación dura

Condiciones: 300 MPa, 100 g de vibración, 55°C a 200°C, niebla salina (5% NaCl), 10^6 ciclos.
diseño
Tipo: Placa de conexión (100×50×2 mm, porosidad 10%).
Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,4 % en peso, CNT 2 % en peso), dureza 1700 HV.
Recubrimiento: Al₂O₃ (2 μm , CVD, resistencia a la temperatura 1000°C, resistencia a la corrosión).
Geometría: Desviación de apertura $<\pm 0,002$ mm , Ra $<0,1$ μm , densidad 9,5 g/cm^3 .
Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 300 MPa, SLM (porosidad 10%), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda de 5 ejes, CVD Al₂O₃ (400°C).
Parámetros: tensión 300 MPa, vibración 100 g, frecuencia de muestreo 1 kHz.
prueba:
Vida útil: 2×10^6 veces (5×10^5 veces para aleación de titanio, 4 veces más).
Tasa de desgaste: $<0,01$ mm^3/h , resistencia a la corrosión $<0,01$ mm/a .
Relación resistencia-peso: 220 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$, reducción de peso del 30%.
Resistencia a la vibración: 100 g, 10^6 veces, sin fallos.
Selección: WCNi+ Al₂O₃ +CNT, adecuado para corrosión bajo alta tensión y NDT regular.
Ventajas: alta resistencia, baja densidad, resistencia a la corrosión, estabilidad del ala aumentada en un 15%.

3.2 Elementos de fijación de carburo cementado para reducción de peso de aviación (pernos)

Condiciones: 200 MPa, 20 g de vibración, 40°C a 150°C, ambiente seco, 10^7 ciclos.
diseño
Tipo: Perno (M6, 1 mm de espesor, 8% de porosidad).
Material: WC8%Co (D50 0,10,4 μm , TaC 0,3 % en peso, fibra de carbono 1 % en peso), dureza 1800 HV.
Recubrimiento: TiN (1 μm , PVD, resistencia a la temperatura 800°C, dureza 2400 HV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Geometría: desviación del hilo $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,05$ μm , densidad 10 g/cm³.
 Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 300 MPa, SLM (porosidad 8%), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD TiN (250°C).
 Parámetros: tensión 200 MPa, vibración 20 g, par 10 Nm.
 prueba:
 Vida útil: $1,5 \times 10^7$ veces (acero inoxidable 2×10^6 veces, 7,5 veces más).
 Tasa de desgaste: $< 0,02$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.
 Relación resistencia-peso: 210 MPa·cm³/g, reducción de peso del 25%.
 Resistencia a la fatiga: 200 MPa, 10^7 veces, sin rotura.
 Selección: WCCo+TiN + fibra de carbono, adecuado para vibración de alta frecuencia, inspección de torque regular.
 Ventajas: baja densidad, alta resistencia, resistencia a la fatiga, eficiencia de montaje aumentada en un 10%.

3.3 Soporte de componente de reducción de peso de aviación de aleación dura (suspensión del motor)

Condiciones: 500 MPa, 50 g de vibración, 200-800 °C, combustible de aviación, 10^6 ciclos.
 diseño
 Tipo: Soporte (200×100×1,5 mm, pared delgada).
 Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 1900 HV.
 Recubrimiento: Al₂O₃ (2 μm , CVD, resistencia a la temperatura 1000°C) + Au (0,5 μm , PVD, conductividad $> 95\%$ IACS).
 Geometría: desviación del espesor de pared $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,1$ μm , densidad 11 g/cm³.
 Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda de 5 ejes, CVD Al₂O₃ (400°C), PVD Au (200°C).
 Parámetros: tensión 500 MPa, vibración 50 g, temperatura 800°C.
 prueba:
 Vida útil: 2×10^6 veces (aleación de titanio 4×10^5 veces, 5 veces más).
 Tasa de desgaste: $< 0,01$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.
 Relación resistencia-peso: 230 MPa·cm³/g, reducción de peso del 20%.
 Resistencia a altas temperaturas: 800°C, 500 horas, sin oxidación.
 Selección: WCCo+ Al₂O₃ +Au, adecuado para alta temperatura, alto estrés y NDT regular.
 Ventajas: Resistencia a la corrosión a altas temperaturas, fuerte conductividad, eficiencia del motor aumentada en un 10%.

Comparación del rendimiento de los componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de titanio (Ti6Al4V)	Acero inoxidable (316L)
Dureza (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de titanio (Ti6Al4V)	Acero inoxidable (316L)
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Relación resistencia-peso (MPa·cm ³ /g)	>200	100 - 150	60 - 80
Densidad (g/cm ³)	812	4.4	8.0
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0.20.5
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Resistencia a la temperatura (°C)	>800	400 - 600	300 - 500
Resistencia a la fatiga (veces, 500 MPa)	>10 ⁶	10 ⁵ - 10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵
Vida útil múltiple (en relación con el acero inoxidable)	35	veintitrés	1

de componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado :

Reducción de peso: pared porosa/fina, densidad 812 g/cm³, reducción de peso 2040%.

Alta resistencia: relación resistencia-peso > 200 MPa·cm³/g, mejor que la aleación de titanio.

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste <0,02 mm³/h, vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Al₂O₃, resistente a la niebla salina/combustible, mejor que el acero inoxidable.

Sugerencias de optimización para componentes de reducción de peso de aviación de carburo cementado

Selección de materiales:

Conector de ala: WC10%Ni+Al₂O₃ + CNT, resistencia a la corrosión y reducción de peso del 30%.

Sujetadores: WC8%Co+TiN+fibra de carbono, antifatiga y reducción de peso del 25%.

Soporte del motor: WC8%Co+Al₂O₃ + Au, resistencia a altas temperaturas y conductividad eléctrica aumentada en un 10%.

Aditivos: Cr₃C₂ 0,4 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, resistencia aumentada en un 15%.

Impresión 3D: SLM, porosidad 515%, reducción de peso 2030%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación <±0,005 mm, Ra <0,05 μm.

revestimiento:

Al₂O₃ (2 μm, CVD), resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiN (1 μm , PVD), resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

Au (0,5 μm , PVD), conductividad aumentada en un 10%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

Equipo SLM: espesor de capa 30 – 50 μm , desviación de porosidad $< \pm 0,5\%$.

CNC de 5 ejes: Desviación $< \pm 0,003$ mm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Conector de ala: WCNi+ Al₂O₃, 300 MPa, 55°C a 200°C, niebla salina.

Elementos de fijación: WCCo+TiN, 200 MPa, 40°C a 150°C, ambiente seco.

Soporte: WCCo+Al₂O₃ + Au, 500 MPa, 200 - 800°C, fueloil.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $< 2\%$).

Rendimiento: ASTM G65 ($< 0,02$ mm³/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), resistencia a la temperatura ($> 800^\circ\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm²).

Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de apertura $< \pm 0,002$ mm).

Entorno: MILSTD810G (55 °C a 800 °C, 100 g, 10^6 veces).

Mecánica: relación resistencia-peso (> 200 MPa·cm³/g), resistencia a la fatiga ($> 10^6$ veces).

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $< \pm 0,1$ g/cm³.

GB/T 38512015: Resistencia 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,02$ mm³/h.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

MILSTD810G: Adaptabilidad ambiental (vibración, temperatura, corrosión).

AS9100: Gestión de calidad aeroespacial.

Las piezas de reducción de peso de aviación de carburo cementado logran alta dureza (1600-2000 HV), resistencia al desgaste ($< 0,02$ mm³/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), resistencia a altas temperaturas ($> 800^\circ\text{C}$) y alta relación resistencia-peso (> 200 MPa·cm³/g) mediante la optimización de WC de grano ultrafino (0,10,4 μm), fase de unión Co/Ni (6-12 % en peso), pared porosa/fina y recubrimiento PVD/CVD (TiN/Al₂O₃/Au, 13 μm). Las piezas son adecuadas para conectores de alas, sujetadores y soportes de motor, con una reducción de peso del 20-40 %, un aumento de la vida útil de 35 veces, Ra 0,05-0,2 μm y un aumento de la confiabilidad del 15 %. Optimizar la porosidad, el espesor del recubrimiento y el proceso SLM puede reducir costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento de costo del 10%) y la uniformidad de poros (desviación $< \pm 0,5\%$). El carburo cementado es superior a la aleación de titanio y al acero inoxidable, y cumple con los estrictos requisitos de la industria aeroespacial (AS9100,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MILSTD810G).



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

apéndice:

Implantes biomédicos de carburo cementado

Los implantes biomédicos de carburo cementado están hechos de carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se producen mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{año}$, pH 68, conteniendo NaCl, proteína), alta biocompatibilidad (ISO 109935, citotoxicidad $<5 \%$) y resistencia a la fatiga ($>10^7$ veces, ISO 72064). La superficie está recubierta con un recubrimiento PVD/CVD (como TiN, DLC, ZrN, $13 \mu\text{m}$, coeficiente de fricción $<0,2$) o un recubrimiento bioactivo (como hidroxiapatita, HA, $510 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia al desgaste, la antibacterialidad (tasa antibacteriana $>99 \%$, ISO 22196) y la integración ósea (tasa de integración ósea $>80 \%$, ISO 109936). Los implantes se utilizan en ortopedia (articulaciones de cadera/rodilla, clavos óseos), odontología (implantes) y cardiovascular (stents), y están sujetos a altas cargas (500-2000 N), corrosión por fluidos corporales y fatiga cíclica ($>10^7$ veces). La vida útil es 35 veces más larga que la de los materiales tradicionales (como aleaciones de titanio, aleaciones de CoCr, 300-600 HV) y la rugosidad de la superficie es $Ra 0,050,2 \mu\text{m}$.

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 10993, ISO 7206), este artículo proporciona sugerencias de fabricación, procesamiento, rendimiento, aplicación y optimización de implantes biomédicos de carburo cementado.

Características de los implantes biomédicos de carburo cementado

Composición del material de los implantes biomédicos de carburo cementado

Matriz:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino ($D_{50} 0,10,4 \mu\text{m}$), dureza 1600-2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad ($KIC 1015 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), resistencia a la fatiga aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistente a la corrosión (NaCl, proteína $<0,01 \text{ mm/a}$), baja toxicidad (ISO 109935).

Aditivos: TaC (0,10,3 % en peso), capacidad antioxidante aumentada en un 10 %; ZrC (0,20,5 % en peso), biocompatibilidad aumentada en un 5 %.

revestimiento:

TiN (PVD): dureza 2000-2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C , resistencia al desgaste, alta biocompatibilidad.

DLC (PVD): dureza 2500-3000 HV, coeficiente de fricción $<0,1$, índice antibacteriano $>99\%$.

ZrN (PVD): dureza 2200-2600 HV, resistencia a la corrosión, tasa de integración ósea aumentada en un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HA (pulverización de plasma): 510 μm de espesor, tasa de integración ósea > 80%, alta actividad biológica.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni (68 % en peso) en la superficie, alto contenido de Co/Ni (1012 % en peso) en el núcleo, aumento del 20 % en la resistencia al desgaste, aumento del 15 % en la resistencia al agrietamiento.

Modificación de la superficie: Estructura nanoporosa (tamaño de poro 50-200 nm), tasa de adhesión celular aumentada en un 30%.

1.2 Parámetros de rendimiento de los implantes biomédicos de carburo cementado

Dureza: 1600-2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 10 - 15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm^3/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 68, <0,01 mm/a (ISO 1099310).

Resistencia a la fatiga: >10⁷ veces (500-2000 N, ISO 72064).

Biocompatibilidad: Citotoxicidad <5%, no sensibilizante (ISO 109935).

Propiedad antibacteriana: tasa antibacteriana > 99% (DLC/ ZrN, ISO 22196).

Osteointegración: Tasa de osteointegración > 80% (HA, ISO 109936).

Coefficiente de fricción: <0,2 (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 25%.

Rugosidad superficial: Ra 0,05 – 0,2 μm , la adhesión celular aumentó en un 20%.

1.3 Ventajas de los implantes biomédicos de carburo cementado

Alta resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, desgaste <0,02 mm^3/h , vida útil prolongada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC/ZrN, resistente a la corrosión líquida, mejor que la aleación de CoCr.

Alta biocompatibilidad: recubrimiento de TiN/HA, no tóxico, tasa de integración ósea >80%.

Resistencia a la fatiga: Co/Ni de alta tenacidad, soporta cargas elevadas (>10⁷ veces), mejor que las aleaciones de titanio.

Antibacteriano: recubrimiento DLC/ZrN, tasa antibacteriana > 99%, riesgo de infección reducido en un 30%.

Proceso de fabricación de implantes biomédicos de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,10,4 μm , pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), TaC/ZrC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$, uniformidad >99%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 250-300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación $\leq \pm 0,02$ mm), densidad de la palanquilla 8.510,0 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,03$ mm, tasa de grietas $< 0,3\%$.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200-500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ < 2 ppm), 10^{-3} Pa .

Sinterización: 1350-1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa, 22,5 horas.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Resultados: Densidad 14,815,0 g/cm³, porosidad $< 0,0003\%$, dureza 1600-2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μ m), 5000 rpm, avance 0,003-0,01 mm/pasada, desviación geométrica $\leq \pm 0,005$ mm, Ra 0,050,2 μ m.

EDM: Mecanizado por electrochispa, microagujeros/ranuras (\varnothing 0,1-0,5 mm), desviación $\leq \pm 0,003$ mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 μ m), 1200 rpm, Ra $< 0,05$ μ m, la adhesión celular aumentó en un 15%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivo Ti/Zr/C, $> 99,99\%$) o pulverización de plasma (HA).

Parámetros: TiN /DLC/ ZrN (13 μ m), 10^{-5} Pa, 200 - 400°C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 μ m /h; HA (510 μ m), temperatura de pulverización 8000°C, velocidad 400 m/s.

Resultados: Fuerza de adhesión > 80 N, coeficiente de fricción $< 0,2$, tasa de integración ósea $> 80\%$.

2.6 Modificación de la superficie

Métodos: Micromaquinado láser (longitud de onda 1064 nm) para generar estructuras nanoporosas (tamaño de poro 50-200 nm).

Parámetros: potencia 1020 W, frecuencia 50 kHz, velocidad de escaneo 500 mm/s.

Resultados: La tasa de adhesión celular aumentó en un 30% y el tiempo de integración ósea disminuyó en un 20%.

2.7 Detección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $<2\%$).

Rendimiento: Desviación de dureza $<\pm 30$ HV (ISO 6508), desgaste $<0,02$ mm^3/h , resistencia a la corrosión ($<0,01$ mm/a).

Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de superficie $< \pm 0,002$ mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos $< 0,005$ mm), ultrasonidos (grietas $< 0,003$ mm).

Pruebas biológicas: citotoxicidad $<5\%$ (ISO 109935), integración ósea $>80\%$ (ISO 109936), tasa antibacteriana $>99\%$ (ISO 22196).

Ensayos mecánicos: resistencia a la fatiga $>10^7$ veces (ISO 72064), resistencia al corte >20 MPa (ASTM F1044).

Escenarios de aplicación de implantes biomédicos de carburo cementado

Los implantes de carburo ofrecen altos requisitos de durabilidad y biocompatibilidad, proceso, pruebas y sugerencias de selección:

3.1 Prótesis de cadera con implantes biomédicos de carburo cementado (copa acetabular/cabeza femoral)

Condiciones: 1000-2000 N, fluido corporal (pH 7,4), 10^7 ciclos, 37°C .

diseño

Tipo: Copa acetabular ($\varnothing 50$ mm) + cabeza femoral ($\varnothing 28$ mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,10,4 μm , ZrC 0,5 % en peso), dureza 1800 HV.

Recubrimiento: DLC (2 μm , PVD, coeficiente de fricción $<0,1$) + HA (5 μm , pulverización de plasma).

Geometría: Desviación esférica $\leq \pm 0,002$ mm , Ra $<0,05$ μm , apertura 100-200 nm .

Procesos: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD DLC (250°C), proyección de plasma HA, micromecanizado láser.

Parámetros: carga 1500 N, frecuencia de oscilación 1 Hz, pH del fluido corporal 7,4.

prueba:

Vida útil: 2×10^7 veces (aleación de titanio 5×10^6 veces, 4 veces más).

Tasa de desgaste: $<0,01$ mm^3/h , resistencia a la corrosión $<0,01$ mm/a .

Biocompatibilidad: Citotoxicidad $<3\%$, tasa de integración ósea $>85\%$.

Propiedad antibacteriana: tasa antibacteriana $>99\%$ (*S. aureus*), coeficiente de fricción $<0,1$.

Selección: WCNi+DLC+HA, adecuado para fluidos corporales de alta carga y exámenes de imágenes regulares.

Ventajas: resistente al desgaste y antibacteriano, fuerte integración ósea y reducción del 20% en el tiempo de recuperación postoperatoria.

3.2 Implantes biomédicos de carburo cementado Implantes dentales (raíces dentales)

Condiciones: 500-1000 N, saliva (pH 6,7), 10^7 masticables, 37°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diseño

Tipo: Implante roscado (Ø 4 mm, longitud 10 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 µm, TaC 0,3 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: ZrN (2 µm, PVD, dureza 2600 HV) + HA (5 µm, pulverización de plasma).

Geometría: desviación de la rosca $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ µm, apertura 50150 nm.

Procesos: molienda de bolas 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD ZrN (300°C), proyección de plasma HA, micromecanizado láser.

Parámetros: carga 800 N, frecuencia de masticación 2 Hz, pH saliva 6,5.

prueba:

Vida útil: $1,5 \times 10^7$ veces (aleación de CoCr 4×10^6 veces, 3,8 veces más).

Tasa de desgaste: $< 0,02$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.

Biocompatibilidad: Citotoxicidad $< 4\%$, tasa de integración ósea $> 80\%$.

Propiedad antibacteriana: tasa antibacteriana $> 99\%$ (P. gingivalis), la tasa de éxito de implantación aumentó en un 15%.

Selección: WCCo+ZrN+HA, adecuado para carga masticatoria y examen oral regular.

Ventajas: resistencia a la corrosión, rápida integración ósea y aumento del 20% en la estabilidad del implante.

3.3 Stent cardiovascular con implante biomédico de carburo cementado

Condiciones: 100200 N, sangre (pH 7,4), 10^8 latidos, 37°C.

diseño

Tipo: Stent de malla (Ø 3 mm, longitud 15 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 µm, ZrC 0,5 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: TiN (1 µm, PVD, dureza 2400 HV) + DLC (1 µm, PVD).

Geometría: desviación de malla $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ µm, tamaño de poro 50100 nm.

Proceso: fresado de bolas durante 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), EDM, PVD TiN+DLC (250°C), micromecanizado láser.

Parámetros: carga 150 N, frecuencia de pulsación 1 Hz, pH sanguíneo 7,4.

prueba:

Vida útil: 3×10^8 veces (aleación de CoCr 1×10^8 veces, 3 veces más).

Tasa de desgaste: $< 0,01$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.

Biocompatibilidad: Citotoxicidad $< 2\%$, tasa de trombosis $< 1\%$.

Propiedad antibacteriana: tasa antibacteriana $> 99\%$ (E. coli), tasa de permeabilidad del stent aumentada en un 20%.

Selección: WCNi+TiN+DLC, adecuado para entornos sanguíneos y exámenes ecográficos regulares.

Ventajas: Antifatiga, antitrombosis, tasa de reestenosis vascular reducida en un 15%.

Comparación del rendimiento de los implantes biomédicos de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de titanio (Ti6Al4V)	aleación de CoCr
Dureza (HV)	1600 - 2000	300 - 400	400 - 600
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,9 - 1,2	1.5 - 2.0
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	20 - 30
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0.050.1
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 68)	<0,01	0,02 - 0,05	0,01 - 0,03
Resistencia a la fatiga (veces, 2000 N)	>10 ⁷	10 ⁶ - 10 ⁷	10 ⁶ -- 10 ⁷
Biocompatibilidad (toxicidad%)	<5	<5	<10
Osteointegración (%)	>80	6070	50 - 60
Propiedad antibacteriana (%)	>99	50 - 70	60 - 80
Múltiplo de vida útil (en relación con la aleación de titanio)	35	1	1.52

Aspectos destacados de los implantes biomédicos de carburo cementado:

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste <0,02 mm³/h, vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC/ZrN, resistente a la corrosión líquida, mejor que la aleación de CoCr.

Biocompatibilidad: Recubrimiento de TiN/HA, tasa de integración ósea > 80%, mejor que la aleación de titanio.

Antibacteriano: recubrimiento DLC/ZrN, tasa antibacteriana > 99%, bajo riesgo de infección.

Recomendaciones de optimización para implantes biomédicos de carburo cementado

Selección de materiales:

Articulación de la cadera: WC10%Ni+DLC+HA, integración ósea resistente al desgaste aumentada en un 20%.

Implante dental: WC8%Co+ZrN+HA, anticorrosión y unión ósea aumentada en un 15%.

Stent cardiovascular: WC10%Ni+TiN+DLC, efecto antitrombótico aumentado en un 20%.

Aditivos: ZrC 0,5 % en peso, TaC 0,3 % en peso, biocompatibilidad aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación <±0,005 mm, Ra <0,05 μm.

revestimiento:

DLC (2 μm, PVD), coeficiente de fricción reducido en un 10%.

ZrN (2 μm, PVD), tasa antibacteriana aumentada en un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HA (5 μm , pulverización de plasma), la tasa de unión ósea aumentó en un 20%.

Micromaquinado láser: tamaño de poro 50-200 nm, adhesión celular aumentada en un 30%.

Optimización de equipos =

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación $< \pm 0,003$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $< \pm 0,03$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Articulación de la cadera: WCNi+DLC+HA, 1000-2000 N, líquido corporal, 10^7 veces.

Implantes dentales: WCCo+ZrN+HA, 500-1000 N, saliva, 10^7 veces.

Stent cardiovascular: WCNi+TiN+DLC, 100-200 N, sangre, 10^8 veces.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $< 2\%$).

Rendimiento: ASTM G65 ($< 0,02$ mm^3/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), resistencia a la fatiga ($> 10^7$ veces).

Biológico: ISO 109935 (toxicidad $< 5\%$), ISO 109936 (osteointegración $> 80\%$), ISO 22196 (tasa antibacteriana $> 99\%$).

Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de superficie $< \pm 0,002$ mm).

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $< \pm 0,1$ g/cm^3 .

GB/T 38512015: Resistencia 1,82,5 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 1600-2000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,02$ mm^3/h .

ISO 109935: Biocompatibilidad (toxicidad $< 5\%$).

ISO 109936: Prueba de osteointegración.

ISO 22196: Propiedades antimicrobianas.

ISO 72064: Ensayos de resistencia a la fatiga.

Los implantes biomédicos de carburo alcanzan alta dureza (1600-2000 HV), resistencia al desgaste ($< 0,02$ mm^3/h), resistencia a la corrosión ($< 0,01$ mm/a), alta biocompatibilidad (toxicidad $< 5\%$) y resistencia a la fatiga ($> 10^7$ veces) mediante la optimización del grano ultrafino WC (0,10,4 μm), fase de unión Co/Ni (612 % en peso), recubrimiento PVD/CVD (TiN/DLC/ZrN, 13 μm) y recubrimiento HA (510 μm). Los implantes son adecuados para articulaciones de cadera, implantes dentales y stents cardiovasculares, con una vida útil aumentada en 35 veces, Ra 0,050,2 μm , tasa de integración ósea $> 80\%$ y riesgo de infección reducido en un 30 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y el micromecanizado láser puede reducir los costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento del costo del 10%) y las pruebas in vivo a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

largo plazo (más de 10^7 veces). El carburo cementado es superior a las aleaciones de titanio y CoCr, y cumple con los altos requisitos de confiabilidad de la biomedicina (ISO 10993, ISO 7206).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

apéndice:

Molde inteligente de carburo

Los moldes inteligentes de carburo cementado están fabricados con carburo de tungsteno (WC) como matriz (88-94 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1800-2200 HV), excelente resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{año}$, pH 2-12, con HCl, SO_4^{2-}) y resistencia a altas temperaturas ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$, antioxidante). La superficie está recubierta con un revestimiento PVD/CVD (como TiAlN, AlCrN, DLC, $25 \mu\text{m}$, coeficiente de fricción $<0,15$) para mejorar las propiedades antidesgaste y antiadhesión, y sensores inteligentes integrados (MEMS, medidores de tensión) para lograr un monitoreo en tiempo real (temperatura $\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, presión $\pm 0,1 \text{ MPa}$, deformación $\pm 1 \mu\epsilon$). El molde se utiliza en la fabricación inteligente (como automóviles, aviación, electrónica) y está sujeto a alta tensión (100-500 MPa), alta temperatura (600-1200 $^\circ\text{C}$) y choque térmico cíclico (ΔT 500-800 $^\circ\text{C}$). La vida útil es 35 veces más larga que la del acero para moldes tradicional (H13, 400-600 HV), y la rugosidad de la superficie es Ra 0,1-0,3 μm .

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 17879, ISO 9001), este artículo proporciona sugerencias de tecnología, rendimiento, aplicación y optimización de los moldes inteligentes de carburo cementado.

Características del molde inteligente de carburo cementado

1.1 Composición del material del molde inteligente de carburo cementado

Matriz:

WC: 88-94 % en peso, grano ultrafino (D50 0,2 - 0,5 μm), dureza 1800-2200 HV.

Co: 6-10 % en peso, alta tenacidad (KIC $1520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), resistencia al desgaste aumentada en un 10 %.

Ni: 6-12 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (HCl, SO_4^{2-} $<0,01 \text{ mm/a}$), resistencia al impacto (KIC $1215 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Aditivos: Cr₃C₂ (0,3-0,6 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 6 %;

TaC (0,1-0,3 % en peso) aumenta la resistencia a la oxidación en un 10 %.

revestimiento:

TiAlN (PVD/CVD): dureza 2800-3200 HV, resistencia a la temperatura 10-50 $^\circ\text{C}$, resistencia al desgaste a altas temperaturas.

AlCrN (PVD): dureza 3000-3400 HV, resistencia a la temperatura 1100 $^\circ\text{C}$, resistencia a la oxidación.

DLC (PVD): dureza 2500-3000 HV, coeficiente de fricción $<0,1$, resistencia a la temperatura 600 $^\circ\text{C}$, antiadherencia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni (6-8 % en peso) en la superficie, alto contenido de Co/Ni (10-12 % en peso) en el núcleo, aumento del 25 % en la resistencia al desgaste, aumento del 20 % en la resistencia al agrietamiento.

Componentes inteligentes: MEMS (basados en silicio, <0,5 mm) o galgas extensométricas (NiCr, 0,01 mm de espesor), monitorización de temperatura, presión, deformación, error $\pm 0,5\%$.

1.2 Parámetros de rendimiento del molde inteligente de carburo cementado

Dureza: 1800-2200 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 2,0-2,8 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 12-20 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1520, a base de Ni 1215).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <math>< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}</math> (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 2-12, <math>< 0,01 \text{ mm/a}</math> (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >1000°C, resistencia a la oxidación (<math>< 0,01 \text{ mg/cm}^2</math>, 1000 horas).

Choque térmico: >10⁵ veces (ΔT 500-800°C, ISO 17879).

Coefficiente de fricción: <math>< 0,15</math> (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 30%.

Rugosidad superficial: Ra 0,1-0,3 μm, eficiencia de desmoldeo aumentada en un 15%.

Precisión de monitorización: temperatura $\pm 0,5$ °C, presión $\pm 0,1$ MPa, deformación ± 1 με (IEC 60751).

1.3 Ventajas de los moldes inteligentes de carburo cementado

Alta resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, vida útil aumentada 35 veces, costo de mantenimiento reducido en un 30%.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiAlN / AlCrN, antioxidante, adecuado para moldeo a alta temperatura (600-1200 °C).

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC, resistente a ácidos y álcalis/fusiones, adecuado para moldeo de electrónica/vidrio.

Monitoreo inteligente: MEMS/medidores de tensión, retroalimentación en tiempo real de las condiciones de trabajo, eficiencia de optimización aumentada en un 20%.

Alta precisión: recubrimiento de baja fricción + mecanizado de precisión, desviación de moldeo <math>< \pm 0,005 \text{ mm}</math>, aumento de calidad del 15%.

2. Proceso de fabricación de moldes inteligentes de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,2-0,5 μm, pureza > 99,95 %), Co/Ni (D50 1-2 μm), Cr3C2/ TaC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: molino de bolas planetario (bolas de ZrO2, 12:1), 350 rpm, 18-22 horas, desviación del tamaño de partícula <math>< \pm 0,05 \text{ μm}</math>, uniformidad >98%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 300-350 MPa, presión de mantenimiento 90 segundos, molde de aleación de titanio (desviación $\leq \pm 0,03$ mm), densidad de la pieza en bruto 9,0-10,5 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,05$ mm, tasa de grietas $< 0,5\%$.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200-600°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ < 3 ppm), 10^{-3} Pa .

Sinterización: 1400-1450°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa, 2,53 horas.

HIP: 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 horas.

Resultados: Densidad 15,0-15,2 g/cm³, porosidad $< 0,0005\%$, dureza 1800-2200 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (24 μ m), 4000 rpm, avance 0,005-0,02 mm/pasada, desviación geométrica $\leq \pm 0,01$ mm, Ra 0,10,3 μ m.

EDM: Mecanizado por electrochispa, cavidad/agujero (\varnothing 0,55 mm), desviación $\leq \pm 0,005$ mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,51 μ m), 1000 rpm, Ra $< 0,1$ μ m, antiadherencia aumentada en un 25%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivo Cr/Al/Ti, $> 99,99\%$).

Parámetros: TiAlN / AlCrN / DLC (25 μ m), 10^{-5} Pa, 250-450 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 μ m /h.

Resultados: Adherencia > 100 N, coeficiente de fricción $< 0,15$, resistencia a la temperatura 600-1100°C.

2.6 Integración inteligente

Sensor: MEMS (temperatura, presión, $< 0,5$ mm) o galga extensométrica (NiCr, 0,01 mm), error $\leq \pm 0,5\%$.

Embalaje: Soldadura láser (carcasa de Ti, hermeticidad $< 10^{-8}$ Pa·m³/s), resistencia a la temperatura 1000°C, resistencia a la vibración 50 g.

Transmisión de datos: chip integrado (5G/Bluetooth, latencia < 5 ms, consumo de energía < 30 mW), compatible con protocolos IIoT (OPC UA, MQTT).

2.7 Detección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microestructura: SEM (grano 0,2-0,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).
Rendimiento: Desviación de dureza < ± 40 HV (ISO 6508), desgaste <0,03 mm^3/h , resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a).
Geometría: CMM (desviación < $\pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación de cavidad < $\pm 0,003$ mm).
Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos < 0,01 mm), ultrasonidos (grietas < 0,005 mm).
Pruebas inteligentes: temperatura ($\pm 0,5$ °C, IEC 60751), presión ($\pm 0,1$ MPa, IEC 61298), deformación (± 1 $\mu\epsilon$, ASTM E251).
Pruebas ambientales: choque térmico (ΔT 800°C, >10⁵ ciclos, ISO 17879), niebla salina (1000 horas, ISO 9227).

3. Escenarios de aplicación de los moldes inteligentes de carburo cementado

En respuesta a los requisitos de alta precisión y alta confiabilidad de la fabricación inteligente, los moldes inteligentes de carburo cementado brindan sugerencias de proceso, prueba y selección:

3.1 Matriz inteligente de carburo cementado para forja en caliente automotriz (cigüeñal)

Condiciones de trabajo: 1000-1200°C, 300 MPa, choque térmico cíclico (ΔT 800°C), moldeo 10⁵ veces.

diseño

Tipo: Matriz de forja (cavidad 100×50 mm).

Material: WC10%Co (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000-2200 HV.

Recubrimiento: AlCrN (5 μm , PVD, dureza 3400 HV, resistencia a la temperatura 1100°C).

Componentes inteligentes: MEMS (temperatura $\pm 0,5$ °C, presión $\pm 0,1$ MPa), integrados en la cavidad.

Geometría: Radio de cavidad R2 mm, Ra <0,2 μm , desviación < $\pm 0,01$ mm.

Proceso: molienda de bolas 22 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes, PVD AlCrN (450°C), soldadura láser MEMS.

Parámetros: temperatura 1100°C, presión 300 MPa, ciclos 5000 veces, frecuencia de muestreo 1 kHz.

prueba:

Vida útil: 10.000 veces (acero H13 2.000 veces, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,03 mm^3/h , resistencia a la oxidación <0,01 mg/cm^2 .

Grieta térmica: Sin grieta (ΔT 800°C, 5000 veces).

Precisión de monitorización: temperatura $\pm 0,5$ °C, presión $\pm 0,1$ MPa, tasa de mantenimiento prevista aumentada en un 20 %.

Selección: WCCo+AlCrN+MEMS, adecuado para alta temperatura y alto estrés, NDT regular.

Ventajas: resistencia al desgaste por alta temperatura, monitoreo inteligente, eficiencia de moldeo aumentada en un 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.2 Molde inteligente de carburo cementado para fundición a presión de aviación (álabes de turbina)

Condiciones de trabajo: 700-800°C, 150 MPa, choque térmico cíclico (ΔT 500°C), moldeo 10^6 veces.

diseño

Tipo: Molde de fundición a presión (cavidad 200×100 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso), dureza 2000-2200 HV.

Recubrimiento: TiAlN (4 μm , PVD, dureza 3200 HV, resistencia a la temperatura 1050°C).

Componentes inteligentes: medidores de tensión (deformación $\pm 1 \mu\epsilon$), integrados en la superficie del molde.

Geometría: Pendiente de la cavidad 1°, Ra <0,1 μm , desviación $\leq \pm 0,005$ mm.

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes, PVD TiAlN (400°C), montaje de galgas extensométricas.

Parámetros: temperatura 750°C, presión 150 MPa, ciclo 10000 veces, frecuencia de muestreo 500 Hz.

prueba:

Vida útil: 50.000 veces (acero H13 10.000 veces, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, antiadherencia aumentada en un 25%.

Grieta térmica: Sin grieta (ΔT 500°C, 10000 veces).

Precisión de monitoreo: deformación $\pm 1 \mu\epsilon$, tasa de detección de defectos aumentada en un 15%.

Seleccione tipo: WCCo+TiAlN + galga extensométrica, adecuado para fusión a alta temperatura, limpieza regular.

Ventajas: antiadherencia, retroalimentación inteligente, calidad de fundición aumentada en un 10%.

3.3 Molde inteligente de aleación dura para la formación de vidrio electrónico (pantalla de teléfono móvil)

Condiciones de trabajo: 1000-1100°C, 50 MPa, corrosivo (pH 24), 10^5 veces moldeo.

diseño

Tipo: Fundición a presión (\varnothing 50 mm, curvada).

Material: WC10%Ni (D50 0,2-0,5 μm , Cr3C2 0,6 % en peso), dureza 2000-2200 HV.

Recubrimiento: DLC (3 μm , PVD, coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C).

Componentes inteligentes: MEMS (temperatura $\pm 0,5^\circ\text{C}$), integrados en el núcleo del molde.

Geometría: Desviación de la superficie $\leq \pm 0,003$ mm, Ra <0,1 μm .

Proceso: molienda de bolas 22 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes, PVD DLC (300°C), soldadura láser MEMS.

Parámetros: temperatura 1050°C, presión 50 MPa, ciclos 2000 veces, frecuencia de muestreo 2 kHz.

prueba:

Vida útil: 8000 veces (acero H13 1500 veces, 5,3 veces más).

Tasa de desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Antiadherencia: Tasa de residuos de vidrio <1%, Ra 0,1 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Precisión de monitoreo: temperatura $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, consistencia de calidad aumentada en un 20%.

Seleccione tipo: WCNi+DLC+MEMS, adecuado para altas temperaturas corrosivas, limpieza regular.

Ventajas: resistencia a la corrosión, monitoreo inteligente, alta precisión de moldeo.

Comparación del rendimiento de moldes inteligentes de carburo cementado

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Acero para moldes (H13)	Molde de cerámica
Dureza (HV)	1800-2200	400-600	1200-1500
Resistencia a la flexión (GPa)	2.0 - 2.8	1.5 - 2.0	0,5 - 1,0
Tenacidad (KIC, $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	12-20	20-30	35
Resistencia al desgaste (mm^3/h)	<0,03	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Resistencia a la corrosión (mm/a , pH 212)	<0,01	0,05 - 0,1	0,01 - 0,03
Resistencia a la temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	>1000	600-800	1200-1500
Choque térmico ($\Delta\text{T } 800^{\circ}\text{C}$)	> 10^5 veces	10^3 - 10^4 veces	10^2 - 10^3 veces
Múltiplo de la esperanza de vida (en relación con H13)	35	1	1.52
Coefficiente de fricción (recubrimiento)	<0,15	0,3 - 0,5	0.2 - 0.4
Precisión del monitoreo	$\pm 0,5\%$	ninguno	ninguno

Aspectos destacados del molde inteligente de carburo cementado:

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiAlN / AlCrN, antioxidante, adecuado para 1200°C .

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC, resistente a la fusión del vidrio, mejor que el acero H13.

Inteligencia: MEMS/medidor de tensión, monitoreo en tiempo real, aumento del 20% en eficiencia.

Sugerencias de optimización para moldes inteligentes de carburo cementado

Selección de materiales:

Forjado en caliente de automóviles: WC10%Co+AlCrN, resistencia al desgaste a alta temperatura aumentada en un 15%.

Fundición a presión para aviación: WC8%Co+TiAlN, antiadherencia aumentada en un 25%.

Vidrio electrónico: WC10%Ni+DLC, resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.

Aditivos: Cr3C2 0,6 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza aumentada en un 6 %.

Optimización de procesos:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sinterización: HIP 1400°C, 150 MPa, porosidad <0,0005%, resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (24 µm), desviación <±0,01 mm, Ra <0,1 µm.

revestimiento:

TiAlN (4 µm, 400°C), resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

AlCrN (5 µm, 450°C), resistencia a la oxidación aumentada en un 20%.

DLC (3 µm, 300°C), antiadherencia aumentada en un 25%.

EDM: Desviación de cavidad <±0,003 mm, precisión aumentada en un 5%.

Integración inteligente:

Sensores: MEMS (temperatura, presión), medidor de tensión (deformación), error <±0,5%.

Procesamiento de datos: chips integrados, soporte para IIoT, tasa de mantenimiento predictivo aumentada en un 20%.

Embalaje: Estuche Ti, hermeticidad <10⁻⁸ Pa·m³/s, resistencia a vibraciones 50 g.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura ±2°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación <±0,005 mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 µm/h, desviación <±0,05 µm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Forja en caliente de automóviles: WCCo+AlCrN, 1000-1200°C, 300-500 MPa.

Fundición a presión para aviación: WCCo+TiAlN, 700-800°C, 100-200 MPa.

Vidrio electrónico: WCNi+DLC, 1000-1100°C, 50-100 MPa.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 µm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: ASTM G65 (<0,03 mm³/h), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a), resistencia a la temperatura (>1000°C, <0,01 mg/cm²).

Geometría: CMM (desviación <±0,005 mm), escaneo láser (desviación de cavidad <±0,003 mm).

Inteligente: IEC 60751 (temperatura ±0,5 °C), IEC 61298 (presión ±0,1 MPa), ASTM E251 (deformación ±1 µε).

Ambiental: ISO 17879 (choque térmico, >10⁵ veces), ISO 9227 (niebla salina, 1000 horas).

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad <0,01%.

GB/T 38502015: Desviación de densidad <±0,1 g/cm³.

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 18002200 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste <0,03 mm³/h.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 17879: Ensayo de choque térmico.

ISO 9001: Gestión de calidad.

IEC 60751: Precisión de los sensores de temperatura.

IEC 61298: Precisión de los sensores de presión.

Al optimizar el grano ultrafino WC (0,20,5 μm), la fase de unión Co/Ni (612 % en peso), el recubrimiento PVD/CVD (TiAlN/AlCrN/DLC, 25 μm) y la integración de MEMS/galgas extensométricas, el molde inteligente de carburo cementado logra alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste (<0,03 mm^3/h), resistencia a la corrosión (<0,01 $\text{mm}/\text{año}$), resistencia a altas temperaturas (>1000 $^{\circ}\text{C}$) y monitorización de alta precisión (error $<\pm 0,5\%$). El molde es adecuado para forjado en caliente de automóviles, fundición a presión de aviación y moldeo de vidrio electrónico, con una vida útil 35 veces mayor, Ra 0,10,3 μm y un aumento de la eficiencia de producción del 1520 %. La optimización del tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la integración inteligente pueden reducir los costos, pero el desafío radica en el procesamiento de alta precisión (incremento del costo del 15%) y la durabilidad del sensor (>10 $\frac{1}{2}$ veces). Los moldes inteligentes de carburo son superiores a los moldes de acero H13 y cerámica y cumplen con los altos requisitos de confiabilidad de la fabricación inteligente (ISO 9001).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Piezas de robot de carburo

Las piezas de carburo cementado para robots están hechas de carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,02 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año, pH 212, conteniendo HCl, SO₄²⁻), resistencia a altas temperaturas (>800 °C, resistencia a la oxidación) y resistencia al impacto (>10⁶ veces, ISO 1791). El recubrimiento PVD/CVD (como TiN, DLC, AlCrN, 13 μm, coeficiente de fricción <0,2) se utiliza en la superficie para mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y el rendimiento de baja fricción. Los componentes se utilizan en robots industriales (articulaciones, pinzas, engranajes), robots de servicio (carcasas, piezas de transmisión) y robots especiales (aguas profundas, aeroespacial), y están sujetos a altas cargas (100-1000 N), movimientos de alta frecuencia (10⁵ - 10⁷ ciclos) y entornos extremos (40 °C a 800 °C, niebla salina, arena y polvo). La vida útil es 510 veces mayor que la de los materiales tradicionales (como acero inoxidable, aleación de aluminio, 200-600 HV), y la rugosidad de la superficie es Ra 0,05-0,2 μm.

Basado en estándares (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 1791, ISO 9001), este artículo proporciona sugerencias de diseño, proceso, rendimiento, aplicación y optimización de componentes de robot de carburo cementado.

1. Características de las piezas de robot de máquina de carburo

1.1 Composición del material de las piezas del robot de la máquina de carburo

Matriz:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino (D50 0,1 - 0,4 μm), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad (K_{IC} 1015 MPa·m^{1/2}), resistencia al impacto aumentada en un 10 %.

Ni: 612 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (HCl, SO₄²⁻ <0,01 mm/a), resistencia a la oxidación a alta temperatura.

Aditivos: Cr3C2 (0,2-0,5 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5 %;

TaC (0,1 - 0,3 % en peso) aumenta las propiedades antioxidantes en un 10 %.

revestimiento:

TiN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C, resistencia al desgaste.

DLC (PVD): dureza 2500 - 3000 HV, coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C, antiadherencia.

AlCrN (PVD): dureza 3000 - 3400 HV, resistencia a la temperatura 1100°C, resistencia a la corrosión.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), aumento del 20 % en la resistencia al desgaste, aumento del 15 % en la resistencia al agrietamiento.

1.2 Parámetros de rendimiento de las piezas del robot de la máquina de carburo

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >800°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Resistencia a los golpes: >10⁶ veces (ISO 1791, carga 100 N).

Coefficiente de fricción: <0,2 (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 25%.

Rugosidad superficial: Ra 0,05 – 0,2 μm, estabilidad de movimiento aumentada en un 20%.

1.3 Ventajas de las piezas de robot de máquina de carburo

Alta resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, vida útil aumentada 510 veces, mantenimiento reducido en un 30%.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC/AlCrN, resistente a la niebla salina/químicos, adecuado para entornos marinos/químicos.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento de AlCrN, antioxidante, adecuado para funcionamiento a alta temperatura (800 °C, robot de soldadura).

Resistencia al impacto: Co/Ni de alta tenacidad, soporta movimientos de alta frecuencia (>10⁶ veces), mejor que la aleación de aluminio.

Baja fricción: revestimiento DLC/TiN, coeficiente de fricción <0,2, eficiencia de movimiento aumentada en un 15 %.

2. Proceso de fabricación de piezas de robot de máquina de carburo

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), Cr3C2/ TaC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO2, 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula <±0,03 μm, uniformidad >99%.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación < ± 0,02 mm), densidad de la palanquilla 8,5 - 10,0 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados: Desviación dimensional $<\pm 0,03$ mm, tasa de grietas $<0,3\%$.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ <2 ppm), 10^{-3} Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, 10^{-5} - 10^{-6} Pa, 22,5 horas.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 horas.

Resultados: Densidad 14,8 - 15,0 g/cm³, porosidad $<0,0003\%$, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μ m), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica $<\pm 0,005$ mm, Ra 0,050,2 μ m.

EDM: Mecanizado por descarga eléctrica, ranura/agujero (\varnothing 0,21 mm), desviación $<\pm 0,003$ mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 μ m), 1200 rpm, Ra $<0,05$ μ m, coeficiente de fricción reducido en un 10%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivo Ti/Cr/Al, $>99,99\%$).

Parámetros: TiN /DLC/ AlCrN (13 μ m), 10^{-5} Pa, 200400 °C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 μ m /h.

Resultados: Adherencia >80 N, coeficiente de fricción $<0,2$, resistencia a la temperatura 600 – 1100°C.

2.6 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μ m), EBSD (tensión del límite de grano $<2\%$).

Rendimiento: Desviación de dureza $<\pm 30$ HV (ISO 6508), desgaste $<0,02$ mm³/h, resistencia a la corrosión ($<0,01$ mm/a).

Geometría: CMM (desviación $<\pm 0,003$ mm), escaneo láser (desviación de ranura $<\pm 0,002$ mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos $<0,005$ mm), ultrasonidos (grietas $<0,003$ mm).

Pruebas ambientales: ISO 9227 (niebla salina, 1000 horas), ISO 1791 (choque, $>10^6$ veces).

3. Escenarios de aplicación de piezas de robot de máquinas de carburo

Los componentes de robot de carburo proporcionan sugerencias de procesos, pruebas y selección para cargas elevadas, movimiento de alta frecuencia y entornos extremos:

3.1 Piezas de robot de máquina de carburo Uniones de robots industriales (robots de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

soldadura)

Condiciones de funcionamiento: 800°C, carga 500 N, 10⁶ rotaciones, ambiente seco.

diseño

Tipo: Rótula (Ø 20 mm, espesor 5 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,3 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: AlCrN (2 µm, PVD, resistencia a la temperatura 1100°C, dureza 3400 HV).

Geometría: redondez <±0,002 mm, Ra <0,1 µm.

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD AlCrN (400°C).

Parámetros: carga 500 N, velocidad de rotación 100 rpm, temperatura 800°C.

prueba:

Vida útil: 2×10⁶ veces (3×10⁵ veces para acero inoxidable, 6,7 veces más).

Tasa de desgaste: <0,01 mm³/h, coeficiente de fricción <0,15.

Resistencia a altas temperaturas: 800°C, 500 horas, sin oxidación.

Resistencia a los golpes: 500 N, 10⁶ veces, sin grietas.

Selección: WCCo+AlCrN, adecuado para alta temperatura y alta carga, NDT regular.

Ventajas: Resistencia al desgaste por altas temperaturas, estabilidad de movimiento aumentada en un 20%.

3.2 Piezas de robot de máquina de carburo Pinza de robot de servicio (robot logístico)

Condiciones: 20°C a 60°C, carga de 200 N, 10⁷ agarres, ambiente húmedo (85% HR).

diseño

Tipo: Dientes de pinza (10×5 mm, espesor 2 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 µm, Cr3C2 0,4 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: DLC (1,5 µm, PVD, coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C).

Geometría: Desviación de la punta del diente <±0,003 mm, Ra <0,05 µm.

Proceso: molienda de bolas 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), EDM, PVD DLC (250°C).

Parámetros: carga 200 N, frecuencia de agarre 1 Hz, humedad 85% HR.

prueba:

Vida útil: 1,5×10⁷ veces (2×10⁶ veces para aleación de aluminio, 7,5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Antiadherencia: tasa de fallo de agarre <1%, coeficiente de fricción <0,1.

Resistencia a la humedad: 85 % HR, 1000 horas, sin corrosión.

Selección: WCNi+DLC, adecuado para alta frecuencia en ambientes húmedos, limpieza regular.

Ventajas: baja fricción, resistencia a la corrosión, aumento del 15% en la eficiencia de agarre.

3.3 Piezas de robot de máquina de carburo Engranajes de robot especiales (robot de aguas profundas)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones: 40°C a 100°C, carga de 1000 N, 10⁶ ciclos, agua de mar (pH 8).

diseño

Tipo: Engranaje recto (Ø 30 mm, módulo 2).

Material: WC8%Ni (D50 0,1 -

0,4 µm, Cr3C2 0,4 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza 1800 HV.

Recubrimiento: TiN (2 µm, PVD, resistencia a la temperatura 800°C, dureza 2400 HV).

Geometría: Desviación del perfil del diente $\leq \pm 0,002$ mm, Ra < 0,1 µm.

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD TiN (300°C).

Parámetros: carga 1000 N, velocidad de transmisión 50 rpm, presión 100 MPa.

prueba:

Vida útil: 2×10⁶ veces (acero inoxidable 4×10⁵ veces, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,01 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Resistencia al agua de mar: pH 8, 1000 horas, sin corrosión.

Resistencia a golpes: 1000 N, 10⁶ veces, sin rotura.

Selección: WCNi+TiN, adecuado para NDT regular y de alta presión en aguas profundas.

Ventajas: resistencia a la corrosión y al desgaste, estabilidad de la transmisión aumentada en un 20%.

Comparación del rendimiento de piezas robóticas de máquinas de carburo

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Acero inoxidable (316L)	Aleación de aluminio (7075)
Dureza (HV)	1600 - 2000	200 - 300	150 - 200
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,5-0,8	0.50.7
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	50 - 70	20 - 30
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,02	0.20.5	0.30.6
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0,05 - 0,1	0,1 - 0,2
Resistencia a la temperatura (°C)	>800	300 - 500	100 - 200
Resistencia a los golpes (veces, 100 N)	>10 ⁶	10 ⁴ - 10 ⁵	10 ³ - 10 ⁴
Múltiplo de vida útil (en relación con la aleación de aluminio)	5 - 10	veintitrés	1
Coefficiente de fricción (recubrimiento)	<0,2	0,3 - 0,5	0,4 - 0,6

de máquina de carburo :

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste <0,02 mm³/h, vida útil aumentada 510 veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + DLC/TiN, resistente al agua de mar/niebla salina, mejor que el acero inoxidable.

Resistencia a altas temperaturas: revestimiento de AlCrN, antioxidante, mejor que la aleación de aluminio.

Baja fricción: revestimiento DLC, coeficiente de fricción <0,1, alta eficiencia de movimiento.

5. Sugerencias de optimización para piezas de robot de máquinas de carburo

Selección de materiales:

Junta de soldadura: WC8%Co+AlCrN, resistencia al desgaste a alta temperatura aumentada en un 15%.

Pinza logística: WC10%Ni+DLC, antiadherencia aumentada en un 20%.

Equipo de alta mar: WC8%Ni+TiN, resistencia a la corrosión aumentada en un 15%.

Aditivos: Cr3C2 0,4 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 µm), desviación <±0,005 mm, Ra <0,05 µm.

revestimiento:

AlCrN (2 µm, PVD), resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

DLC (1,5 µm, PVD), coeficiente de fricción reducido en un 10%.

TiN (2 µm, PVD), resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.

EDM: Desviación de ranura <±0,002 mm, precisión aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación <±0,003 mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 µm/h, desviación <±0,03 µm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Robot de soldadura: WCCo+AlCrN, 800°C, 500 N, ambiente seco.

Robot logístico: WCNi+DLC, 20°C a 60°C, 200 N, ambiente húmedo.

Robot de aguas profundas: WCNi+TiN, 40°C a 100°C, 1000 N, agua de mar.

6. Inspección y verificación de piezas de robots de máquinas de carburo:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 µm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a), resistencia a la temperatura (>800°C, <0,01 mg/cm²).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,003 mm), escaneo láser (desviación de ranura < ± 0,002 mm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ambiental: ISO 9227 (niebla salina, 1000 horas), ISO 1791 (choque, $>10^6$ veces).

Normas y especificaciones para piezas de robot de máquinas de carburo

GB/T 183762014: Porosidad $<0,01\%$.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $<\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Resistencia 1,8 - 2,5 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

ISO 1791: Ensayos de impacto.

ISO 9001: Gestión de calidad.

Al optimizar el grano ultrafino WC (0,1 - 0,4 μm), la fase de unión Co/Ni (6 - 12 % en peso) y el recubrimiento PVD/CVD (TiN/DLC/AlCrN, 13 μm), las piezas de robot de carburo cementado logran alta dureza (1600 - 2000 HV), resistencia al desgaste ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año}$), resistencia a altas temperaturas ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$) y resistencia al impacto ($>10^6$ veces). Las piezas son adecuadas para juntas de robots industriales, pinzas de robots de servicio y engranajes de robots especiales, con una vida útil de 510 veces, Ra 0,05 - 0,2 μm y un aumento de la eficiencia de movimiento del 15 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la precisión de la electroerosión puede reducir los costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento del costo del 10%) y las pruebas en entornos extremos (más de 10^6 veces). El carburo cementado es superior al acero inoxidable y las aleaciones de aluminio y cumple con los altos requisitos de confiabilidad de los robots (ISO 9001).

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

apéndice:

Sensor de aviación de carburo

Los sensores de aviación de carburo cementado están fabricados con carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase de unión, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (volumen de desgaste <0,02 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (<0,01 mm³/año, pH 212, con HCl, SO₄²⁻), resistencia a altas temperaturas (>800 °C, antioxidante) y resistencia a la vibración (>10⁶ veces, MILSTD810G). La superficie está recubierta con un revestimiento PVD/CVD (como TiN, Al₂O₃, 13 μm, coeficiente de fricción <0,2) o un revestimiento funcional (Au, Ag, 0,52 μm, conductividad >90 % IACS) para mejorar la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y las propiedades eléctricas. El sensor se utiliza en campos aeroespaciales (como la monitorización de motores, el control de vuelo y la monitorización de la salud estructural), soporta entornos extremos (55 °C a 800 °C, 10100 g de vibración, 10⁵ - 10⁷ ciclos), proporciona datos de alta precisión (error <±0,5 %) y tiene una vida útil 510 veces superior a la de los materiales tradicionales (como acero inoxidable o aleación de titanio, 400-600 HV), con una rugosidad superficial de Ra 0,05-0,2 μm.

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, MILSTD810G, AS9100), este artículo proporciona sugerencias sobre tecnología, rendimiento, aplicación y optimización de los sensores de aviación de carburo cementado.

1. Características de los sensores de aviación de carburo cementado

1.1 Composición del material de los sensores de aviación de carburo cementado

Matriz:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino (D50 0,1 - 0,4 μm), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad (K_{IC} 10 - 15 MPa·m^{1/2}), resistencia a la vibración aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistencia a la corrosión (HCl, SO₄²⁻ <0,01 mm/a), resistencia a la oxidación a alta temperatura.

Aditivos: Cr₃C₂ (0,2 - 0,5 % en peso), inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5 %; TaC (0,1 - 0,3 % en peso), aumenta las propiedades antioxidantes en un 10 %.

revestimiento:

TiN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, resistencia a la temperatura 800°C, resistencia al desgaste.

Al₂O₃ (CVD): dureza 1800 - 2200 HV, resistencia a la temperatura 1000°C, resistencia a la corrosión.

Au/Ag (PVD): conductividad >90% IACS, resistencia a temperaturas 500 - 600 °C, antioxidación.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), resistencia al desgaste aumentada en un 20 %, resistencia al agrietamiento aumentada en un 15 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Parámetros de rendimiento de los sensores de aviación de carburo cementado

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >800°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Resistencia a la vibración: >10⁶ veces (10100 g, MILSTD810G).

Conductividad eléctrica: >90% IACS (recubrimiento Au/Ag, IEC 6051221).

Precisión de la medición: error <±0,5% (temperatura, presión, deformación).

Rugosidad superficial: Ra 0,050,2 μm, estabilidad de la señal aumentada en un 20%.

1.3 Ventajas de los sensores de aviación de carburo cementado

Alta resistencia al desgaste: revestimiento WC+ de grano ultrafino, la vida útil aumenta 510 veces y la tasa de fallas se reduce en un 30%.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiN / Al₂O₃, antioxidante, adecuado para entornos de alta temperatura (800 °C, motor).

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Al₂O₃, resistente al combustible de aviación/niebla salina, adecuado para entornos hostiles.

Resistencia a la vibración: Co/Ni de alta tenacidad, soporta vibraciones de alta frecuencia (>10⁶ veces), mejor que la aleación de titanio.

Alta precisión: recubrimiento de baja fricción + mecanizado de precisión, error de datos <±0,5%, atenuación de señal reducida en un 15%.

2. Proceso de fabricación de sensores de aviación de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,51 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 15:1), 400 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula <±0,03 μm, uniformidad >99%.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación <± 0,02 mm), densidad de la palanquilla 8,5 - 10,0 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional <±0,03 mm, tasa de grietas <0,3%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 horas.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Resultados: Densidad 14,8 - 15,0 g/cm³, porosidad <0,0003%, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 µm), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica <±0,005 mm, Ra 0,05 - 0,2 µm.

EDM: Mecanizado por electrochispa, microagujeros/ranuras (Ø 0,1-0,5 mm), desviación <±0,003 mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 µm), 1200 rpm, Ra <0,05 µm, estabilidad de la señal aumentada en un 10%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivos Ti/Al/Au/Ag, >99,99%).

Parámetros: TiN / Al₂O₃ /Au/Ag (13 µm), 10⁻⁵Pa, 200400 °C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 µm/h.

Resultados: Adherencia >80 N, coeficiente de fricción <0,2, conductividad >90% IACS.

2.6 Integración de sensores

Elementos sensores: MEMS (basados en silicio, tamaño <0,5 mm) o extensómetros (NiCr, 0,01 mm de espesor), que controlan la temperatura (±0,5 °C), la presión (±0,1 MPa) y la deformación (±1 µε).

Embalaje: Soldadura láser (cubierta de Ti, hermeticidad <10⁻⁸ Pa·m³/s), resistencia a la temperatura 800°C, resistencia a la vibración 100 g.

Transmisión de datos: módulo 5G/Bluetooth, latencia <5 ms, consumo de energía <30 mW.

2.7 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 µm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: Desviación de dureza <±30 HV (ISO 6508), desgaste <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,003 mm), escaneo láser (desviación de ranura < ± 0,002 mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos < 0,005 mm), ultrasonidos (grietas < 0,003 mm).

Pruebas ambientales: MILSTD810G (55 °C a 800 °C, vibración de 100 g, 10⁶ ciclos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propiedades eléctricas: conductividad >90% IACS, error de señal $\leq \pm 0,5\%$ (IEC 6051221).

3. Escenarios de aplicación de los sensores de aviación de carburo cementado

Los sensores de aviación de carburo brindan sugerencias de procesos, pruebas y selección para entornos extremos y requisitos de alta precisión:

3.1 Sensor de aviación de carburo para monitoreo del motor (sensor de temperatura y presión)

Condiciones: 800°C, 50 MPa, 100 g de vibración, entorno de combustible de aviación, 10^6 ciclos.
diseño

Tipo: Sensor de presión/temperatura MEMS (\varnothing 10 mm, espesor 2 mm).

Material: WC8%Co (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,3 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: Al₂O₃ (2 μm , CVD, resistencia a la temperatura 1000°C, resistencia a la corrosión).

Geometría: Desviación de planaridad $\leq \pm 0,002$ mm, Ra $< 0,05$ μm .

Procesos: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas),
rectificado de 5 ejes, CVD Al₂O₃ (400°C), integración MEMS, soldadura láser.

Parámetros: temperatura 800°C, presión 50 MPa, vibración 100 g, frecuencia de muestreo 1 kHz.

prueba:

Vida útil: 2×10^6 veces (aleación de titanio 3×10^5 veces, 6,7 veces más).

Tasa de desgaste: $< 0,01$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.

Precisión: error de temperatura $\pm 0,5$ °C, error de presión $\pm 0,1$ MPa.

Resistencia a la vibración: 100 g, 10^6 veces, sin fallos.

Selección: WCCo+Al₂O₃, adecuado para alta temperatura y alta presión, NDT regular.

Ventajas: resistencia a la corrosión a altas temperaturas, alta precisión y aumento del 10% en la eficiencia del motor.

3.2 Monitoreo de la salud estructural de sensores de aviación de carburo cementado (sensores de deformación)

Condiciones de funcionamiento: 55°C a 200°C, vibración de 10 g, niebla salina (5% NaCl), 10^7 ciclos.

diseño

Tipo: Sensor de galgas extensométricas (5×3 mm, espesor 0,5 mm).

Material: WC10%Ni (D50 0,1 - 0,4 μm , Cr3C2 0,4 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: TiN (1 μm , PVD, resistente a temperaturas de hasta 800 °C, resistente al desgaste).

Geometría: Desviación de la superficie $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μm .

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas),
EDM, PVD TiN (250°C), montaje de galgas extensométricas, soldadura láser.

Parámetros: deformación ± 5000 μe , vibración 10 g, frecuencia de muestreo 500 Hz.

prueba:

Vida útil: $1,5 \times 10^7$ veces (acero inoxidable 2×10^6 veces, 7,5 veces más).

Pérdida por desgaste: $< 0,02$ mm³/h, resistencia a la niebla salina 1000 horas, aumento de resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<5%.

Precisión: error de deformación $\pm 1 \mu\epsilon$, atenuación de señal <0,1%.

Resistencia a la vibración: 10 g, 10^7 veces, sin fallos.

Selección: WCNi+TiN, adecuado para corrosión a baja temperatura, limpieza regular.

Ventajas: Anticorrosión por vibración, adecuado para monitoreo de alas/fuselaje, seguridad aumentada en un 15%.

3.3 Control de vuelo con sensor de aviación de carburo (sensor magnético)

Condiciones de funcionamiento: 40°C a 150°C, vibración de 20 g, ambiente seco, 10^6 ciclos.
diseño

Tipo: Sensor magnético de efecto Hall (\varnothing 3 mm, espesor 1 mm).

Material: WC8%Co1%Ag (D50 0,10,4 μm , Cr3C2 0,3 % en peso), dureza 1800 HV.

Recubrimiento: Au (0,5 μm , PVD, conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 600°C).

Geometría: Redondez $\leq \pm 0,002$ mm, Ra <0,05 μm .

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado de 5 ejes, PVD Au (200°C), integración de elementos Hall, soldadura láser.

Parámetros: campo magnético 0500 mT, vibración 20 g, frecuencia de muestreo 2 kHz.

prueba:

Vida útil: 2×10^6 veces (aleación de titanio 4×10^5 veces, 5 veces más).

Pérdida por desgaste: <0,01 mm³/h, resistencia de contacto <8 $\mu\Omega$.

Precisión: error de campo magnético $\pm 0,1$ mT, estabilidad de la señal $\pm 0,5\%$.

Resistencia a la vibración: 20 g, 10^6 veces, sin fallos.

Selección: WCCo+Au, adecuado para entornos secos de alta conductividad, detección de resistencia regular.

Ventajas: Conductividad de alta precisión, adecuada para navegación/control de actitud y confiabilidad un 20% mayor.

4. Comparación del rendimiento de los sensores de aviación de carburo cementado

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de titanio (Ti6Al4V)	Acero inoxidable (316L)
Dureza (HV)	1600 - 2000	300 - 400	200 - 300
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,9 - 1,2	0,5 - 0,8
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	40 - 60	50 - 70
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,02	0.10.3	0.20.5
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Resistencia a la temperatura (°C)	>800	400 - 600	3005-00
Resistencia a la vibración (veces, 100 g)	> 10^6	$10^5 - 10^6$	$10^4 - 10^5$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de titanio (Ti6Al4V)	Acero inoxidable (316L)
Vida útil múltiple (en relación con el acero inoxidable)	5 - 10	veintitrés	1
Conductividad eléctrica (% IACS)	>90	12	veintitrés

Aspectos destacados de los sensores de aviación de carburo:

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste <0,02 mm³/h, vida útil aumentada 510 veces.

Resistencia a la temperatura: recubrimiento TiN / Al₂O₃, antioxidante, mejor que la aleación de titanio.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + Al₂O₃, resistente a la niebla salina/combustible, mejor que el acero inoxidable.

Alta precisión: baja fricción + mecanizado de precisión, error <±0,5%, mejor que los materiales tradicionales.

5. Sugerencias de optimización para sensores de aviación de carburo cementado

Selección de materiales:

Monitoreo del motor: WC8%Co+Al₂O₃, resistencia a la corrosión a alta temperatura aumentada en un 15%.

Monitoreo de la salud estructural: WC10%Ni+TiN, resistencia a la corrosión por vibración aumentada en un 20%.

Control de vuelo: WC8%Co+Au, conductividad>95% IACS, precisión aumentada en un 10%.

Aditivos: Cr₃C₂ 0,4 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,0003%, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación <±0,005 mm, Ra <0,05 μm.

revestimiento:

Al₂O₃ (2 μm, CVD), resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

TiN (1 μm, PVD), resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

Au (0,5 μm, PVD), resistencia de contacto reducida en un 10%.

EDM: Desviación de microagujeros <±0,002 mm, precisión aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura ±1°C, 10⁻⁶ Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación <±0,003 mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 μm/h, desviación <±0,03 μm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Motor: WCCo + Al₂O₃ , 800 °C, 50 MPa, 100 g de vibración.

Monitoreo de estructura: WCNi+TiN, 55°C a 200°C, vibración de 10 g, niebla salina.

Control de vuelo: WCCo+Au, 40°C a 150°C, 20 g de vibración, ambiente seco.

6. Prueba y verificación de sensores de aviación de aleación dura:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: ASTM G65 (<0,02 mm³/h), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/a), resistencia a la temperatura (>800°C, <0,01 mg/cm²).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,003 mm), escaneo láser (desviación de ranura < ± 0,002 mm).

Entorno: MILSTD810G (55 °C a 800 °C, 100 g, 10⁶ veces).

Propiedades eléctricas: conductividad>90% IACS, error<±0,5% (IEC 6051221).

7. Normas y especificaciones para sensores de aviación de aleación dura

GB/T 183762014: Porosidad <0,01%.

GB/T 38502015: Desviación de densidad <±0,1 g/cm³.

GB/T 38512015: Resistencia 1,82,5 GPa .

GB/T 79972017: Dureza 16002000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

MILSTD810G: Adaptabilidad ambiental (vibración, temperatura, corrosión).

AS9100: Gestión de calidad aeroespacial.

IEC 6051221: Resistencia de contacto <10 μΩ .

Al optimizar el grano ultrafino WC (0,10,4 μm), la fase de unión Co/Ni (612 % en peso), el recubrimiento PVD/CVD (TiN/Al₂O₃/Au, 13 μm) y la integración de MEMS/galgas extensométricas, los sensores de aviación de carburo cementado alcanzan alta dureza (1600-2000 HV), resistencia al desgaste (<0,02 mm³/h), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), resistencia a altas temperaturas (>800 °C) y alta precisión (error <±0,5 %). El sensor es adecuado para la monitorización de motores, la monitorización de la salud estructural y el control de vuelo, con una vida útil 510 veces mayor, Ra 0,050,2 μm y una fiabilidad de los datos aumentada en un 20 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la integración de MEMS puede reducir costos, pero los desafíos residen en el mecanizado de ultraprecisión (incremento de costo del 10%) y las pruebas en entornos extremos (>10⁶ veces). El carburo cementado es superior a la aleación de titanio y al acero inoxidable, y cumple con los estrictos requisitos de la industria aeroespacial (AS9100, MILSTD810G).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

apéndice:

Herramientas de corte de carburo inteligentes

Las herramientas de carburo inteligentes están fabricadas con carburo de tungsteno (WC) como matriz (88-94 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm}^3/\text{año}$, pH 212, con contenido de HCl, SO_4^{2-}) y resistencia a altas temperaturas ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$, resistencia a la oxidación). La superficie está recubierta con revestimiento PVD/CVD (como DLC, TiAlN, AlCrN, $25 \mu\text{m}$, coeficiente de fricción $<0,15$), integrado con detección inteligente (temperatura, desgaste, tensión) y control adaptativo (optimización de parámetros de corte), que mejora la eficiencia de procesamiento en un 20-30%, y la vida útil es 35 veces más larga que la de las herramientas tradicionales (acero inoxidable, 400-600 HV), con una rugosidad superficial de $R_a 0,10,2 \mu\text{m}$. La herramienta se utiliza para procesamiento de alta precisión (aeroespacial, automóvil, molde), adecuada para corte de alta velocidad (1000-5000 rpm), corte seco/húmedo y materiales difíciles de procesar (aleación de titanio, aleación a base de níquel). Basado en estándares (GB/T 7997, ASTM G65, ISO 6508), este artículo proporciona herramientas de carburo inteligentes, procesos, rendimiento, aplicaciones y sugerencias de optimización.

1. Características de las herramientas de carburo inteligentes

1.1 Composición del material de la herramienta de carburo inteligente

Matriz:

WC: 88 - 94 % en peso, grano ultrafino (D50 0,2 - 0,5 μm), dureza 1800 - 2200 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad ($K_{IC} 15 - 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), resistencia al desgaste aumentada en un 10 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistente a la corrosión (HCl, $\text{SO}_4^{2-} <0,01 \text{ mm/y}$), resistente al impacto ($K_{IC} 12 - 15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Aditivos: Cr₃C₂ (0,3 - 0,6 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 6 %; TaC (0,1 - 0,3 % en peso) aumenta las propiedades antioxidantes en un 10 %.

revestimiento:

DLC (PVD): dureza 3000 - 3500 HV, coeficiente de fricción $<0,1$, resistencia a la temperatura 600°C , antiadherencia.

TiAlN (PVD/CVD): dureza 2800 - 3200 HV, resistencia a la temperatura 1050°C , resistencia a la erosión.

AlCrN (PVD): dureza 3000 - 3400 HV, resistencia a la temperatura 1100°C , resistencia al desgaste a altas temperaturas.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni en la superficie (6-8 % en peso), alto contenido de Co/Ni en el núcleo (10-12 % en peso), resistencia al desgaste aumentada en un 25 %, resistencia al agrietamiento aumentada en un 20 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1.2 Funciones inteligentes de la herramienta de carburo inteligente

Sensores: Micro sensores integrados (MEMS, tamaño < 0,5 mm) que controlan la temperatura (± 1 °C, 0500 °C), el desgaste ($\pm 0,01$ mm) y la tensión (± 5 MPa).

Transmisión de datos: módulo Bluetooth/5G, transmisión en tiempo real al sistema CNC, retraso <10 ms.

Control adaptativo: el algoritmo de IA (aprendizaje automático, basado en datos de desgaste y temperatura) ajusta dinámicamente la velocidad de corte (± 10 %) y la velocidad de avance (± 15 %), optimizando la eficiencia entre un 20 y un 30 %.

Predicción de vida: Basándose en el modelo de desgaste (modelo Archard), se predice la vida útil restante (± 5 % de error), reduciendo el tiempo de inactividad en un 30%.

1.3 Parámetros de rendimiento de las herramientas de carburo inteligentes

Dureza: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 2,0 - 2,8 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1220 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1520, a base de Ni 1215).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,03 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, <0,01 mm/a (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: >1000°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 1000 horas).

Coefficiente de fricción: <0,15 (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 30%.

Rugosidad de la superficie: Ra 0,10,2 μm, la calidad de la superficie de procesamiento aumentó en un 15%.

1.4 Ventajas de las herramientas de carburo inteligentes

Alta resistencia al desgaste: revestimiento WC+ de grano ultrafino, la vida útil aumenta 35 veces y la eficiencia de corte aumenta un 20 %.

Resistencia a la corrosión: Las herramientas a base de Ni son resistentes a ácidos y álcalis (HCl, SO₄²⁻) y son adecuadas para corte húmedo.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiAlN / AlCrN, resistente al agrietamiento térmico, adecuado para corte en seco de alta velocidad.

Inteligencia: Monitoreo en tiempo real + control adaptativo, reduciendo la tasa de desperdicio en un 15% y ahorrando energía en un 1020%.

2. Proceso inteligente de fabricación de herramientas de carburo

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,2 - 0,5 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,5 - 1 μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Molienda de bolas: molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 12:1), 350 rpm, 1822 horas, desviación del tamaño de partícula $\leq \pm 0,05 \mu\text{m}$, uniformidad $>98\%$.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 300 - 350 MPa, presión de mantenimiento 90 segundos, molde de aleación de titanio (desviación $< \pm 0,03 \text{ mm}$), densidad de la pieza 9,0 - 10,5 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, tasa de grietas $<0,5\%$.

2.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 600°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ $<3 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Sinterización: 1400 - 1450°C, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 2,53 horas.

HIP: 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 horas.

Resultados: Densidad 15,0 - 15,2 g/cm³, porosidad $<0,0005\%$, dureza 1800 - 2200 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (24 μm), 4000 rpm, avance 0,005 - 0,02 mm/pasada, desviación geométrica $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra 0,10,2 μm .

EDM: Mecanizado por descarga eléctrica, ranura/agujero ($\varnothing 0,52 \text{ mm}$), desviación $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,51 μm), 1000 rpm, Ra $<0,1 \mu\text{m}$, antiadherencia aumentada en un 25%.

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivo Cr/Al/Ti, $>99,99\%$).

Parámetros: DLC/ TiAlN / AlCrN (25 μm), 10^{-5} Pa , 250 - 450 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m} / \text{h}$.

Resultados: Adherencia $>100 \text{ N}$, coeficiente de fricción $<0,15$, resistencia a la temperatura 600 – 1100°C.

2.6 Integración inteligente

Incorporación de sensores: micromecanizado láser (profundidad de ranura 0,51 mm), implantación de sensores MEMS (temperatura, tensión, desgaste), sellado con resina epoxi (resistencia a temperatura 500°C).

Integración de circuitos: circuitos de película delgada (0,1 mm de espesor), módulos 5G/Bluetooth, consumo de energía $<50 \text{ mW}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Software: Algoritmo de IA (Python, TensorFlow), optimización en tiempo real de los parámetros de corte, almacenamiento de datos en la nube (cifrado, AES256).

2.7 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: Desviación de dureza < ± 40 HV (ISO 6508), desgaste <0,03 mm^3/h , resistencia a la corrosión (pH 212, <0,01 mm/a).

Geometría: CMM (desviación < $\pm 0,005$ mm), escaneo láser (radio del borde < $\pm 0,003$ mm).

Funciones inteligentes: precisión del sensor (temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, desgaste $\pm 0,01$ mm), retardo de transmisión <10 ms.

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos <0,01 mm), ultrasonidos (grietas <0,005 mm).

3. Escenarios de aplicación de respuesta inteligente de herramientas de carburo inteligentes

Las herramientas de carburo inteligentes brindan sugerencias de selección, pruebas, procesos y mecanizado de alta precisión:

3.1 Aeroespacial (procesamiento de aleaciones de titanio)

Condiciones de trabajo: Ti6Al4V, 2000 rpm, 200°C , corte en seco, profundidad de corte 12 mm.

Tipo: Fresa (\varnothing 20 mm, 4 flautas).

Material: WC8%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: TiAlN (4 μm , dureza 3200 HV, fricción 0,12, resistencia a la temperatura 1050°C).

Inteligencia: sensores MEMS (temperatura, desgaste), optimización IA (velocidad de corte $\pm 10\%$).

Geometría: ángulo del filo de corte 15° , radio del filo de corte <0,01 mm, Ra <0,1 μm .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), rectificado de 5 ejes, PVD TiAlN (400°C), incrustación de sensor láser.

Parámetros: velocidad 2000 rpm, avance 0,1 mm/r, profundidad de corte 1,5 mm.

prueba:

Vida útil: 800 horas (200 horas para herramientas tradicionales, 4 veces más).

Pérdida por desgaste: <0,02 mm^3/h , calidad de superficie Ra 0,2 μm .

Eficiencia: El tiempo de procesamiento se redujo en un 25% y la tasa de desperdicio se redujo en un 15%.

Inteligente: control de temperatura < 200°C , predicción de desgaste $\pm 5\%$.

Selección: WCCo+TiAlN, adecuado para alta temperatura, alta dureza, corte en seco y NDT regular.

Ventajas: Resistencia a altas temperaturas, optimización inteligente y aumento del 20% en la eficiencia.

3.2 Molde de automóvil (procesamiento de acero de alta velocidad)

Condiciones de trabajo: acero H13, 3000 rpm, 150°C , corte húmedo (emulsión al 5%), profundidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de corte 0,51 mm.

Tipo: Herramienta de torneado (de un solo filo, estándar ISO).

Material: WC10%Co (D50 0,2 - 0,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: DLC (3 μm , dureza 3500 HV, fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C).

Inteligente: sensores MEMS (desgaste, tensión), IA ajusta la velocidad de alimentación ($\pm 15\%$).

Geometría: ángulo del filo de corte 20°, radio del filo de corte <0,01 mm, Ra <0,1 μm .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), rectificado de 5 ejes, PVD DLC (250°C), incorporación de sensores.

Parámetros: velocidad 3000 rpm, avance 0,08 mm/r, profundidad de corte 0,8 mm.

prueba:

Vida útil: 1200 horas (300 horas para herramientas tradicionales, 4 veces más).

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Calidad de la superficie: Ra 0,15 μm , precisión $\pm 0,005$ mm.

Inteligencia: Control de estrés <500 MPa, tiempo de inactividad reducido en un 30%.

Selección: WCCo+DLC, adecuado para corte húmedo, alta precisión y limpieza regular.

Ventajas: baja fricción, antiadherencia, aumento del 15% en la precisión de procesamiento.

3.3 Procesamiento de aleaciones a base de níquel (álabes de turbinas de gas)

Condiciones de trabajo: Inconel 718, 1500 rpm, 400°C, corte en seco, profundidad de corte 13 mm.

Tipo: Broca (\varnothing 10 mm, doble filo).

Material: WC8%Ni (D50 0,2 - 0,5 μm , TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: AlCrN (5 μm , dureza 3400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1100°C).

Inteligencia: sensores MEMS (temperatura, desgaste), IA optimiza los parámetros de corte.

Geometría: ángulo del filo de corte 30°, radio del filo de corte <0,01 mm, Ra <0,1 μm .

Proceso: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa), EDM (desviación del orificio $\pm 0,005$ mm), PVD AlCrN (450°C), incrustación de sensores.

Parámetros: velocidad 1500 rpm, avance 0,05 mm/r, profundidad de corte 2 mm.

prueba:

Vida útil: 600 horas (150 horas para herramientas tradicionales, 4 veces más).

Tasa de desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la oxidación <0,01 mg/cm².

Eficiencia: El tiempo de procesamiento se redujo en un 20% y la tasa de desperdicio se redujo en un 10%.

Inteligente: Control de temperatura <400°C, predicción de vida $\pm 5\%$.

Selección: WCNi+AlCrN, adecuado para materiales de alta temperatura, difíciles de cortar, corte en seco y NDT regulares.

Ventajas: Resistencia a altas temperaturas, control inteligente reduce el agrietamiento térmico en un 15%.

4. Comparación del rendimiento de herramientas de carburo inteligentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Carburo inteligente (WCCo/Ni)	Carburo cementado tradicional	cuchillos de acero inoxidable
Dureza (HV)	1800 - 2200	1600 - 2000	400 - 600
Resistencia a la flexión (GPa)	2.0 - 2.8	1.8 - 2.5	1.5 - 2.0
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	12-20	10 - 15	50100
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,03	0,05 - 0,1	0,1 - 0,3
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0,02 - 0,05	0,05 - 0,1
Resistencia a la temperatura (°C)	>1000	800 - 1000	400 - 800
Vida útil múltiple (en relación con el acero inoxidable)	3 - 5	veintitrés	1
Coefficiente de fricción (recubrimiento)	<0,15	0,2 - 0,3	0,3 - 0,5
Funciones inteligentes	Monitorización en tiempo real + autoadaptación	ninguno	ninguno

Características destacadas de la herramienta de carburo inteligente:

Función inteligente: monitoreo en tiempo real + optimización de IA, eficiencia aumentada en un 2030%, tasa de desperdicio reducida en un 15%.

Resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, desgaste <0,03 mm³/h, vida útil aumentada 35 veces.

Recubrimiento: DLC antiadherencia (corte húmedo), TiAlN/AlCrN antialta temperatura (corte seco).

Resistencia a la corrosión: El acero a base de Ni es mejor que el acero a base de Co y es adecuado para corte húmedo (pH 212).

5. Sugerencias de optimización inteligente para herramientas de carburo inteligentes

Selección de materiales:

Aleación de titanio: WC8%Co+TiAlN, resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

Acero para moldes: WC10%Co+DLC, antiadherencia aumentada en un 25%.

Aleación a base de níquel: WC8%Ni+AlCrN, resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.

Aditivos: Cr3C2 0,6 % en peso, TaC 0,3 % en peso, dureza aumentada en un 6 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1400°C, 150 MPa, porosidad <0,0005%, resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (24 μm), desviación $<\pm 0,01$ mm, Ra $<0,1$ μm .

revestimiento:

DLC (3 μm , 250°C), antiadherencia aumentada en un 25%.

TiAlN (4 μm , 400°C), resistencia a altas temperaturas aumentada en un 15%.

AlCrN (5 μm , 450°C), resistencia a la erosión aumentada en un 20%.

Integración inteligente: sensores MEMS (precisión $\pm 1^\circ\text{C}$), transmisión 5G (latencia <10 ms).

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación $<\pm 0,005$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $<\pm 0,05$ μm .

Procesamiento láser: desviación de la ranura del sensor $<\pm 0,01$ mm.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Aeroespacial: WCCo+TiAlN, 2000 - 5000 rpm, corte en seco.

Molde de automóvil: WCCo+DLC, 1000 – 3000 rpm, corte húmedo.

Aleación a base de níquel: WCNi+AlCrN, 1000 – 2000 rpm, corte en seco.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,2 - 0,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano $<3\%$).

Rendimiento: ASTM G65 ($<0,03$ mm^3/h), resistencia a la corrosión (pH 212, $<0,01$ mm/a), resistencia a la temperatura ($>1000^\circ\text{C}$, $<0,01$ mg/cm^2).

Geometría: CMM (desviación $<\pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación del borde $<\pm 0,003$ mm).

Inteligente: Precisión del sensor (temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, desgaste $\pm 0,01$ mm), error de predicción de IA $<5\%$.

6. Normas y especificaciones para herramientas de carburo inteligentes

GB/T 183762014: Porosidad $<0,01\%$.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $<\pm 0,1$ g/cm^3 .

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa.

GB/T 79972017: Dureza 1800 - 2200 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste $<0,03$ mm^3/h .

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

ISO 6508: Desviación de dureza $<\pm 40$ HV.

ISO 1832: Norma para geometría de herramientas.

Las herramientas de carburo inteligentes alcanzan alta dureza (1800 - 2200 HV), resistencia al desgaste ($<0,03$ mm^3/h), resistencia a la corrosión (pH 212, $<0,01$ mm/año) y resistencia a altas temperaturas ($>1000^\circ\text{C}$) mediante la optimización del grano ultrafino WC (0,2 - 0,5 μm), fase de unión Co/Ni (6 - 12 % en peso), recubrimiento PVD/CVD (DLC/TiAlN/AlCrN, 25 μm) e integración inteligente (sensor MEMS, control AI). Las herramientas son adecuadas para la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

industria aeroespacial (aleación de titanio), moldes automotrices (acero H13), turbinas de gas (aleaciones a base de níquel), con una vida útil aumentada 35 veces, Ra 0,1 - 0,2 μm , una eficiencia aumentada entre un 20 % y un 30 % y una tasa de desperdicio reducida en un 15 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la precisión del sensor puede reducir los costos. Los desafíos residen en el procesamiento de alta precisión (incremento del costo del 15%) y la estabilidad del sistema inteligente (retardo 5G <10 ms).

apéndice:

Contactos electrónicos de carburo

Los contactos electrónicos de carburo cementado están hechos de carburo de tungsteno (WC) como matriz (85-92 % en peso), combinado con Co (6-10 % en peso) o Ni (6-12 % en peso) como fase aglutinante, y se preparan mediante pulvimetalurgia (molido de bolas, CIP, sinterización HIP). Presentan alta dureza (1600-2000 HV), excelente resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,02 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión por arco eléctrico (<0,01 mm/año, IEC 60068220), baja resistencia de contacto (<10 μΩ, IEC 6051221) y alta resistencia a la temperatura (>800 °C, resistencia a la oxidación). El recubrimiento PVD (como Au, Ag, Ni, 0,52 μm, coeficiente de fricción <0,2) o galvanoplastia (Au 0,1 - 0,5 μm) se aplica en la superficie para mejorar la conductividad (>90% IACS) y la resistencia a la oxidación. Los contactos son adecuados para conmutación de alta frecuencia (>10⁶ veces), relés, conectores y sistemas de gestión de baterías de vehículos de nueva energía (BMS). Pueden soportar alta corriente (10 - 100 A), alto voltaje (100 - 1000 V) e impacto cíclico. La vida útil es 51 - 0 veces más larga que la de la aleación de cobre (CuBe, 200 - 400 HV), y la rugosidad de la superficie es Ra 0,05 - 0,2 μm.

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, IEC 60512), este artículo proporciona sugerencias de diseño, proceso, rendimiento, aplicación y optimización de contactos electrónicos de carburo cementado.

1. Características de los contactos electrónicos de carburo cementado

1.1 Composición de materiales de contacto electrónicos de carburo cementado

Matriz:

WC: 85 - 92 % en peso, grano ultrafino (D50 0,10,4 μm), dureza 1600 - 2000 HV.

Co: 6 - 10 % en peso, alta tenacidad ($K_{IC} 101 - 5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), conductividad aumentada en un 5 %.

Ni: 6 - 12 % en peso (opcional), resistente a la corrosión (HCl, SO₄²⁻ <0,01 mm/y), resistente al arco.

Aditivos: Ag (13 % en peso), conductividad aumentada en un 10 %; Cr₃C₂ (0,20,5 % en peso), dureza aumentada en un 5 %.

Tratamiento de superficie:

Au (PVD/galvanoplastia): conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 600°C, antioxidación.

Ag (PVD): conductividad >98% IACS, resistencia a la temperatura 500°C, resistencia al arco.

Ni (PVD): dureza 800 - 1000 HV, resistencia a la temperatura 700°C, resistencia a la corrosión.

Estructura de gradiente: alto Ag/Ni (2 - 5 % en peso) en la superficie, alto Co/Ni (8 - 12 % en peso) en el núcleo, conductividad aumentada en un 15 %, resistencia al desgaste aumentada en un 20 %.

1.2 Parámetros de rendimiento de los contactos electrónicos de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureza: 1600 - 2000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 - 2,5 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2} (a base de Co 1215, a base de Ni 1012).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión por arco: <0,01 mm/y (IEC 60068220, 10⁶ tiempos de conmutación).

Resistencia de contacto: <10 μΩ (IEC 6051221).

Conductividad eléctrica: >90% IACS (recubrimiento Au/Ag).

Resistencia a altas temperaturas: >800°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Coefficiente de fricción: <0,2 (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 25%.

Rugosidad superficial: Ra 0,05 – 0,2 μm, estabilidad de contacto aumentada en un 20%.

1.3 Ventajas de los contactos electrónicos de carburo

Alta resistencia al desgaste: revestimiento WC+ de grano ultrafino, vida útil aumentada 510 veces, falla de contacto reducida en un 30%.

Resistencia al arco: Recubrimiento a base de Ni + Ag/Au, antierosión del arco, adecuado para conmutación de alta frecuencia.

Baja resistencia: recubrimiento de Au/Ag, resistencia de contacto <10 μΩ, atenuación de señal reducida en un 15%.

Resistencia a altas temperaturas: antioxidante, adecuado para entornos de alta temperatura (600-800 °C, BMS, relé).

Estabilidad: baja fricción + alta dureza, fuerza de contacto estable (±5%) y aumento del 20% en el rendimiento del ciclo.

2. Proceso de fabricación de contactos electrónicos de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,1 - 0,4 μm, pureza >99,95%), Co/Ni (D50 0,5 - 1 μm), Ag/Cr3C2 (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 15:1), 400 rpm, 16 - 20 horas, desviación del tamaño de partícula < ± 0,03 μm, uniformidad > 99%.

2.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo de precisión.

Parámetros: 250 - 300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero de tungsteno (desviación < ± 0,02 mm), densidad de la palanquilla 8.510,0 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional <±0,03 mm, tasa de grietas <0,3%.

2.3 Sinterización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200 - 500°C, 2°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ <2 ppm), 10⁻³ Pa .

Sinterización: 1350 - 1400°C, 10⁻⁵ - 10⁻⁶ Pa, 22,5 horas.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 h.

Resultados: Densidad 14,8 - 15,0 g/cm³, porosidad <0,0003%, dureza 1600 - 2000 HV.

2.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), 5000 rpm, avance 0,003 - 0,01 mm/pasada, desviación geométrica <±0,005 mm, Ra 0,050,2 μm.

EDM: Mecanizado por electrochispa, ranura/agujero de contacto (Ø 0,21 mm), desviación <±0,003 mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,30,5 μm), 1200 rpm, Ra <0,05 μm, resistencia de contacto reducida en un 10%.

2.5 Tratamiento de superficies

Método: PVD (objetivo Au/Ag/Ni, >99,99%) o galvanoplastia (Au 0,10,5 μm).

Parámetros: Au/Ag/Ni (0,52 μm), 10⁻⁵ Pa, 200300 °C, polarización 80 V, velocidad de deposición 0,51 μm/h; Au galvanizado (densidad de corriente 12 A/dm²).

Resultados: Adherencia >80 N, Coeficiente de fricción <0,2, Conductividad eléctrica >90% IACS.

2.6 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano <2%).

Rendimiento: Desviación de dureza <±30 HV (ISO 6508), desgaste <0,02 mm³/h, resistencia de contacto <10 μΩ, resistencia al arco (<0,01 mm/y, 10⁶ veces).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,003 mm), escaneo láser (desviación de ranura < ± 0,002 mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos < 0,005 mm), ultrasonidos (grietas < 0,003 mm).

Propiedades eléctricas: resistencia de contacto (<10 μΩ, IEC 6051221), tensión soportada (>1000 V, IEC 606641).

3. Escenarios de aplicación de los contactos electrónicos de carburo cementado

Para escenarios de alta frecuencia, alta corriente y alta confiabilidad, los contactos electrónicos de carburo brindan sugerencias de proceso, prueba y selección:

3.1 Relé de alta frecuencia de contacto electrónico de aleación dura (BMS de vehículos de nueva energía)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones: 100 A, 400 V, 10^6 ciclos, 85°C, humedad (85% HR).

Diseño:

Tipo: Contacto plano (\varnothing 5 mm, 1 mm de espesor).

Material: WC8%Co2%Ag (D50 0,10,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en peso), dureza 1800 HV.

Recubrimiento: Au (0,5 μ m, galvanoplastia, conductividad >95% IACS, resistencia a la temperatura 600°C).

Geometría: Desviación de planaridad $\leq \pm 0,002$ mm, Ra <0,05 μ m.

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda de 5 ejes, galvanoplastia de Au (0,5 μ m).

Parámetros: corriente 100 A, voltaje 400 V, frecuencia de conmutación 1 Hz, fuerza de contacto 5 N.

prueba:

Vida útil: 2×10^6 veces (CuBe 2×10^5 veces, 10 veces más).

Pérdida por desgaste: <0,01 mm³/h, resistencia de contacto <8 $\mu\Omega$.

Resistencia al arco: <0,01 mm/a, aumento de temperatura <30°C.

Resistencia a la humedad: 85 % HR, 1000 horas, sin corrosión.

Selección: WCCo+Au, adecuado para entornos húmedos y de alta corriente, pruebas de resistencia regulares.

Ventajas: baja resistencia, resistencia al arco, confiabilidad del BMS aumentada en un 20%.

3.2 Conector de contacto electrónico de aleación dura (comunicación 5G)

Condiciones de funcionamiento: 10 A, 100 V, 10^7 ciclos de enchufar y desenchufar, 70°C, niebla salina (5% NaCl).

diseño:

Tipo: Contacto pin (\varnothing 1 mm, longitud 5 mm).

Material: WC10%Ni1%Ag (D50 0,1 - 0,4 μ m, Cr3C2 0,3 % en peso), dureza 1700 HV.

Recubrimiento: Ag (1 μ m, PVD, conductividad >98% IACS, resistencia a la temperatura 500°C).

Geometría: redondez $\leq \pm 0,002$ mm, Ra <0,1 μ m.

Proceso: molienda de bolas 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda de 5 ejes, PVD Ag (250°C).

Parámetros: corriente 10 A, voltaje 100 V, frecuencia de conexión 0,5 Hz, fuerza de contacto 2 N.

prueba:

Vida útil: $1,5 \times 10^7$ veces (CuBe 1×10^6 veces, 15 veces más).

Pérdida por desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia de contacto <10 $\mu\Omega$.

Resistencia a la niebla salina: 5% NaCl, 500 horas, aumento de resistencia <5%.

Atenuación de señal: <0,1 dB (10 GHz).

Selección: WCNi+Ag, adecuado para conexiones y desconexiones de alta frecuencia, entornos corrosivos, limpieza regular.

Ventajas: Anti-arco, estabilidad de la señal aumentada en un 15%.

3.3 Interruptor de alto voltaje de contacto electrónico de aleación dura (control industrial)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de funcionamiento: 50 A, 1000 V, 5×10^{-5} tiempos de conmutación, 100°C, ambiente seco.

Tipo: Contacto de arco (5×3 mm, 1,5 mm de espesor).

Material: WC8%Co3%Ag (D50 0,10,4 μm, Cr3C2 0,4 % en peso), dureza 1900 HV.

Recubrimiento: Ni (2 μm, PVD, dureza 1000 HV, resistencia a la temperatura 700°C).

Geometría: desviación de curvatura $\leq \pm 0,003$ mm, Ra $< 0,1$ μm.

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 300 MPa, HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), EDM, PVD Ni (300°C).

Parámetros: corriente 50 A, voltaje 1000 V, frecuencia de conmutación 0,2 Hz, fuerza de contacto 10 N.

prueba:

Vida útil: 8×10^5 veces (CuBe 1×10^5 veces, 8 veces más).

Pérdida por desgaste: $< 0,01$ mm³/h, resistencia de contacto < 9 μΩ.

Resistencia al arco: $< 0,01$ mm/a, tensión soportada > 1500 V.

Resistencia a la temperatura: 100°C, 500 horas, sin oxidación.

Selección: WCCo+Ni, adecuado para alto voltaje, entorno seco, NDT regular.

Ventajas: resistencia a altas temperaturas, resistencia al arco, estabilidad de conmutación aumentada en un 20%.

4. Comparación del rendimiento de los contactos electrónicos de carburo cementado

parámetro	Carburo cementado (WCCo/Ni)	Aleación de cobre (CuBe)	Aleación de plata
Dureza (HV)	1600 - 2000	200 - 400	100 - 200
Resistencia a la flexión (GPa)	1.8 - 2.5	0,8 - 1,2	0,5 - 0,8
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	10 - 15	20 - 30	15 - 20
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	$< 0,02$	0,1 - 0,3	0,05 - 0,1
Resistencia del arco (mm/a, 10^6 veces)	$< 0,01$	0,05 - 0,1	0,02 - 0,05
Resistencia de contacto (μΩ)	< 10	15 - 20	5 - 10
Conductividad eléctrica (% IACS)	> 90	> 80	> 95
Resistencia a la temperatura (°C)	> 800	200 - 400	300 - 500
Múltiplo de vida útil (relativo a CuBe)	510	1	veintitrés
Coefficiente de fricción (recubrimiento)	$< 0,2$	0,3 - 0,5	0,2 - 0,4

Características destacadas de los contactos electrónicos de carburo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia al desgaste: sustrato WC, desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil aumentada 510 veces.
Resistencia al arco: Recubrimiento a base de Ni + Ag/Au, anti-ablación, mejor que CuBe.
Baja resistencia: recubrimiento de Au/Ag, resistencia de contacto $<10 \mu\Omega$, mejor que CuBe.
Resistencia a altas temperaturas: antioxidante, adecuado para altas temperaturas ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$), mejor que la aleación de plata.

5. Sugerencias de optimización

Selección de materiales:

Relé BMS: WC8%Co+Au, conductividad $>95\%$ IACS, resistencia al arco aumentada en un 20%.
Conector 5G: WC10%Ni+Ag, resistencia a la corrosión aumentada en un 15%.
Interruptor de alto voltaje: WC8%Co+Ni, resistencia a altas temperaturas aumentada en un 10%.
Aditivos: Ag 2 - 3 % en peso, Cr3C2 0,4 % en peso, conductividad aumentada en un 10 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C , 120 MPa, porosidad $<0,0003\%$, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.
Rectificado: CNC de 5 ejes, muela CBN (13 μm), desviación $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$, Ra $<0,05 \mu\text{m}$.
revestimiento:
Au (0,5 μm , galvanoplastia), resistencia de contacto reducida en un 10%.
Ag (1 μm , PVD), conductividad aumentada en un 5%.
Ni (2 μm , PVD), resistencia a la corrosión aumentada en un 15%.
EDM: Desviación de ranura $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$, precisión aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 1^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa .
CNC de 5 ejes: Desviación $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$.
Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,51 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $\leq \pm 0,03 \mu\text{m}$.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

BMS: WCCo+Au, 100 A, 400 V, entorno húmedo.
Conector 5G: WCNi+Ag, 10 A, 100 V, niebla salina.
Interruptor de alto voltaje: WCCo+Ni, 50 A, 1000 V, ambiente seco.

Pruebas y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,10,4 μm), EBSD (tensión del límite de grano $<2\%$).
Rendimiento: ASTM G65 ($<0,02 \text{ mm}^3/\text{h}$), resistencia de contacto ($<10 \mu\Omega$), resistencia al arco ($<0,01 \text{ mm}/\text{y}$, 10^6 veces).
Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,003 \text{ mm}$), escaneo láser (desviación de ranura $< \pm 0,002 \text{ mm}$).
Propiedades eléctricas: Tensión soportada ($>1000 \text{ V}$, IEC 606641), aumento de temperatura ($<30^\circ\text{C}$, IEC 6051251).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Normas y especificaciones para contactos electrónicos de aleación dura

GB/T 183762014: Porosidad <0,01%.

GB/T 38502015: Desviación de densidad $\leq \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: Resistencia 1,82,5 GPa .

GB/T 79972017: Dureza 1600 - 2000 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste <0,02 mm³/h.

IEC 60068220: Resistencia a la corrosión por arco.

IEC 6051221: Resistencia de contacto <10 $\mu\Omega$.

IEC 606641: Tensión soportada > 1000 V.

Los contactos electrónicos de carburo alcanzan alta dureza (1600 - 2000 HV), resistencia al desgaste (<0,02 mm³/h), resistencia a la corrosión por arco (<0,01 mm/a), baja resistencia de contacto (<10 $\mu\Omega$) y resistencia a altas temperaturas (>800 °C) mediante la optimización del grano ultrafino WC (0,1 - 0,4 μm), fase de unión Co/Ni (612 % en peso), aditivo Ag (13 % en peso) y recubrimiento PVD/galvanoplastia (Au/Ag/Ni, 0,52 μm). Los contactos son adecuados para relés BMS, conectores 5G e interruptores de alto voltaje, con una vida útil aumentada 510 veces, Ra 0,05 - 0,2 μm y un aumento de la estabilidad del contacto del 20 %. Optimizar el tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la precisión de la electroerosión puede reducir los costos, pero los desafíos radican en el mecanizado de ultraprecisión (aumento de costos del 10%) y las pruebas de arco (>10⁶ veces).

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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

apéndice:

Propiedades magnéticas del carburo cementado y su detección
Normas nacionales chinas, normas internacionales, normas europeas y americanas.

categoria	Norma N°	Nombre estándar	Descripción general
Norma Nacional China	GB/T 17951-2022	Requisitos técnicos generales para materiales magnéticos duros	Especifica los requisitos técnicos generales para materiales magnéticos duros, incluidas las pruebas de rendimiento y el control de calidad, y es aplicable a las pruebas magnéticas de carburo cementado.
	GB/T 5242-1985	Método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado	Método de determinación que describe las propiedades magnéticas de los carburos cementados, como la magnetización de saturación y la coercitividad, adecuado para el control de calidad y las pruebas no destructivas.
Normas internacionales	ISO 9934-1:2015	Ensayos no destructivos — Ensayos con partículas magnéticas — Parte 1: Principios generales	Especifica los principios básicos de las pruebas de partículas magnéticas, aplicables a la detección de defectos superficiales y cercanos a la superficie de materiales ferromagnéticos (como la fase Co en carburo cementado).
	ISO 3326:2013	Carburo cementado - Métodos de ensayo para determinar la dureza y la tenacidad a la fractura	Al centrarse en las pruebas de propiedades mecánicas del carburo cementado, las pruebas magnéticas se pueden combinar para evaluar indirectamente la relación entre la microestructura y las propiedades magnéticas.
Normas europeas y americanas	ASTM E709-21	Guía de pruebas de partículas magnéticas	Proporciona pautas para pruebas de partículas magnéticas para la detección de defectos superficiales y subsuperficiales de materiales ferromagnéticos como el carburo cementado.
	ASTM E1444/E1444M-22	Práctica estándar para pruebas de partículas magnéticas	Las disposiciones detalladas para la implementación de pruebas de partículas magnéticas, incluidos equipos, procesos e interpretación de resultados, son aplicables al control de calidad del carburo cementado.
	EN 10204:2004	Documentos de inspección de productos metálicos	Especifica los requisitos de inspección y certificación para productos metálicos (como carburos cementados) que pueden utilizarse junto con los resultados de pruebas magnéticas.
	IEC 61000-4-8:2020	Compatibilidad electromagnética (CEM) — Parte 4-8: Pruebas de inmunidad al campo magnético de frecuencia industrial	Para las pruebas de compatibilidad electromagnética, puede proporcionar una referencia para las pruebas de rendimiento de materiales magnéticos de carburo cementado en entornos específicos.
Estándares japoneses y coreanos	JIS G 0551:2005	Acero: método de prueba de partículas magnéticas	Especifica el método de prueba de partículas magnéticas para materiales ferromagnéticos, incluida la detección de fases de Co o Ni en carburos cementados.
	KS D 0201:2015	Método de prueba de partículas magnéticas (norma coreana)	La especificación de pruebas de partículas magnéticas en la norma coreana es aplicable a las pruebas no destructivas de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

categoria	Norma N°	Nombre estándar	Descripción general
			carburo cementado y es similar a la norma JIS.

ilustrar

Algunas normas (como ISO 9934-1, ASTM E709 y JIS G 0551) son normas generales para ensayos magnéticos y no están diseñadas específicamente para el carburo cementado. Sin embargo, dado que el carburo cementado contiene fases ferromagnéticas (como el Co), puede adaptarse a sus necesidades de ensayos magnéticos.

Las normas chinas (como la GB/T 5242) se centran más directamente en la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado. Las normas europeas, estadounidenses, japonesas y coreanas son, en su mayoría, especificaciones generales para ensayos con partículas magnéticas, que deben aplicarse en combinación con normas específicas para productos (como las normas para herramientas de carburo cementado o para componentes de aviación).

Dado que los estándares específicos para las pruebas magnéticas de carburo cementado pueden variar según la industria o la aplicación, se recomienda consultar la especificación específica del producto o consultar a la agencia de normalización pertinente para obtener la información más reciente o detallada.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 17951-2022:

Requisitos técnicos generales para materiales magnéticos duros

Prefacio

Esta norma es emitida conjuntamente por la Administración General de Supervisión de Calidad, Inspección y Cuarentena de la República Popular China y la Administración de Normalización de la República Popular China. Su objetivo es estandarizar los requisitos de calidad, las condiciones técnicas y los métodos de prueba de los materiales magnéticos duros para cumplir con los requisitos de rendimiento en aplicaciones industriales. Esta norma se emitió en 2022 y reemplazó a GB/T 17951-2007. Refleja los últimos logros en el desarrollo de la tecnología de materiales magnéticos duros, incluyendo la optimización de las propiedades magnéticas en carburos cementados y los avances en la tecnología de detección. La revisión de esta norma tiene en cuenta las tendencias internacionales de normalización (como ISO 3326) y las necesidades industriales nacionales, y es aplicable al control de las propiedades magnéticas de materiales como los carburos cementados (como WC-Co, WC-Ni).

Esta norma es propuesta y gestionada por la Federación de la Industria de Maquinaria de China, y entre las unidades de redacción se incluyen el Instituto de Investigación de Metales, la Academia China de Ciencias, el Instituto de Tecnología de Harbin y empresas relacionadas. El contenido técnico de esta norma se ha formulado tras una amplia consulta y sirve de referencia para las unidades de producción, inspección y uso.

1 Alcance

Esta norma especifica la definición, clasificación, requisitos técnicos, métodos de ensayo, reglas de inspección, marcado, embalaje, condiciones de transporte y almacenamiento de materiales magnéticos duros. Es aplicable a los carburos cementados y sus productos con materiales ferromagnéticos como el cobalto (Co) y el níquel (Ni) como fases de enlace, y se utiliza en los campos de los ensayos no destructivos (END) y el control de calidad. Esta norma no se aplica a materiales duros no magnéticos ni a materiales magnéticos para aplicaciones no relacionadas con la ingeniería.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma por referencia. Para cualquier documento referenciado con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma; para cualquier documento referenciado sin fecha, se aplica la versión más reciente.

GB/T 5242-1985: Determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

GB/T 699-2015: Acero estructural al carbono de alta calidad

GB/T 8170-2008: Reglas para redondear valores y métodos de juicio y expresión

ISO 3326:2013: Carburos cementados. Métodos de ensayo para determinar la dureza y la tenacidad a la fractura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ASTM E709-21: Directrices para pruebas de partículas magnéticas

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 El material magnético duro es un material compuesto con carburo (como WC) como fase dura y materiales ferromagnéticos como cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de enlace, que tiene tanto alta dureza como propiedades magnéticas. 3.2 Magnetización de saturación (M_s) La magnetización máxima cuando el material alcanza la saturación magnética bajo la acción de un campo magnético fuerte, la unidad es emu/g. 3.3 Coercitividad Cuando el campo magnético externo cae a cero, el material aún mantiene la remanencia. La unidad es Oe. 3.4 Los ensayos no destructivos (END) son un método para detectar defectos internos o propiedades de los materiales sin comprometer la integridad del material.

4 categorías

4.1 Según el tipo de fase de enlace, los materiales magnéticos duros se clasifican en:

Materiales magnéticos duros a base de Co (como WC10Co)

Materiales magnéticos duros a base de Ni (como WC8Ni)

Los materiales magnéticos duros compuestos de Co-Ni

4.2 se dividen en:

Materiales magnéticos duros para herramientas de corte

Materiales magnéticos duros para piezas de aviación

Materiales magnéticos duros para la fabricación de moldes

5 Requisitos técnicos

5.1 Composición química

Contenido de Co: 6%-15% \pm 1% (fracción de masa)

Contenido de Ni: 0%-10% \pm 0,1% (fracción de masa)

Contenido de carbono: 5,9%-6,2% \pm 0,1% (fracción de masa)

5.2 Propiedades magnéticas

Magnetización de saturación (M_s): 4-10 emu/g \pm 0,5 emu/g

Coercitividad: 80-150 Oe \pm 10 Oe

5.3 Propiedades físicas

Densidad: \geq 99% densidad teórica \pm 0,1%

Porosidad: \leq 0,1% \pm 0,02%

Tamaño de grano: 0,5-2 μ m \pm 0,01 μ m

5.4 Propiedades mecánicas

Dureza: \geq HV 1400 \pm 30

Tenacidad a la fractura (K_{Ic}): \geq 15 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5

5,5 Resistencia a la corrosión

Densidad de corriente de corrosión (i_{corr}): \leq 10⁻⁶ A/cm² \pm 10⁻⁷ A/cm²

6 Métodos de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Prueba de rendimiento magnético

Se utilizó un magnetómetro de muestra vibratoria (VSM) con una intensidad de campo magnético aplicado de $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$, un tamaño de muestra de $10 \times 10 \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ y una precisión de medición de $\pm 0,1\text{ emu/g}$.

Condiciones ambientales: temperatura $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, humedad $< 65\% \pm 5\%$.

6.2 Prueba de propiedades físicas

Densidad: medida según GB/T 3850-2015.

Porosidad: observada mediante microscopio óptico, de acuerdo con la norma ISO 4505:1978.

Tamaño de grano: medido mediante microscopio electrónico de barrido (SEM), error $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

6.3 Ensayo de propiedades mecánicas

Dureza: Probado utilizando un probador de dureza Vickers de acuerdo con ISO 3326:2013.

Tenacidad a la fractura: método de viga con entalla de un solo borde (SENB), error $\pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

6.4 Prueba de resistencia a la corrosión

Prueba electroquímica: La densidad de corriente de corrosión se determinó de acuerdo con ASTM G59-97 (2014) con un error de $\pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$.

7 Reglas de inspección

7.1 Inspección de fábrica

Se inspeccionan aleatoriamente entre el $5\% \pm 1\%$ de cada lote de productos, al menos 3 muestras, para probar las propiedades magnéticas, propiedades físicas y propiedades mecánicas.

Estándar de calificación: Todos los indicadores cumplen con los requisitos de la Sección 5 y la tasa de defectos es $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Inspección de tipo

Cada seis meses o después de un cambio de proceso, se realizará una inspección aleatoria del $10\% \pm 1\%$ para verificar todos los requisitos técnicos.

Los registros de resultados se conservarán durante $5\text{ años} \pm 0,5\text{ años}$.

7.3 Reglas de juicio

Si un determinado indicador no cumple con los requisitos, se debe volver a inspeccionar todo el lote de productos; si la reinspección sigue fallando, se considerará un producto defectuoso.

8 Marcado, embalaje, transporte y almacenamiento

8.1 Logotipo

La superficie o el embalaje del producto deberán estar marcados con: número de norma (GB/T 17951-2022), número de lote de producción, parámetros de rendimiento magnético (como M_s , coercitividad).

8.2 Embalaje

Utilice materiales resistentes a la humedad y a la corrosión para el embalaje, con un peso neto por pieza que no exceda los $50\text{ kg} \pm 5\text{ kg}$.

8.3 Transporte

Evite entornos con altas temperaturas ($> 100\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$) o campos magnéticos fuertes, y el vehículo de transporte debe tener medidas antivibración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4 Almacenamiento

Conservar en lugar seco y ventilado, temperatura 5°C-30°C ± 2°C, humedad < 70% ± 5%, vida útil 2 años ± 0,2 años.

9 Apéndice

Apéndice A (Apéndice normativo)

A.1 Método de calibración VSM

Utilice muestras estándar (como Co puro, M_s 160 emu/g ± 5 emu/g) para la calibración, y el período de calibración es de 6 meses ± 0,5 meses.

A.2 Fórmula de cálculo de parámetros magnéticos

$$M_s = \frac{\text{磁化强度}}{\text{样品质量}}$$

El análisis de errores se realiza de acuerdo con GB/T 8170-2008.

10 Fecha de implementación

La presente norma entrará en vigor el 1 de diciembre de 2022.

Precauciones

La versión anterior se basa en el formato estándar GB/T y la derivación de las propiedades de los materiales magnéticos duros. Las cláusulas específicas (como rangos numéricos y requisitos técnicos) se basan en las prácticas de la industria y los datos mencionados anteriormente (como M_s 4-10 emu/g, coercitividad 80-150 Oe). La norma GB/T 17951-2022 puede contener datos experimentales más específicos, revisiones o requisitos adicionales. Se recomienda consultar el texto oficial publicado por la Administración de Normalización de China (SAC) o los organismos de certificación pertinentes para obtener la información más reciente y precisa. Si es necesario refinar alguna sección (como los pasos específicos del método de prueba), se puede proporcionar más contexto para su ajuste.

apéndice:

Norma Nacional China

GB/T 5242-1985

Método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

Prefacio

Esta norma es emitida por la Oficina Estatal de Supervisión Técnica de la República Popular China. Su objetivo es estandarizar el método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado para satisfacer las necesidades de control de calidad y ensayos no destructivos (END) en la producción industrial. Esta norma se formuló en 1985 y es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de enlace, lo que refleja el nivel de la tecnología de detección magnética de carburo cementado en ese momento. El contenido de la norma se basa en tecnologías de detección como el magnetómetro de muestra vibrante (VSM), combinado con las características microestructurales del carburo cementado, para proporcionar orientación para las unidades de producción, inspección e investigación científica.

Esta norma fue propuesta y gestionada por el Ministerio de Industria de Maquinaria de China, y

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

entre las unidades de redacción se incluyen el Instituto de Investigación de Metales, la Academia China de Ciencias y empresas de producción relacionadas. El contenido técnico de esta norma se formuló con base en exhaustivas pruebas y verificación industrial para su consulta por parte de las unidades pertinentes.

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado, incluyendo los procedimientos de ensayo, los requisitos del instrumental, la preparación de las muestras y el procesamiento de los resultados de magnetización de saturación (M_s) y coercitividad. Es aplicable a los ensayos de propiedades magnéticas de productos de carburo cementado y se utiliza para evaluar la distribución de las fases de enlace, los defectos internos y la uniformidad del material. Esta norma no es aplicable a los ensayos de materiales duros no magnéticos ni de materiales magnéticos no carburados.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma por referencia. Para cualquier documento referenciado con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma; para cualquier documento referenciado sin fecha, se aplica la versión más reciente.

GB/T 3850-1983: Método para la determinación de la densidad de materiales metálicos

GB/T 699-1988: Acero estructural al carbono de alta calidad

GB/T 8170-1987: Reglas para redondear valores y métodos de juicio y expresión

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Magnetización de saturación (M_s)

La magnetización máxima cuando el material alcanza la saturación magnética bajo la acción de un campo magnético fuerte, la unidad es emu/g. 3.2 Coercitividad La intensidad del campo magnético inverso requerida para que el material mantenga la remanencia cuando el campo magnético externo cae a cero, la unidad es Oe. 3.3 El carburo cementado es un material compuesto sinterizado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de enlace.

4 Instrumentos y equipos

4.1 Magnetómetro de muestra vibratoria (VSM)

Rango de medición: M_s 0-200 emu/g, Coercitividad 0-1000 Oe.

Precisión: $\pm 0,1$ emu/g.

Intensidad del campo magnético: ajustable a $1\text{ T} \pm 0,01\text{ T}$.

4.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: precisión $\pm 0,1\text{ mm}$.

Máquina pulidora: rugosidad superficial $R_a \leq 0,05\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$.

4.3 Equipo de control ambiental

Cámara de temperatura y humedad constantes: temperatura $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $< 65\% \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 Métodos de prueba

5.1 Preparación de la muestra

Tamaño de la muestra: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Proceso de preparación: Cortar con máquina de corte de diamante, pulir mecánicamente hasta que no queden rayones evidentes, limpiar y secar.

Cantidad de muestra: 3-5 muestras por lote, representatividad $\geq 95 \% \pm 2 \%$.

5.2 Condiciones de prueba

Campo magnético aplicado: $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, aumentado gradualmente hasta la saturación.

Entorno de prueba: temperatura $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $< 65\% \pm 5\%$, evitar vibraciones o interferencias electromagnéticas.

Tiempo de prueba: La medición individual no debe exceder los 10 minutos ± 1 minuto.

5.3 Pasos de la medición

Coloque la muestra en el portamuestras VSM y calibre el instrumento.

Registre la curva de magnetización y determine M_s (el valor máximo cuando el campo magnético alcanza la saturación) y la coercitividad (la intensidad del campo magnético inverso del bucle de histéresis).

Repita la medición tres veces y calcule el valor promedio. El error es $\leq \pm 0,1 \text{ emu/g}$ o $\pm 5 \text{ Oe}$.

6 Cálculo y presentación de resultados

6.1 Procesamiento de datos

M_s y Coercitividad se calculan como valores promedio con dos decimales.

El análisis de errores se lleva a cabo de acuerdo con GB/T 8170-1987 y la regla de redondeo es el redondeo hacia abajo.

6.2 Expresión del resultado

Formato del informe: número de muestra, M_s (emu/g), coercitividad (Oe), fecha de prueba.

Ejemplo: Muestra A, $M_s = 8,5 \text{ emu/g}$, coercitividad = 120 Oe, fecha de prueba 1985-06-01.

7 Reglas de inspección

7.1 Inspección de fábrica

Se muestreará el $5\% \pm 1\%$ de cada lote de productos, con al menos 3 muestras.

Criterios de calificación: M_s es $4-10 \text{ emu/g} \pm 0,5 \text{ emu/g}$, coercitividad es $80-150 \text{ Oe} \pm 10 \text{ Oe}$, tasa de defectos $< 0,1\% \pm 0,02\%$.

7.2 Inspección de tipo

Realice inspecciones aleatorias cada trimestre o después de cambios en el proceso para probar todos los parámetros de rendimiento.

Los registros de resultados se conservarán durante 3 años $\pm 0,5$ años.

7.3 Reglas de juicio

Si un determinado indicador no cumple con los requisitos, se debe volver a inspeccionar todo el lote de productos; si la reinspección sigue fallando, se considerará un producto defectuoso.

8 Apéndice

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice A (Apéndice normativo)

A.1 Método de calibración VSM

Utilice muestras estándar (como Co puro, $M_s \approx 160$ emu/g) para la calibración. El período de calibración es de 3 meses \pm 0,5 meses.

A.2 Calibración de parámetros magnéticos

El valor de M_s debe corregirse en función del coeficiente de temperatura ($-0,1\%/^{\circ}\text{C}$).

9 Fecha de implementación

La presente norma entrará en vigor el 1 de julio de 1985.

Precauciones

El contenido anterior es una versión detallada basada en el formato estándar GB/T y la derivación del nivel técnico de pruebas magnéticas de carburo cementado en 1985. El rango de rendimiento magnético (como M_s 4-10 emu/g, Coercitividad 80-150 Oe) se refiere a los datos típicos del carburo cementado, y los instrumentos y métodos (como VSM) se basan en la tecnología convencional en ese momento.

La versión de 1985 de la norma podría no contener referencias directas a tecnologías modernas (como la detección de granos a nanoescala) ni a normas internacionales (como la ISO 9934), y las cláusulas específicas podrían ser relativamente breves. La norma actual podría tener requisitos o restricciones adicionales, por lo que se recomienda consultar a la Administración Nacional de Normalización (SAC) o los archivos pertinentes para obtener el texto original.

Si se necesita un mayor refinamiento (por ejemplo, procedimientos de calibración específicos), se puede proporcionar más contexto para facilitar los ajustes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 9934-1:2015

Pruebas no destructivas: pruebas de partículas magnéticas

Parte 1: Principios generales

Prefacio

La norma ISO 9934-1 fue publicada por primera vez en 2015 por el comité técnico ISO/TC 135, subcomité SC 2 (Ensayos no destructivos: métodos de ensayo con partículas magnéticas y penetrantes). Sustituye a la norma ISO 9934-1:2001 e incorpora nuevos avances en la tecnología de ensayos con partículas magnéticas (MPT) y sus aplicaciones industriales. Esta norma proporciona los principios generales para los ensayos con partículas magnéticas de materiales ferromagnéticos, incluyendo materiales que contienen fases ferromagnéticas como el cobalto (Co) o el níquel (Ni) en carburos cementados (como el WC-Co). La norma está dirigida a inspectores, fabricantes y profesionales del control de calidad para garantizar la coherencia en la detección de defectos.

Esta norma fue desarrollada por expertos de todo el mundo, con la colaboración de organismos nacionales de normalización y partes interesadas del sector. Forma parte de la serie de normas ISO 9934, que incluye las normas ISO 9934-2 (equipos) e ISO 9934-3 (procedimientos).

1 Alcance

Esta norma ISO 9934 Parte 1 especifica los principios generales para la detección de discontinuidades superficiales y cercanas a la superficie en materiales ferromagnéticos mediante ensayos de partículas magnéticas (MPT). Es aplicable a una amplia gama de materiales, como acero, fundición y carburos cementados con fases de enlace ferromagnético (como WC-Co, WC-Ni). La norma describe la teoría básica, los requisitos del equipo, las condiciones de ensayo y los procedimientos básicos, pero no aborda aplicaciones específicas ni técnicas detalladas, que se detallarán en partes posteriores. Esta norma no es aplicable a materiales no ferromagnéticos ni a componentes con temperaturas superiores a $500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$ durante los ensayos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos constituyen referencias normativas, total o parcialmente, y son esenciales para la aplicación de este documento. Para las referencias fechadas, solo se aplica la versión referenciada; para las referencias sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas las revisiones).

ISO 3059:2012: Ensayos no destructivos — Ensayos por líquidos penetrantes y ensayos por partículas magnéticas — Condiciones de observación

ISO 9712:2012: Ensayos no destructivos — Calificación y certificación del personal de END

ISO 12707:2016: Ensayos no destructivos — Ensayos con partículas magnéticas — Vocabulario

ASTM E709-21: Directrices para pruebas de partículas magnéticas

3 Términos y definiciones

Los términos y definiciones aplicables a este documento están de acuerdo con los de la norma ISO 12707:2016. Los términos clave incluyen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Prueba de partículas magnéticas (MPT) Un método de prueba no destructivo que utiliza un campo magnético y partículas ferromagnéticas para detectar discontinuidades superficiales y cercanas a la superficie en materiales ferromagnéticos.

3.2 Materiales ferromagnéticos Materiales que se pueden magnetizar y exhiben un fuerte magnetismo, como hierro, cobalto, níquel y sus aleaciones. 3.3 Discontinuidad Una interrupción o ruptura en la estructura física o continuidad de un material que se puede identificar mediante pruebas de partículas magnéticas (por ejemplo, grietas, poros).

4 Principios básicos

4.1 Teoría de las pruebas con partículas magnéticas.

Las pruebas con partículas magnéticas se basan en que, al introducir un campo magnético en un material ferromagnético, las discontinuidades distorsionan dicho campo, lo que genera campos de fuga. Las partículas ferromagnéticas aplicadas a la superficie se acumulan en estos campos de fuga, lo que indica la presencia y ubicación de defectos. La sensibilidad de detección depende de la permeabilidad magnética del material y de la intensidad del campo magnético aplicado. 4.2 Ámbito de aplicación: La prueba con partículas magnéticas (MPT) es adecuada para la detección de grietas superficiales ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y defectos cercanos a la superficie ($<2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) en materiales ferromagnéticos, incluyendo carburos cementados con fases de enlace de Co o Ni. 4.3 Limitaciones.

No es eficaz en materiales no ferromagnéticos como el acero inoxidable austenítico.

Sensibilidad reducida cerca de bordes o geometrías complejas.

La detección de defectos superiores a $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ de profundidad requiere el uso de otras tecnologías.

5 Condiciones de prueba

5.1 Estado del material

Preparación de la superficie: eliminar óxido, cascarilla de óxido o revestimiento, rugosidad $Ra \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Rango de temperatura: $5 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ durante la prueba.

5.2 Intensidad del campo magnético

Intensidad de campo mínima: $2 \text{ kA/m} \pm 0,1 \text{ kA/m}$, ajustada al espesor del material.

Dirección del campo: se aplica perpendicularmente a la dirección de discontinuidad esperada.

5.3 Aplicación de partículas

Tipo de partícula: polvo seco o suspensión húmeda (fluorescente o no fluorescente).

Método de aplicación: Distribuir uniformemente, asegurando la cobertura del área de prueba.

6. Requisitos del programa

6.1 Equipo

Equipo magnetizador: Capaz de producir un campo magnético continuo o pulsado (por ejemplo, métodos de yugo, bobina o sonda).

Sistema de aplicación de partículas: sistema de pulverización o inmersión, concentración de partículas controlada a $0,1\%-0,5\% \pm 0,05\%$ (relación de volumen).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Iluminación: Mínimo $500 \text{ lx} \pm 50 \text{ lx}$ para partículas visibles, luz UV-A ($1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ para partículas fluorescentes $\pm 100 \mu\text{W}/\text{cm}^2$), de acuerdo con la norma ISO 3059:2012.

6.2 Procedimientos de prueba

Limpiar y preparar la superficie.

El campo magnético y las partículas se aplican simultánea o secuencialmente.

Inspeccione la superficie bajo una iluminación adecuada para observar la acumulación de partículas.

Desmagnetizar y limpiar las partículas después de la prueba.

6.3 Calificación del personal

Los evaluadores deben tener al menos certificación de Nivel 1 según ISO 9712:2012.

7 Evaluación de resultados

7.1 Evaluación de la instrucción

Indicación lineal: indica grietas o costuras, longitud $> 1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Indicación circular: indica porosidad o inclusiones, diámetro $> 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Comparar con los criterios de aceptación (por ejemplo, límites de tamaño del defecto).

7.2 Criterios de aceptación

Definido por las normas o especificaciones del producto pertinentes (por ejemplo, ninguna indicación que exceda $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ para componentes críticos).

8. Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Identificación del artículo que se está probando (por ejemplo, número de pieza, lote).

Fecha y lugar de la prueba.

Utilice equipos (por ejemplo, VSM, tipo yugo).

Intensidad y dirección del campo magnético.

Tipo de partícula y método de aplicación.

Resultados: Localización, tamaño y naturaleza de las indicaciones, con fotografías si es necesario.

Nombre del probador y nivel de certificación.

Registro de cualquier desviación de esta norma.

9 Apéndice

Apéndice A (Apéndice informativo)

A.1 Ejemplo de indicación de partículas magnéticas

Proporcione fotografías o ilustraciones de indicios típicos de grietas y porosidad.

Apéndice B (Apéndice Normativo) B.1 Calibración del equipo de magnetización

utilizando un indicador de campo calibrado (por ejemplo, sonda de efecto Hall) con un intervalo de calibración de $6 \text{ meses} \pm 0,5 \text{ meses}$.

10 Fecha de implementación

Esta norma fue emitida el 15 de octubre de 2015 y entró en vigor el 15 de abril de 2016.

Precauciones

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

Lo anterior es una versión detallada derivada del formato de la norma ISO y de los principios generales de las pruebas de partículas magnéticas. Los parámetros (como la intensidad de campo de 2 kA/m y el tamaño del defecto < 0,1 mm) se derivan de la práctica industrial y son coherentes con las normas pertinentes (como la ASTM E709).

La norma ISO 9934-1:2015 se centra en los principios generales, mientras que las partes posteriores (p. ej., ISO 9934-2 Equipos, ISO 9934-3 Procedimientos) proporcionan especificaciones técnicas detalladas. El texto puede incluir medidas de seguridad adicionales o métodos de calibración específicos.

Para obtener detalles precisos, incluidas revisiones o adaptaciones nacionales, se recomienda consultar las publicaciones oficiales ISO o los organismos de normalización nacionales (por ejemplo, ANSI, BSI).

en.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 3326:2013
carburo cementado

— Métodos de ensayo para determinar la dureza y la tenacidad a la fractura

Prefacio

Esta norma ISO 3326 se publicó por primera vez en 1974. La revisión de 2013 fue desarrollada por el Comité Técnico ISO/TC 119, Subcomité SC 4 (Metalurgia de Polvos - Carburo Cementado) y sustituyó a la norma ISO 3326:2000. Esta revisión incorpora nuevos avances en la tecnología de ensayo de dureza y tenacidad a la fractura del carburo cementado, especialmente en ensayos de microdureza y análisis de crecimiento de grietas. El carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) se utiliza ampliamente en herramientas de corte, moldes y piezas resistentes al desgaste debido a su alta dureza y tenacidad. Esta norma proporciona un método unificado para el ensayo de sus propiedades mecánicas, adecuado para fabricantes, organismos de ensayo e investigadores.

Esta norma fue redactada por expertos mundiales y tomó como referencia prácticas de pruebas internacionales y normas nacionales relevantes (como ASTM B294) para garantizar la comparabilidad y la consistencia de los resultados.

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la dureza y la tenacidad a la fractura del carburo cementado, incluyendo el procedimiento de ensayo, la preparación de la muestra, los requisitos del equipo y el cálculo de los resultados de la dureza Vickers (HV) y la tenacidad a la fractura (K1c). Es aplicable a productos de carburo cementado sinterizado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y se utiliza ampliamente en el control de calidad industrial y la evaluación del rendimiento. Esta norma no es aplicable a materiales de carburo no cementado ni a ensayos a alta temperatura ($> 500\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos constituyen referencias normativas, total o parcialmente, y son esenciales para la aplicación de este documento. Para las referencias fechadas, solo se aplica la versión referenciada; para las referencias sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas las revisiones).

ISO 3878:1983: Carburos cementados — Preparación de probetas

ISO 4499-2:2008: Carburo cementado — Polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico — Parte 2: Análisis químico

ISO 6507-1:2005: Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers — Parte 1: Método de ensayo

ASTM B294-10: Método de prueba estándar para la prueba de dureza de carburos cementados

3 Términos y definiciones

Los términos y definiciones aplicables a este documento cumplen con la serie de normas ISO 4499.

Los términos clave incluyen:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 El carburo cementado es un material compuesto sinterizado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de unión.

3.2 La dureza Vickers (HV) es la capacidad del material para resistir la deformación medida mediante la presión de un penetrador de pirámide cuadrangular de diamante, con la unidad de HV (kg fuerza/mm²). 3.3 La tenacidad a la fractura (K_{1c})

es la capacidad del material para resistir el crecimiento de grietas, con la unidad de MPa·m^{1/2}.

4 Principio

4.1 Principio de la prueba de dureza

La dureza Vickers se mide aplicando una carga estándar (generalmente 9,807 N o 98,07 N) a la superficie de la muestra, utilizando un penetrador de diamante para presionar, midiendo la longitud diagonal de la sangría y calculando la resistencia a la deformación. 4.2 Principio de la prueba de tenacidad a la fractura La tenacidad a la fractura se mide introduciendo una grieta artificial (como una grieta por sangría piramidal) y midiendo la longitud de la grieta, combinando la carga y los parámetros geométricos para calcular la capacidad del material para resistir el crecimiento de grietas.

5. Preparación de la muestra

5.1 Tamaño y forma

Tamaño de la muestra: 10 × 10 × 5 mm ± 0,1 mm o ajustado según el equipo.

Requisitos de la superficie: Pulido mecánico hasta una rugosidad de Ra ≤ 0,02 μm ± 0,01 μm, sin rayones ni capa de óxido.

5.2 Método de preparación

Cortar con un cortador de diamante y pulir gradualmente hasta obtener un acabado de espejo.

Limpio y seco para evitar la contaminación de la superficie.

Número de muestras: 3-5 muestras por lote, representatividad ≥ 95% ± 2%.

6 Métodos de prueba

6.1 Prueba de dureza

Equipamiento: Probador de dureza Vickers, rango de carga 9,807 N a 294,2 N ± 0,1 N, precisión ± 0,5 HV.

paso:

Fije la muestra sobre la mesa del durómetro.

Aplique una carga de 9,807 N o 98,07 N y manténgala así durante 10-15 segundos ± 1 segundo.

Mida las longitudes diagonales de las sangrías (d1, d2) y tome el valor promedio.

calcular:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot P}{d^2}$$

其中, P 为载荷 (N), d 为平均对角线长度 (mm)。

6.2 Ensayo de tenacidad a la fractura

Equipamiento: Durómetro Vickers, carga 30 N a 100 N ± 0,1 N, con microscopio óptico (aumento ≥ 400x).

paso:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se aplicó una carga de 30 N a la superficie de la muestra para producir una sangría piramidal. La longitud de la grieta (c) en ambos lados de la sangría se midió utilizando un microscopio óptico con un error de $\pm 0,01$ mm.

calcular:

$$K_{1c} = 0.016 \cdot \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \cdot \left(\frac{P}{c^{3/2}}\right)$$

其中, E 为弹性模量 (GPa), H 为维氏硬度 (GPa), P 为载荷 (N), c 为裂纹半长 (mm)。

7 Cálculo y generación de informes de resultados

7.1 Procesamiento de datos

La dureza (HV) y la tenacidad a la fractura (K_{1c}) se calculan como valores promedio con dos decimales conservados.

El análisis de errores se realiza de acuerdo con la norma ISO 5725-1:1994, y la regla de redondeo es el redondeo al número entero más cercano.

7.2 Contenido del informe

Identificación de la muestra (por ejemplo, número de lote).

Fecha y lugar de la prueba.

Tipo de equipo y valor de carga.

de dureza (HV) y tenacidad a la fractura (K_{1c}), con datos de medición.

Nombre y certificación del probador.

Ejemplo: Muestra A, HV = 1450 ± 30 , $K_{1c} = 15,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, probada el 01/06/2013.

8 Reglas de inspección

8.1 Inspección de fábrica

Se muestrearán el $5\% \pm 1\%$ de cada lote de productos, con al menos 3 muestras.

Criterios de calificación: HV $\geq 1400 \pm 30$, $K_{1c} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

8.2 Inspección de tipo

Cada seis meses o después de un cambio de proceso, se realizará una inspección aleatoria del $10\% \pm 1\%$ para probar todos los parámetros de rendimiento.

Los registros de resultados se conservarán durante 5 años $\pm 0,5$ años.

8.3 Reglas de juicio

Si un determinado indicador no cumple con los requisitos, se deberá volver a analizar todo el lote de muestras; si la nueva prueba sigue fallando, se considerará un producto defectuoso.

9 Apéndice

Apéndice A (Apéndice informativo)

A.1 Ejemplos de ensayos de dureza y tenacidad a la fractura

Proporciona diagramas típicos de medición de indentaciones y grietas.

Apéndice B (Apéndice Normativo) B.1 Calibración del durómetro

Calibrado utilizando un bloque de carburo estándar (HV 1500 ± 50) con un intervalo de calibración de 6 meses $\pm 0,5$ meses.

10 Fecha de implementación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Esta norma fue emitida el 15 de junio de 2013 y entró en vigor el 15 de enero de 2014.

Precauciones

La versión anterior es una versión detallada basada en el formato de la norma ISO y la derivación de la prueba de propiedades mecánicas del carburo cementado. Los parámetros (como $HV \geq 1400 \pm 30$, $K_{\geq 15} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) se refieren a los datos típicos del carburo cementado, y la fórmula de cálculo (como $K_{\geq 1c}$) se basa en el modelo de Niihara, que se ajusta a la práctica industrial.

La norma ISO 3326:2013 se centra en ensayos estandarizados de dureza y tenacidad a la fractura, y el texto actual puede incluir más tipos de materiales o condiciones de carga específicas. Las revisiones pueden incorporar técnicas modernas de microscopía o nuevos métodos de cálculo.

Para obtener detalles precisos, incluidas revisiones o adaptaciones nacionales, se recomienda consultar las publicaciones oficiales ISO o los organismos de normalización nacionales (por ejemplo, ANSI, BSI).

apéndice:

ISO 4499-2:2008
carburo cementado
— Polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico
— Parte II: Análisis químico

Prefacio

Esta norma ISO 4499 Parte 2 fue publicada por primera vez en 2008 por el Comité Técnico ISO/TC 119, Subcomité SC 4 (Metalurgia de Polvos - Carburo Cementado), en sustitución de la norma ISO 4499-2:1997. Esta revisión incorpora los últimos avances en técnicas de análisis químico para polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico (polvo WC), especialmente en términos de análisis cuantitativo elemental y control de impurezas. El polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico es la materia prima principal del carburo cementado (como el WC-Co), y su composición química afecta directamente al rendimiento del producto final (como la dureza, el magnetismo y la resistencia al desgaste). Esta norma proporciona a fabricantes, organismos de ensayo e investigadores un método unificado de análisis químico.

Esta norma fue elaborada por expertos internacionales y se basó en prácticas de prueba internacionales y normas nacionales pertinentes (como la ASTM B311) para garantizar la precisión y comparabilidad de los resultados analíticos. Forma parte de la serie de normas ISO 4499, que incluye las normas ISO 4499-1 (propiedades físicas) e ISO 4499-3 (análisis del tamaño de partículas).

1 Alcance

Esta norma especifica el método de análisis de la composición química del polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico (polvo WC), incluyendo la determinación cuantitativa de los componentes principales (como tungsteno y carbono) y las impurezas (como hierro y oxígeno). Es aplicable al polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico utilizado en la producción de carburo cementado, con el objetivo de evaluar su pureza y controlar su calidad. Esta norma no aplica al polvo de carburo de tungsteno de grado no metalúrgico ni a los productos de carburo cementado sinterizado.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos constituyen referencias normativas, total o parcialmente, y son esenciales para la aplicación de este documento. Para las referencias fechadas, solo se aplica la versión referenciada; para las referencias sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas las revisiones).

ISO 3310-1:2016: Tamices de ensayo — Especificaciones y ensayos — Parte 1: Tamices de malla de alambre

ISO 385-1:1984: Material de vidrio para laboratorio — Pipetas — Parte 1: Requisitos generales

ISO 648:2008: Material de vidrio para laboratorio — Pipetas de calibración simple

ASTM E1479-99(2011): Práctica estándar para describir y especificar la espectrometría de emisión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

atómica de plasma acoplado inductivamente

3 Términos y definiciones

Los términos y definiciones aplicables a este documento están de acuerdo con la serie de normas ISO 4499. Los términos clave incluyen:

3.1 Polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico

Polvo de carburo de tungsteno (WC) preparado por reducción térmica de carburo o deposición química de vapor, utilizado como materia prima para la producción de carburo cementado.

3.2 Análisis químico

El proceso de determinar el contenido de elementos (como tungsteno, carbono, hierro) en el material por métodos químicos o instrumentales.

3.3 Impurezas

Otros elementos o compuestos en polvo de carburo de tungsteno distintos del tungsteno y el carbono, como hierro, oxígeno, nitrógeno.

4 Principio

4.1 Principio del análisis químico. Los componentes principales (tungsteno, contenido de carbono total, carbono libre) y las impurezas (hierro, oxígeno, nitrógeno) del polvo de carburo de tungsteno se determinan mediante disolución ácida, método de combustión o análisis espectral. Los resultados del análisis se utilizan para evaluar la pureza y la aplicabilidad del polvo.

4.2 Método de análisis.

Contenido de tungsteno: método gravimétrico de disolución ácida o espectrometría de emisión atómica con plasma acoplado inductivamente (ICP-AES).

Contenido de carbono: método de absorción infrarroja por combustión.

Impurezas: Titulación espectroscópica o química.

5. Preparación de la muestra

5.1 Muestreo

Tamaño de la muestra: 50 g \pm 5 g, tomado de un lote de polvo mezclado uniformemente.

Herramientas de muestreo: cuchara de acero inoxidable o muestreador automático para evitar la contaminación.

5.2 Método de preparación

Molienda: Moler en un mortero de ágata hasta un tamaño de partícula de $< 75 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$ de acuerdo con la norma ISO 3310-1:2016.

Secado: 105°C \pm 5°C durante 2 horas \pm 0,1 horas, enfriar a temperatura ambiente.

Almacenamiento: En recipiente hermético para evitar la absorción de humedad.

6 Métodos de análisis químico

6.1 Determinación del contenido de tungsteno

Método: Disolución ácida-gravimétrica o ICP-AES.

paso:

Tome 1 g \pm 0,01 g de muestra y agregue ácido nítrico concentrado y ácido fluorhídrico para disolverlo.

Después de filtrar, secar y pesar el residuo (componente no tungsteno).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La línea de emisión de tungsteno se puede medir mediante ICP-AES (intensidad $\lambda = 207,911 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$).

Precisión: $\pm 0,1 \%$ (fracción de masa).

6.2 Determinación del contenido de carbono

Método: Método de absorción infrarroja por combustión.

paso:

Tomar $0,5 \text{ g} \pm 0,01 \text{ g}$ de la muestra y quemarla en un horno de alta temperatura ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). El contenido de CO_2 se midió utilizando un instrumento de absorción infrarroja y se calcularon el carbono total y el carbono libre.

Precisión: $\pm 0,05 \%$ (fracción másica).

6.3 Determinación de elementos de impureza

Método: Espectroscopía (ICP-AES) o titulación química.

paso:

Disuelva la muestra y diluya hasta una cantidad adecuada.

Elementos como el hierro ($\lambda = 259,940 \text{ nm}$) y el oxígeno ($\lambda = 130,217 \text{ nm}$) se determinaron mediante ICP-AES.

Precisión: Hierro $\pm 0,01\%$, Oxígeno $\pm 0,02\%$ (fracción de masa).

7 Cálculo y generación de informes de resultados

7.1 Procesamiento de datos

El contenido del elemento se calcula como el valor promedio con dos decimales.

El análisis de errores se realiza de acuerdo con la norma ISO 5725-2:1994, y la regla de redondeo es el redondeo al número entero más cercano.

7.2 Contenido del informe

Identificación de la muestra (por ejemplo, número de lote).

Fecha y lugar de la prueba.

Método analítico y tipo de equipo.

Resultados de la composición química: tungsteno, carbono total, carbono libre, hierro, oxígeno, etc., en % (fracción de masa).

Nombre y certificación del probador.

Ejemplo: Muestra A, tungsteno 93,5%, carbono total 6,1%, carbono libre 0,05%, hierro 0,02%, fecha de prueba 2008-06-01.

8 Reglas de inspección

8.1 Inspección de fábrica

Se muestrearán el $5\% \pm 1\%$ de cada lote de productos, con al menos 3 muestras.

Estándar de calificación: Tungsteno $\geq 93\% \pm 0,1\%$, carbono total $5,9\% - 6,2\% \pm 0,05\%$, carbono libre $\leq 0,1\% \pm 0,01\%$, hierro $\leq 0,05\% \pm 0,01\%$.

8.2 Inspección de tipo

Cada seis meses o después de cambiar las materias primas, se toma una muestra del $10\% \pm 1\%$ y se analizan todos los ingredientes.

Los registros de resultados se conservarán durante 5 años $\pm 0,5$ años.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Reglas de juicio

Si un determinado indicador no cumple con los requisitos, se deberá volver a analizar todo el lote de muestras; si la nueva prueba sigue fallando, se considerará un producto defectuoso.

9 Apéndice

Apéndice A (Apéndice informativo)

A.1 Diagrama de flujo del análisis químico

Proporciona diagramas esquemáticos de disolución ácida, combustión y análisis espectral.

Apéndice B (Apéndice Normativo) B.1 Calibración del Instrumento

El ICP-AES se calibró utilizando materiales de referencia estándar ($95\% \pm 0,1\%$ tungsteno) con un intervalo de calibración de 3 meses $\pm 0,5$ meses.

10 Fecha de implementación

Esta norma fue emitida el 15 de junio de 2008 y entró en vigor el 15 de enero de 2009.

Precauciones

El contenido anterior es una versión detallada basada en el formato de la norma ISO y el análisis químico del polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico. El rango de composición (como tungsteno $\geq 93\% \pm 0,1\%$, carbono total $5,9\% - 6,2\%$) se refiere a los datos típicos de las materias primas de carburo cementado, y el método de análisis (como ICP-AES, método de combustión) se basa en la práctica industrial.

La norma ISO 4499-2:2008 se centra en el análisis químico, y el texto puede incluir más impurezas (p. ej., nitrógeno, molibdeno) o parámetros específicos del instrumento. Las revisiones pueden incorporar mejoras en la tecnología espectroscópica moderna.

Para obtener detalles precisos, incluidas revisiones o adaptaciones nacionales, se recomienda consultar las publicaciones oficiales ISO o los organismos de normalización nacionales (por ejemplo, ANSI, BSI).

Tabla de contenido

Parte 3: Optimización del rendimiento del carburo cementado

Capítulo 9: Multifuncionalización del carburo cementado

9.1.1 Conductividad eléctrica del carburo cementado

9.1.1.1 Descripción general del principio y la tecnología de conductividad del carburo cementado

9.1.1.2 Análisis del mecanismo de conductividad del carburo cementado

9.1.1.3 Análisis de los factores que afectan la conductividad del carburo cementado

9.1.1.3.1 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: contenido de Co/Ni

9.1.1.3.3 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: temperatura de sinterización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.1.1.3.4 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: aditivos
- 9.1.1.3.5 Factores que afectan la conductividad del carburo cementado: condición de la superficie
- 9.1.1.3.6 Factores que afectan la conductividad eléctrica del carburo cementado: ejemplo completo
- 9.1.1.4 Optimización de la conductividad del carburo
 - 9.1.1.4.1 Optimización de la conductividad del carburo – Optimización de la composición
 - 9.1.1.4.2 Optimización de la conductividad del carburo - Optimización del proceso de sinterización
 - 9.1.1.4.3 Optimización de la conductividad del carburo - Optimización del tratamiento de superficies
 - 9.1.1.4.4 Optimización de la conductividad del carburo: sustitución de Ni
 - 9.1.1.4.5 Optimización de la conductividad del carburo cementado: equilibrio entre conductividad y resistencia a la corrosión
 - 9.1.1.4.6 Optimización de la conductividad del carburo - Diseño de aleaciones
 - 9.1.1.4.7 Especificación de prueba para la conductividad del carburo cementado
 - 9.1.1.4.8 Efecto de optimización integral de la conductividad del carburo cementado
- 9.1.1.5 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo
 - 9.1.1.5.1 Aplicaciones de conductividad de carburo: contactos electrónicos
 - 9.1.1.5.2 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo: electrodo de carburo para electroerosión por electroerosión
 - 9.1.1.5.3 Aplicación de ingeniería de la conductividad del carburo: sustrato de revestimiento conductor de carburo
 - 9.1.1.5.4 Aplicaciones de ingeniería de la conductividad del carburo: otras aplicaciones potenciales
 - 9.1.1.5.5 Beneficios integrales de las aplicaciones de ingeniería de la conductividad del carburo cementado
- 9.1.2 Pruebas magnéticas y control de calidad del carburo cementado
 - 9.1.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.2 Análisis del mecanismo magnético del carburo cementado
 - 9.1.2.2.1 Fuente de magnetismo de carburo
 - 9.1.2.2.2 Efecto de la microestructura en las propiedades magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.2.3 Continuidad de la interfaz y red de fase magnética de carburo cementado
 - 9.1.2.2.4 Correlación entre las pruebas magnéticas y el rendimiento del carburo cementado
 - 9.1.2.2.5 Efectos ambientales y de temperatura sobre las propiedades magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.3 Análisis de los factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.3.1 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - Contenido de Co
 - 9.1.2.3.2 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado: tamaño de grano
 - 9.1.2.3.3 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - Adición de Ni
 - 9.1.2.3.4 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - proceso de sinterización
 - 9.1.2.3.5 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado - Contenido de carbono
 - 9.1.2.3.6 Ejemplo completo de factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.4 Estrategia de optimización de las propiedades magnéticas del carburo cementado
 - 9.1.2.5 Aplicación de ingeniería del magnetismo de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.2 Propiedades compuestas de carburo cementado resistentes al desgaste, a la corrosión y conductoras

Teoría de las propiedades compuestas de resistencia al desgaste, a la corrosión y conductividad del carburo cementado

9.2.1.1 Principio y descripción general de la tecnología de los materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.1.2 Tecnología de preparación y rendimiento de los materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.1.3 Análisis del mecanismo de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.1.4 Análisis de los factores que afectan el rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.1.5 Estrategia de optimización del rendimiento de los compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.1.6 Aplicaciones de ingeniería de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2 Prueba de rendimiento de compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2.1 Principio de la prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2.2 Métodos y equipos de prueba de rendimiento del material compuesto de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2.3 Análisis del mecanismo de prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.2.2.4 Métodos de prueba de rendimiento de materiales compuestos de carburo cementado WCTiCNi

9.3 Autolubricación y antiadherencia del carburo cementado

9.3.1 Teoría de la autolubricación y antiadherencia del carburo cementado

Introducción de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

9.3.2.1 Descripción general del principio y la tecnología de los lubricantes sólidos de carburo cementado

9.3.2.2 Análisis del mecanismo de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

9.3.2.3 Análisis de factores que afectan a los lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

9.3.2.4 Optimización de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

9.3.2.3 Aplicaciones de ingeniería de lubricantes sólidos de carburo cementado (MoS₂, C)

9.3.2 Textura de la superficie del carburo y mecanismo de lubricación

9.3.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías del mecanismo de lubricación y la textura de la superficie del carburo cementado

9.3.2.2 Tecnología de procesamiento de textura de superficie de carburo cementado

9.3.2.3 Textura superficial y mecanismo de lubricación del carburo cementado

9.3.2.4 Observación microscópica y verificación de la textura de la superficie del carburo cementado

9.3.2.5 Efecto de los parámetros de textura de la superficie del carburo

9.3.2.6 Análisis de los factores que afectan la textura de la superficie y la lubricación del carburo cementado

9.3.2.7 Textura de la superficie del carburo cementado y estrategia de optimización de la lubricación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 9.3.2.8 Textura de superficie de carburo cementado y aplicación de ingeniería de lubricación
- 9.4 Biónica y carburo cementado inteligente
 - 9.4.1 Microestructura biónica del carburo cementado (gradiente y porosa)
 - 9.4.1.1 Principio y descripción general de la tecnología del gradiente de carburo cementado y la estructura porosa
 - 9.4.1.2 Mecanismo y análisis del gradiente de carburo cementado y estructura porosa
 - 9.4.1.3 Análisis de los factores que afectan la microestructura biónica, el gradiente y la estructura porosa del carburo cementado
 - 9.4.1.4 Optimización de la microestructura biónica, gradiente y estructura porosa del carburo cementado
 - 9.4.1.5 Aplicaciones de ingeniería de microestructuras biónicas de carburo cementado, estructuras de gradiente y porosas
 - 9.4.2 Perspectivas del carburo cementado de respuesta inteligente
 - 9.4.2.1 Descripción general del principio de carburo de respuesta inteligente
 - 9.4.2.2 Análisis del mecanismo de carburo cementado de respuesta inteligente
 - 9.4.2.3 Análisis de factores que afectan la respuesta inteligente del carburo cementado
 - 9.4.2.4 Estrategia de optimización de carburo cementado de respuesta inteligente
 - 9.4.2.5 Aplicación de ingeniería de carburo cementado de respuesta inteligente

Referencias

apéndice

- Resumen de la aplicación de ingeniería multifuncional del carburo cementado
- Una breve historia del desarrollo del carburo cementado en gradiente
- Bola de carburo
- Carburo de respuesta inteligente
- Armadura de carburo de baja densidad
- Herramientas de corte de carburo inteligentes
- Electrodo EDM de carburo
- Sustrato de revestimiento conductor de carburo
- Piezas de carburo cementado para reducción de peso en aviación
- Implantes biomédicos de carburo cementado
- Molde inteligente de carburo
- Piezas de robot de carburo
- Sensor de aviación de carburo
- Herramientas de corte de carburo inteligentes
- Contactos electrónicos de carburo
- Propiedades magnéticas del carburo cementado y sus pruebas según normas nacionales chinas, normas internacionales, normas europeas y americanas.
- GB/T 17951-2022: Condiciones técnicas generales para materiales magnéticos duros
- Norma nacional china GB/T 5242-1985 Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado
- ISO 9934-1:2015 Ensayos no destructivos — Ensayos con partículas magnéticas Parte 1:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principios generales

ISO 3326:2013 Carburo cementado — Métodos de ensayo para determinar la dureza y la tenacidad a la fractura

ISO 4499-2:2008 Carburo cementado — Polvo de carburo de tungsteno de grado metalúrgico —
Parte 2: Análisis químico

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

30 years of experience: We are well versed in cemented carbide production and processing , with mature and stable technology and continuous improvement .

Precision customization: Supports special performance and complex design , and focuses on customer + AI collaborative design .

Quality cost: Optimized molds and processing, excellent cost performance; leading equipment, RMI, ISO 9001 certification.

Serving Customers

The products cover cutting, tooling, aviation, energy, electronics and other fields, and have served more than 100,000 customers.

Service Commitment

1+ billion visits, 1+ million web pages, 100,000+ customers, and 0 complaints in 30 years!

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



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