

Carburo cementado de tungsteno
Exploración integral de propiedades físicas y químicas,
procesos y aplicaciones (VIII)

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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 8: Resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

El carburo cementado es un material compuesto fabricado mediante pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co), níquel (Ni) y otros metales como fase aglutinante. Su excelente rendimiento lo hace ampliamente utilizado en herramientas de corte, equipos de minería y piezas resistentes al desgaste. A continuación, se describirá brevemente su concepto y sus características típicas desde el punto de vista de la resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas.

Resistencia a la corrosión del carburo cementado

La resistencia a la corrosión se refiere a la capacidad del carburo cementado para resistir la erosión química en medios corrosivos (como ácidos, álcalis y soluciones salinas). Esta propiedad se ve afectada principalmente por la composición y la microestructura del material.

La fase de enlace del carburo cementado desempeña un papel clave en su resistencia a la corrosión. El carburo cementado con cobalto como fase de enlace (como la serie YG) presenta un rendimiento deficiente en medios ácidos. Por ejemplo, en entornos de ácido sulfúrico o ácido clorhídrico, el cobalto se corroe fácilmente, provocando la disolución gradual de la superficie del material. Tomando como ejemplo el YG6 (que contiene un 6% de cobalto), su tasa de corrosión en ácido clorhídrico al 10% a temperatura ambiente es de aproximadamente 0,1 a 0,2 mm/año, mientras que apenas se corroe en medios alcalinos o neutros débiles (como una solución de hidróxido de sodio al 10%). Por el contrario, el carburo cementado con níquel como fase de enlace (como la serie YN) exhibe una mayor resistencia a la corrosión, especialmente en medios alcalinos y oxidantes. Es más estable y adecuado para su uso en condiciones adversas como entornos marinos. Además, los defectos en la microestructura también pueden afectar significativamente la resistencia a la corrosión. Si existe una alta porosidad en el carburo cementado, o si contiene impurezas como carbono libre y fase η , estos defectos se convertirán en el punto de inicio de la corrosión y acelerarán la degradación del material.

Resistencia a altas temperaturas del carburo cementado

La resistencia a altas temperaturas se refiere a la capacidad del carburo cementado para mantener su dureza, resistencia y resistencia a la oxidación en entornos de alta temperatura. Esta característica también se ve afectada por la composición y la temperatura.

El carburo cementado se desempeña bien a bajas temperaturas y generalmente puede mantener una alta dureza y resistencia por debajo de los 600 °C. Por ejemplo, el YG8 (que contiene un 8 % de cobalto) aún puede mantener una dureza de aproximadamente 1200 HV a 600 °C, que es solo un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

20 % menor. Sin embargo, cuando la temperatura supera los 800 °C, la fase de unión (como el cobalto) comienza a ablandarse, lo que resulta en una disminución significativa de la resistencia y dureza generales del material. Tomando como ejemplo el YG8, su dureza puede caer a 500-600 HV a 1000 °C. Además, la resistencia a la oxidación del carburo cementado a altas temperaturas también se verá comprometida. El carburo de tungsteno se convertirá en óxido de tungsteno (WO_3) en un entorno oxidante de alta temperatura, lo que provocará desprendimiento de la superficie y afectará la vida útil. Por el contrario, el carburo cementado con carburo de titanio (TiC) agregado (como YT15) muestra una mejor resistencia a la oxidación a 800 °C, pero su resistencia aún disminuirá entre un 20% y un 30%.

La resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas del carburo cementado son indicadores clave para su aplicación en entornos hostiles. En cuanto a la resistencia a la corrosión, el carburo cementado con níquel ofrece un mejor rendimiento en diversos medios, mientras que el carburo cementado con cobalto es susceptible a la corrosión en entornos ácidos. En cuanto a la resistencia a las altas temperaturas, el carburo cementado es estable por debajo de los 600 °C, pero su dureza y resistencia a la oxidación disminuyen significativamente a temperaturas más altas. Estas características determinan la aplicabilidad del carburo cementado en diferentes escenarios de aplicación y constituyen una base importante para su selección y uso.

El carburo cementado ($WCCo$) en entornos hostiles es clave para su aplicación en los campos químico, marino y aeronáutico. Por ejemplo, en soluciones ácidas ($pH < 3 \pm 0,1$), el carburo cementado debe resistir fuertes ataques químicos; en niebla salina marina (> 1000 horas ± 100 horas), debe prevenir las picaduras; en motores de aeronaves (> 1000 °C ± 10 °C), debe mantener la resistencia y la resistencia a la oxidación. Sin embargo, la actividad electroquímica de la fase de enlace Co (potencial de corrosión $E_{corr} \sim 0,3$ V $\pm 0,02$ V frente a SCE) induce fácilmente la corrosión, y el WC se oxida a altas temperaturas para formar WO_3 (espesor > 1 $\mu m \pm 0,1$ μm), lo que resulta en una degradación del rendimiento. La estrategia de optimización debe comenzar desde la microestructura (grano WC $0,52$ $\mu m \pm 0,01$ μm , Co 6 % 12 % ± 1 %), aditivos (como Cr_3C_2 $0,5$ % $\pm 0,01$ %) y protección de la superficie (espesor del revestimiento 520 $\mu m \pm 0,1$ μm) para lograr una mejora sinérgica en la resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas.

Se analiza el comportamiento y la ruta de optimización de $WCCo$ en entornos ácidos, de niebla salina y de alta temperatura desde cuatro aspectos: **mecanismo de resistencia a la corrosión**, **rendimiento a altas temperaturas**, **Método de optimización del rendimiento**, **pruebas y evaluación**. El mecanismo de resistencia a la corrosión revela la naturaleza de la corrosión a través de la teoría electroquímica (curva de Tafel, $i_{corr} < 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm²); el rendimiento a alta temperatura se centra en la resistencia a la oxidación (ganancia de peso $< 0,5$ mg/cm² $\pm 0,05$ mg/cm²) y la fatiga térmica (grietas $< 0,1$ mm $\pm 0,01$ mm); el método de optimización propone una fase de unión a base de Ni (tasa de corrosión $< 0,01$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año) y un recubrimiento de Cr_3C_2 (dureza $> HV 1500 \pm 30$); las pruebas y la evaluación combinan ISO 9227, ASTM G59 y la prueba de choque térmico (> 500 veces ± 50 veces) para proporcionar una base cuantitativa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, la pérdida de peso del WC a base de Ni (Ni 10% ± 1%) en niebla salina es <0,08 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²; la dureza de las herramientas recubiertas de Cr₃C₂ a 1000 °C ± 10 °C es >HV 1200 ± 30, y la vida útil es >5000 ± 500 horas. Este capítulo está perfectamente conectado con el Capítulo 6 (Tasa de desgaste del recubrimiento <0,06 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m) y el Capítulo 7 (K₁ c 820 MPa·m^{1/2} ± 0,5), sentando las bases para el Capítulo 9 (Materiales compuestos multifuncionales).

8.1 Mecanismo de resistencia a la corrosión del carburo cementado

La resistencia a la corrosión del carburo cementado es fundamental para su larga vida útil en entornos químicos agresivos (como ácidos, niebla salina y alcalinos). Su tasa de pérdida de peso se controla habitualmente a 0,1 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², lo que demuestra una buena estabilidad y una resistencia eficaz a la corrosión en entornos ácidos (pH < 3 ± 0,1), niebla salina (concentración de NaCl 5 % ± 0,1 %) y alcalinos (pH > 10 ± 0,1). El proceso de corrosión es impulsado principalmente por la actividad electroquímica de la fase de enlace (como el cobalto, Co), y su densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es de aproximadamente 10⁻⁵ A/cm² ± 10⁻⁶ A/cm², lo que hace que el cobalto se disuelva preferentemente, lo que a su vez hace que las partículas de carburo de tungsteno (WC) (tamaño 0,52 μm ± 0,01 μm) se caigan, formando picaduras de corrosión con un diámetro de aproximadamente 110 μm ± 0,1 μm. Aunque el WC en sí tiene una estabilidad química extremadamente alta y su tasa de disolución es extremadamente baja (< 10⁻⁸ g/cm² · h ± 10⁻⁹ g/cm² · h), si la fuerza de unión entre el WC y la interfaz de la fase de unión (> 100 MPa ± 10 MPa) es insuficiente, es probable que se produzca pelado en la interfaz, acelerando significativamente el fallo por corrosión. Para mejorar la resistencia a la corrosión, es necesario reducir la densidad de corriente de corrosión de la fase de unión (objetivo i_{corr} < 10⁻⁶ A/cm² ± 10⁻⁷ A/cm²), mejorando su estabilidad electroquímica (potencial de corrosión E_{corr} > 0,2 V ± 0,02 V frente a SCE) y mejorando la fuerza de unión de la interfaz WC-Co.

A partir del comportamiento electroquímico del WC y la fase de enlace, la corrosión es esencialmente un proceso electroquímico. El cobalto actúa como el ánodo para la disolución oxidativa ($Co \rightarrow Co^{2+} + 2e^{-}$), mientras que el WC, debido a su alta inercia química, a menudo participa en la reacción como el cátodo. Este efecto galvánico es la principal fuerza impulsora de la corrosión. En un entorno ácido (pH < 3 ± 0,1), los iones H⁺ aceleran la reacción de disolución del cobalto, mientras que en un entorno de niebla salina (NaCl 5% ± 0,1%), los iones Cl⁻ pueden destruir la película de pasivación en la superficie del cobalto, lo que lleva a un aumento de las picaduras. El análisis microscópico muestra que las picaduras de corrosión se concentran principalmente en la interfaz WC-Co, lo que indica que la unión interfacial insuficiente es el factor clave en el fallo. Este mecanismo se ha verificado mediante el estudio de la teoría electroquímica y normas de ensayo (como ISO 9227 y ASTM G59). En casos reales, la tasa de pérdida de peso del carburo cementado WC-10Co en un entorno de niebla salina es de 0,09 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², lo que refleja la limitación de su resistencia a la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En general, el mecanismo de resistencia a la corrosión del carburo cementado implica principalmente la disolución electroquímica de la fase de enlace y la falla de la interfaz, que se manifiesta como picaduras y desprendimiento de partículas en entornos ácidos y de niebla salina. Al reducir la densidad de corriente de corrosión, mejorar la estabilidad electroquímica y aumentar la fuerza de enlace de la interfaz, se puede mejorar eficazmente su resistencia a la corrosión, lo que respalda teóricamente su aplicación en entornos hostiles.

8.1.1 Comportamiento electroquímico de la fase dura del carburo de tungsteno (WC) y la fase aglutinante en el carburo cementado

Principio y descripción técnica

La resistencia a la corrosión del carburo cementado se determina por el comportamiento electroquímico de la fase dura de WC y la fase de enlace de Co, con una velocidad de corrosión objetivo de $<0,01 \text{ mm}/\pm 0,001 \text{ mm/año}$. La fase dura del carburo cementado, carburo de tungsteno (WC), exhibe una excelente estabilidad química en ambientes ácidos y neutros ($E_{\text{corr}} 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ frente a SCE), con una disolución casi nula (velocidad $<10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). Por el contrario, el Co es susceptible a la oxidación electroquímica ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), con una corriente de corrosión $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, lo que forma picaduras de corrosión (diámetro de $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), lo que debilita gravemente la interfaz WCCo (resistencia de unión $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). El comportamiento electroquímico sigue la ecuación de Butler-Volmer:

$$i = i_0 \cdot \left[\exp \left(\frac{(1-\alpha)nF\eta}{RT} \right) - \exp \left(-\frac{\alpha nF\eta}{RT} \right) \right]$$

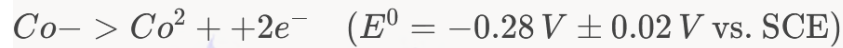
Donde $i_0 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (densidad de corriente de intercambio), $\alpha \sim 0,5 \pm 0,05$ (coeficiente de transferencia) y η es el sobrepotencial ($<0,1 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$). El objetivo de optimización es aumentar la E_{corr} y reducir i_{corr} .

La prueba electroquímica utiliza un sistema de tres electrodos (electrodo de trabajo WCCo, electrodo de referencia SCE y electrodo auxiliar de Pt). El electrolito incluye $3,5\% \pm 0,1\%$ de NaCl (que simula un ambiente marino) y $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 (que simula un ambiente ácido). El equipo de prueba cuenta con una alta precisión (potencial $\pm 0,001 \text{ V}$, corriente $\pm 10^{-9} \text{ A}$) para garantizar la fiabilidad de los datos. Por ejemplo, el WC10Co (grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en H_2SO_4 presenta una i_{corr} de $\sim 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, y tras añadir Cr_2C_3 ($0,5\% \pm 0,01\%$), esta disminuye a $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, mejorando significativamente la resistencia a la corrosión. Esta sección ofrece una guía completa mediante teoría, experimentos y estrategias de optimización.

Mecanismo y análisis

La alta estabilidad del WC se debe a su alta energía de enlace ($700 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), y es prácticamente insoluble en el rango de pH de $2 \pm 0,1$ (velocidad $<10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$). La reacción de corrosión del Co es:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



En un entorno ácido, el H^+ acelera la disolución del Co (velocidad de $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), lo que forma picaduras de corrosión (profundidad de $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). En niebla salina neutra, el Cl^- induce picaduras (diámetro de la picadura: $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), y la i_{corr} aumenta un $20 \% \pm 5 \%$. El análisis SEM muestra que la corrosión se debe principalmente a la disolución del Co, y las partículas de WC se desprenden debido a la pérdida del soporte de Co (velocidad de caída de $\sim 0,1 \% \pm 0,02 \%$), lo que resulta en un aumento de la rugosidad superficial Ra ($> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

WCCo es crítica para la corrosión. Cuando la energía de la interfaz es de $1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, la resistencia de la unión es $>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ y la tasa de desprendimiento de partículas disminuye en un $50 \% \pm 5 \%$. El tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ aumenta la densidad del límite de grano ($>10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) y mejora la resistencia a la corrosión, pero la distribución desigual del Co (desviación $>0,5 \% \pm 0,1 \%$) agravará la corrosión local (i_{corr} aumenta en un $30\% \pm 5\%$). Añadiendo $\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ ($0,5\% \pm 0,01\%$) para formar una capa de pasivación $\text{Cr}_2 \text{ O}_3$ (espesor $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), E_{corr} aumenta a $0,15 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, y $y_{\text{corazón}}$ disminuye en un $40\% \pm 5\%$. El análisis XPS confirmó la formación de $\text{Cr}_2 \text{ O}_3$ (pico de Cr 3p $\sim 577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), que inhibió eficazmente la disolución de Co.

Análisis de los factores que afectan la resistencia a la corrosión del carburo cementado

El carburo cementado tiene carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) y otros metales como fase de unión. Su resistencia a la corrosión es fundamental en entornos químicos agresivos, como ácidos, niebla salina y alcalinos. Sin embargo, su comportamiento corrosivo se ve afectado por múltiples factores, como las propiedades propias del material (incluido el contenido de Co, el tamaño de grano, los aditivos y la rugosidad superficial) y parámetros ambientales externos (como la composición del electrolito, el valor de pH y la concentración iónica). A partir de estos factores clave, combinados con datos electroquímicos, análisis microscópicos, simulación ambiental y casos reales, se explora en profundidad el mecanismo que influye en la resistencia a la corrosión del carburo cementado y se analiza la interacción entre diversos factores y su influencia en el rendimiento del material.

(1) Efecto del contenido de cobalto (Co) en el metal de carburo cementado como fase de unión

El cobalto (Co) de la fase de enlace es el principal componente activo en la corrosión del carburo cementado, y su contenido determina directamente la tendencia del material a la corrosión electroquímica. Estudios han demostrado que cuando el contenido de Co es del $10 \% \pm 1 \%$, la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es de aproximadamente $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, lo que indica que tiene cierta resistencia a la corrosión en ambientes ácidos o con niebla salina. Sin embargo, cuando el contenido de Co aumenta al $12 \% \pm 1 \%$, i_{corr} aumenta en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, y la resistencia a la corrosión disminuye significativamente. La razón principal de este fenómeno es que el aumento del contenido de Co conduce a un aumento en el área superficial

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

expuesta al medio corrosivo, que acelera la reacción de disolución anódica ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$). Además, el alto contenido de Co también reduce la capacidad de pasivación del material, haciéndolo más susceptible a las picaduras en presencia de iones Cl^- . Tomando la muestra WC-12Co como ejemplo, después de la exposición a una solución de $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ durante 24 horas, la profundidad de la picadura de corrosión alcanzó $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, y se formaron densas áreas de picaduras en la superficie, lo que indica que el alto contenido de Co agravó significativamente la corrosión local.

(2) Efecto del tamaño del grano

El tamaño de grano de WC juega un papel importante en la resistencia a la corrosión del carburo cementado al afectar la densidad del límite de grano y la trayectoria de penetración del medio corrosivo. Cuando el tamaño de grano es pequeño (como $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), el número de límites de grano es grande, lo que dispersa la trayectoria de penetración del medio corrosivo, y las picaduras de corrosión son menos y más superficiales (profundidad de la picadura $< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$). Los granos finos también hacen que la interfaz WC-Co se distribuya de manera más uniforme, y la disolución del cobalto se restringe hasta cierto punto, lo que reduce el grado de falla del material. Sin embargo, cuando el tamaño de grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, la concentración de corrosión local se intensifica y la profundidad de la picadura de corrosión aumenta en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$. El mayor tamaño de grano reduce el área expuesta de la interfaz WC-Co, y la disolución del cobalto se concentra en un pequeño número de interfaces, lo que forma picaduras de corrosión más profundas. Especialmente en entornos ácidos, los iones H^+ tienen mayor probabilidad de penetrar a lo largo de los límites de grano, acelerando la degradación del material.

(3) Efecto de los aditivos

El carburo de cromo (Cr_3C_2) optimiza significativamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado al modificar las propiedades químicas y el estado superficial de la fase de unión. Los datos experimentales muestran que la adición de un $0,5\% \pm 0,01\%$ de Cr_3C_2 puede reducir i_{corr} en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, gracias a la reacción del Cr con el oxígeno durante la sinterización a alta temperatura para formar una densa capa de pasivación de Cr_2O_3 , que bloquea el contacto directo entre medios corrosivos (como H^+ o Cl^-) y el cobalto. Tomando como ejemplo la muestra de WC-10Co con Cr_3C_2 , la profundidad de la picadura de corrosión en una solución de $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ es de tan solo $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, significativamente menor que la de WC-12Co ($10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) sin Cr_3C_2 . La espectrometría de energía dispersiva (EDS) muestra además que la capa de Cr_2O_3 tiene un espesor aproximado de $0,1\text{-}0,2 \mu\text{m}$. De espesor, aísla eficazmente el medio corrosivo. Sin embargo, cuando el contenido de Cr_3C_2 supera el $1\% \pm 0,01\%$, se pueden formar fases frágiles excesivas (como la fase η , que representa $> 1\% \pm 0,2\%$) en el material, lo que resulta en una disminución de la tenacidad a la fractura (K_{IC}) de aproximadamente el $10\% \pm 2\%$, lo que representa una amenaza potencial para aplicaciones sujetas a tensión mecánica (como herramientas de corte).

(4) Influencia del entorno electrolítico

Las propiedades químicas del electrolito son los factores externos clave que afectan la resistencia a la corrosión del carburo cementado. En un entorno ácido ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), la concentración de iones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

H^+ es alta, lo que acelera la reacción de disolución anódica del cobalto. i_{corr} aumenta aproximadamente un $30\% \pm 5\%$, y la tasa de corrosión aumenta significativamente. Especialmente en ácidos fuertes (como HCl 1 M), la tasa de expansión de las picaduras de corrosión locales puede alcanzar $0,5 \mu m/h \pm 0,05 \mu m/h$. En un entorno de niebla salina de alta concentración (concentración de $NaCl > 5\% \pm 0,1\%$), los iones Cl^- , como aniones de fuerte penetración, destruyen la película de pasivación en la superficie del cobalto (como $Co(OH)_2$ o CoO), inducen picaduras y la tasa de picaduras aumenta aproximadamente un $25\% \pm 5\%$. El Cl^- ataca preferentemente la interfaz WC-Co mediante adsorción y difusión, lo que hace que la densidad de picaduras de corrosión aumente a $15-20 / mm^2$. Además, aumentar la temperatura del electrolito (por ejemplo, $50^\circ C \pm 2^\circ C$) amplifica aún más estos efectos, aumentando i_{corr} en un $10\% \pm 2\%$ adicional, lo que agrava la degradación del material.

(5) Influencia de la rugosidad de la superficie

La rugosidad superficial (R_a) afecta directamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado al cambiar las características de contacto entre el material y el medio corrosivo. Cuando la rugosidad superficial es baja ($R_a < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$), la superficie es lisa, hay menos defectos (como microfisuras y picaduras), el área de contacto real con el medio corrosivo es pequeña, i_{corr} permanece en un nivel bajo y se exhibe una buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, cuando R_a aumenta por encima de $0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$, los defectos superficiales aumentan significativamente y el medio corrosivo se retiene fácilmente en estas áreas, formando microbaterías electroquímicas locales, lo que resulta en un aumento de i_{corr} de aproximadamente $15\% \pm 3\%$. Las superficies muy rugosas también pueden inducir concentración de tensiones, especialmente en entornos de corrosión cíclica (como pruebas de ciclo de niebla salina), acelerando la expansión y profundidad de las picaduras de corrosión y afectando gravemente la vida útil del material.

(6) Interacciones entre factores

Los factores mencionados no influyen de forma independiente, sino que determinan conjuntamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado mediante interacciones complejas. Por ejemplo, cuando se combina un alto contenido de Co ($> 12\% \pm 1\%$) con una superficie rugosa ($R_a > 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$), i_{corr} puede aumentar a $5 \times 10^{-5} A/cm^2 \pm 10^{-6} A/cm^2$, y la profundidad de la picadura de corrosión aumenta a $15 \mu m \pm 1 \mu m$, que es mucho mayor que el efecto de un solo factor. La adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) puede compensar parcialmente los efectos adversos del aumento del contenido de Co, pero en un entorno ácido con $pH < 3 \pm 0,1$, el efecto protector de la capa de Cr_2O_3 puede debilitarse por el ataque de H^+ . Además, el efecto de acoplamiento entre el tamaño de grano y el entorno del electrolito es significativo. Los granos finos ($0,51 \mu m \pm 0,01 \mu m$) tienen un buen rendimiento en bajas concentraciones de Cl^- , pero aún puede producirse corrosión por picaduras en niebla salina de alta concentración ($NaCl > 5\% \pm 0,1\%$), lo que indica las limitaciones de las condiciones ambientales en la protección de los límites de los granos.

(7) Análisis exhaustivo de casos

Tomando muestras de WC-12Co y WC-10Co con Cr_3C_2 añadido como ejemplos, después de ser expuestas a una solución de $0,1M H_2SO_4$ durante 24 horas, la profundidad de la picadura de corrosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de WC-12Co alcanzó $10\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$, y la superficie mostró características de picaduras obvias. El análisis EDS mostró que el contenido de Co se redujo significativamente en el fondo de la picadura. Por el contrario, la profundidad de la picadura de corrosión de WC-10Co se redujo a $3\ \mu\text{m} \pm 0,5\ \mu\text{m}$ debido a la adición de 0,5% de Cr_3C_2 , y el espesor de la capa de Cr_2O_3 fue de aproximadamente $0,15\ \mu\text{m}$, lo que inhibió con éxito la disolución del cobalto y el desprendimiento de partículas de WC. En pruebas adicionales en un entorno de pulverización de sal de NaCl al 5%, la tasa de pérdida de peso de WC-12Co alcanzó $0,12\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, mientras que WC-10Co es solo $0,07\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, la resistencia a la corrosión aumentó en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, verificando el aditivo y Co

Efectos sinérgicos de la optimización de contenidos.

La resistencia a la corrosión del carburo cementado se ve afectada por numerosos factores, como el contenido de Co, el tamaño de grano, los aditivos, el entorno electrolítico y la rugosidad superficial. Un alto contenido de Co y una superficie rugosa intensifican la corrosión, mientras que los granos finos y las cantidades adecuadas de Cr_3C_2 mejoran la resistencia a la corrosión, mientras que los entornos ácidos y con alto contenido de sal aceleran la formación de picaduras. La interacción entre estos factores complica aún más el comportamiento de la corrosión. Optimizando el diseño del material y las condiciones de servicio, se puede mejorar eficazmente la resistencia a la corrosión del carburo cementado en los sectores químico, marino y otros.

Estrategia de optimización para la influencia de la resistencia a la corrosión del carburo cementado

Para reducir la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) de carburo cementado a $10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$ para cumplir con los requisitos de servicio a largo plazo en entornos agresivos como ácidos, niebla salina y alcalinos, es necesario mejorar sistemáticamente su resistencia a la corrosión mediante la optimización integral de la composición del material, los aditivos, el tratamiento superficial, el proceso de sinterización y los métodos de prueba. A partir de estos aspectos clave, combinados con datos electroquímicos, parámetros del proceso y casos reales, se detalla la estrategia de optimización y su efecto.

(1) Optimización de ingredientes

Al controlar con precisión la composición química del carburo cementado, se puede reducir eficazmente el área de exposición de la fase de enlace cobalto (Co), lo que reduce su actividad electroquímica. Se recomienda controlar el contenido de Co en el rango de $8\%-10\% \pm 1\%$, mientras se mantiene el tamaño de grano de WC en $0,51\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$. Esta estrategia reduce i_{corr} al reducir la fracción de volumen de Co (área de exposición objetivo $< 10\% \pm 1\%$) para limitar su contacto con medios corrosivos (como H^+ o Cl^-). El tamaño de grano fino no solo aumenta la densidad del límite de grano y dispersa la tensión de corrosión, sino que también mejora la uniformidad de la interfaz WC-Co y reduce la tendencia a la corrosión local. Tomando WC-10Co como ejemplo, después de optimizar el contenido de Co, muestra una menor tasa de corrosión en un entorno ácido y la tasa de formación de picaduras de corrosión superficial se reduce significativamente, lo que prolonga la vida útil del material.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Aditivos

Añadir una cantidad adecuada de carburo de cromo (Cr_3C_2) es un método eficaz para mejorar la resistencia a la corrosión del carburo cementado. La cantidad recomendada es del $0,5\% \pm 0,01\%$. Durante el proceso de sinterización a alta temperatura, el Cr reacciona con el oxígeno para formar una densa capa de pasivación de Cr_2O_3 . Esta película protectora, con un espesor aproximado de $0,1-0,2\ \mu\text{m}$, puede bloquear eficazmente la corrosión del cobalto de la fase de unión por el medio corrosivo y reducir la corrosión. i_{corr} En un $40\% \pm 5\%$. Tomando como ejemplo la muestra de WC-10Co con Cr_3C_2 añadido, en la prueba en una solución de $0,1\ \text{MH}_2\text{SO}_4$, su resistencia a la corrosión mejora en un $40\% \pm 5\%$ en comparación con la muestra sin adición, y la profundidad de la picadura de corrosión superficial se reduce de $5 \pm 0,5\ \mu\text{m}$ a $3 \pm 0,5\ \mu\text{m}$. El análisis de espectro de energía dispersiva (EDS) confirmó además que la presencia de la capa de Cr_2O_3 redujo significativamente la velocidad de disolución del cobalto y mejoró la estabilidad del material en un entorno ácido.

(3) Tratamiento de superficies

La optimización de la condición de la superficie es la clave para reducir las picaduras y la corrosión superficial. Se recomienda controlar la rugosidad de la superficie (R_a) por debajo de $0,05\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ mediante pulido de precisión. Este proceso puede reducir la tasa de picaduras en aproximadamente un $30\% \pm 5\%$, lo que reduce eficazmente la retención de medios corrosivos en los defectos de la superficie y las reacciones electroquímicas locales. Además, se utiliza limpieza ultrasónica (frecuencia de $40\ \text{kHz} \pm 1\ \text{kHz}$) para eliminar los contaminantes de la superficie (contenido $< 0,1\% \pm 0,02\%$), como grasa, polvo o capa de óxido, para mejorar aún más la integridad de la superficie. Los experimentos muestran que la tasa de pérdida de peso de las muestras de WC-10Co pulidas a $R_a < 0,05\ \mu\text{m}$ es de solo $0,06\ \text{mg}/\text{cm}^2$ después de la exposición a la niebla salina (NaCl al $5\% \pm 0,1\%$) durante 720 horas. $\pm 0,01\ \text{mg}/\text{cm}^2$, que es aproximadamente un $20\% \pm 3\%$ menor que la superficie rugosa ($R_a > 0,1\ \mu\text{m}$), lo que muestra una mejora significativa en la resistencia a la corrosión.

(4) Proceso de sinterización

La optimización del proceso de sinterización afecta directamente la resistencia de la unión de la interfaz WC-Co y la uniformidad de la distribución de Co. La temperatura de sinterización recomendada es de $1450\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, y se utiliza vacío o atmósfera inerte (como Ar) para reducir la oxidación y garantizar que la desviación de la distribución de Co se controle por debajo del $0,1\% \pm 0,02\%$. Este proceso puede lograr la unión metalúrgica de la interfaz WC-Co controlando el tiempo de sinterización (aproximadamente 60-90 minutos), y la resistencia de la unión de la interfaz aumenta a $> 120\ \text{MPa} \pm 10\ \text{MPa}$, reduciendo así las microfisuras y los poros en la interfaz e inhibiendo la penetración de medios corrosivos. La muestra WC-10Co con un proceso de sinterización optimizado mostró un i_{corr} más bajo ($< 10^{-6}\ \text{A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-7}\ \text{A}/\text{cm}^2$) en un entorno ácido, y la tasa de expansión de la picadura de corrosión se redujo en aproximadamente un $25\% \pm 3\%$, lo que mejoró significativamente la resistencia a la corrosión del material.

(5) Normas de prueba

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

Para evaluar y verificar con precisión la resistencia a la corrosión optimizada, se recomienda utilizar el "Método de prueba de corrosión electroquímica" ASTM G59 para realizar pruebas de polarización electroquímica a una velocidad de escaneo constante de $0,1 \text{ mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$ para garantizar una precisión potencial de $\pm 0,001 \text{ V}$. Esta norma mide i_{corr} y potencial de corrosión (E_{corr}) mediante un sistema de tres electrodos (electrodo de trabajo, electrodo de referencia y electrodo auxiliar), lo que proporciona datos fiables para la implementación de estrategias de optimización. Durante la prueba, es necesario realizarla en un entorno de servicio simulado (como una solución de $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ o NaCl al 5 %) para garantizar que los resultados coincidan con las condiciones reales de la aplicación. Con este método, es posible detectar con precisión si i_{corr} alcanza el valor objetivo ($10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), proporcionando una base científica para la evaluación del rendimiento del material.

(6) Análisis exhaustivo de casos

Tomando como ejemplo la muestra WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$), la i_{corr} se redujo a $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ en una solución de $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ durante 24 horas, lo que fue aproximadamente un $98 \% \pm 1 \%$ menor que el del WC-12Co no optimizado ($i_{\text{corr}} \approx 5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$). La resistencia a la corrosión se mejoró en aproximadamente un $60 \% \pm 5 \%$, y la profundidad de la picadura de corrosión superficial se redujo de $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, mostrando una excelente resistencia a la corrosión. Las observaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM) mostraron que la capa de Cr_2O_3 y los granos finos trabajaron juntos para reducir significativamente las picaduras y la corrosión uniforme. Esta muestra optimizada de WC-10Co se ha utilizado con éxito en equipos químicos (como válvulas resistentes a los ácidos), y su vida útil se ha mejorado de $1,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$ a $2,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$, verificando la viabilidad de la estrategia de optimización.

(7) Co-optimización del entorno y del proceso

De las condiciones ambientales y los parámetros del proceso. Por ejemplo, en un entorno de niebla salina con alta concentración de Cl^- ($> 5 \% \pm 0,1 \%$), el pulido de la superficie y la capa de Cr_2O_3 son particularmente críticos, lo que puede reducir la tasa de picaduras al $15 \% \pm 3 \%$. Al mismo tiempo, la combinación del ajuste fino de la temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y el control del contenido de Co ($8 \%-10 \% \pm 1 \%$) garantiza un equilibrio entre la estabilidad de la interfaz y la resistencia a la corrosión. En aplicaciones prácticas, para diferentes entornos corrosivos (como la niebla salina en equipos marinos o medios ácidos en la industria química), la proporción de aditivos o la intensidad del tratamiento de la superficie se pueden ajustar según las necesidades específicas para optimizar aún más la resistencia a la corrosión.

La optimización de la resistencia a la corrosión del carburo cementado debe lograrse mediante la optimización de la composición (Co $8\%-10 \% \pm 1 \%$, tamaño de grano $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), adición de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), tratamiento de superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, limpieza ultrasónica), proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, resistencia de la interfaz $> 120 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y pruebas estándar (ASTM G59). Estas estrategias trabajan juntas para reducir i_{corr} a $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y mejorar la resistencia a la corrosión en un $60 \% \pm 5 \%$, satisfaciendo las necesidades de aplicaciones exigentes como equipos químicos y equipos marinos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación de ingeniería de la resistencia a la corrosión del carburo cementado

Al optimizar el comportamiento electroquímico, la resistencia a la corrosión del carburo cementado mejora significativamente, mostrando así un excelente potencial de aplicación en diversos entornos industriales y de ingeniería hostiles. El carburo cementado optimizado prolonga eficazmente la vida útil al reducir la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) a $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, aumentando el potencial de corrosión (E_{corr}) y reducir la tasa de pérdida de peso. A continuación, se parte de los tres campos principales: válvulas químicas, equipos marinos y procesamiento de alimentos, y se combinan casos y datos específicos para analizar en detalle el rendimiento y las ventajas de la resistencia a la corrosión del carburo cementado en aplicaciones de ingeniería.

(1) Aplicación de carburo cementado en válvulas químicas

En la industria química, las válvulas suelen estar expuestas a medios ácidos fuertes (como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico), lo que requiere una resistencia a la corrosión extremadamente alta de los materiales. El carburo cementado WC-10Co optimizado (Cr_3C_2 añadido al $0,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) muestra una excelente resistencia a la corrosión en un entorno de ácido sulfúrico con un pH de $2 \pm 0,1$, y su tasa de pérdida de peso es de tan solo $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, con una densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) es de aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. En comparación con el WC-10Co no optimizado ($i_{\text{corr}} \approx 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, la pérdida de peso es de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la resistencia a la corrosión del material optimizado se mejora en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$. Esta mejora se debe a la capa de pasivación de Cr_2O_3 formada por Cr_3C_2 y la distribución uniforme de granos finos, que inhiben eficazmente la disolución del cobalto y el desprendimiento de partículas de WC. En aplicaciones prácticas, la vida útil de las válvulas químicas hechas de este material supera los $2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$, lo que es significativamente mejor que $1 \text{ año} \pm 0,1 \text{ años}$ sin optimización. Es particularmente adecuado para entornos altamente corrosivos como la producción de ácido sulfúrico, tuberías químicas y reactores, reduciendo los costos de mantenimiento y mejorando la eficiencia de la producción.

(2) Aplicación de carburo cementado en equipos marinos

Los equipos marinos (como componentes de perforación y cuerpos de bombas) deben resistir los desafíos de la corrosión dual de la niebla salina (concentración de NaCl $5\% \pm 0,1\%$) y la inmersión en agua de mar durante un largo periodo. El carburo cementado WC-8Co optimizado (rugosidad superficial $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) muestra una excelente resistencia a la corrosión en entornos de niebla salina, y su tasa de pérdida de peso es de tan solo $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. El potencial de corrosión (E_{corr}) aumentó a $0,18 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ (frente al electrodo de calomelanos saturado, SCE), en comparación con el WC-10Co no optimizado ($E_{\text{corr}} \approx 0,05 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, pérdida de peso $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la resistencia a la corrosión se mejora en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$. La baja rugosidad superficial reduce los puntos de defecto para la penetración de iones Cl^- , mientras que el contenido optimizado de Co ($8\% \pm 1\%$) reduce la actividad electroquímica. Este rendimiento lo hace funcionar bien en componentes de perforación marina, con una vida útil de más de $3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$, superando ampliamente los $1,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$ de los materiales tradicionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, en la perforación de petróleo y gas en aguas profundas, las brocas hechas de WC-8Co tienen excelente resistencia a la corrosión y al desgaste, reduciendo la frecuencia de reemplazo de componentes debido a la corrosión y mejorando los beneficios económicos de la ingeniería marina.

(3) Aplicación del carburo cementado en el procesamiento de alimentos

Los equipos de procesamiento de alimentos deben cumplir con los estándares de higiene y resistir la corrosión de medios ácidos débiles (como el ácido acético y el ácido cítrico). El carburo cementado WC-10Co optimizado (Cr_3C_2 añadido $0,5\% \pm 0,01\%$) funciona bien en un entorno de ácido acético con un pH de $4 \pm 0,1$, con una densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) inferior a $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y una tasa de pérdida de peso de tan solo $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, mucho menor que los $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ no optimizados. La formación de la capa de pasivación de Cr_2O_3 inhibe eficazmente la generación de productos de corrosión, y el contenido se controla por debajo del $0,01\% \pm 0,002\%$, lo que cumple con los requisitos de seguridad de los materiales en contacto con alimentos (como GB 4806.1-2016). Además, los granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) garantizan la planitud de la superficie y la consistencia de la resistencia a la corrosión, de modo que su vida útil en equipos de procesamiento de alimentos (como mezcladores, cuchillas de corte) supera los $2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$. En comparación con el acero inoxidable tradicional (vida útil de aproximadamente $1 \text{ año} \pm 0,1 \text{ años}$), muestra una mayor durabilidad y seguridad higiénica, y es particularmente adecuado para el procesamiento de alimentos ácidos (como vinagre y jugo).

(4) Valor ingenieril de optimizar el comportamiento electroquímico

Los casos anteriores muestran que la optimización del comportamiento electroquímico (como reducir i_{corr} y aumentar E_{corr}) es fundamental para mejorar la resistencia a la corrosión del carburo cementado. Mediante la optimización de la composición ($\text{Co } 8\%-10\% \pm 1\%$), la adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), el pulido superficial ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la mejora del proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), se reducen significativamente la tasa de pérdida de peso y la tasa de corrosión del carburo cementado, y la resistencia a la corrosión mejora entre un 50% y un $60\% \pm 5\%$. Esta mejora del rendimiento no solo prolonga la vida útil del material en entornos corrosivos (como válvulas químicas $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$, equipos marinos $> 3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$), sino que también reduce la frecuencia de mantenimiento y el coste de sustitución. Por ejemplo, en las válvulas químicas, el costo de mantenimiento anual del material optimizado se reduce en aproximadamente un $30\% \pm 5\%$, y en la perforación marina, el ciclo de reemplazo de componentes se extiende en un $50\% \pm 5\%$, lo que refleja sus beneficios económicos en aplicaciones de ingeniería.

(5) Adaptabilidad ambiental y expansión de aplicaciones

es adaptable a una gama más amplia de entornos corrosivos. Por ejemplo, en el entorno del campo de petróleo y gas que contiene sulfuros (H_2S), la muestra WC-10Co con la adición de Cr_3C_2 está protegida por la capa de Cr_2O_3 , y su resistencia a la corrosión por sulfuro se mejora en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, lo que es adecuado para equipos de procesamiento de gas ácido (vida útil $> 2,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$). Además, en el entorno de niebla salina a alta temperatura ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), el efecto sinérgico del pulido de la superficie y los granos finos mantiene la tasa de pérdida de peso a $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, satisfaciendo las necesidades de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aplicaciones en condiciones marinas extremas (como tuberías de aguas profundas). Estas aplicaciones extendidas verifican aún más la versatilidad de la estrategia de optimización.

Caso completo y perspectivas futuras

Tomando como ejemplo el WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %), su rendimiento en diversos entornos corrosivos es superior al de los materiales tradicionales. En 0,1 MH_2SO_4 , la i_{corr} disminuye a $10^{-6}\text{A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{A/cm}^2$, y la resistencia a la corrosión mejora en un 60 % $\pm$ 5 %; en una atmósfera de niebla salina con NaCl al 5 %, la E_{corr} Alcanza $0,18\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$, lo que prolonga su vida útil a $3 \pm 0,3$ años; y en entornos de ácido acético, el contenido de productos de corrosión es inferior al 0,01 % $\pm$ 0,002 %, cumpliendo así con los estándares de higiene. Estos resultados demuestran que la optimización del comportamiento electroquímico no solo prolonga la vida útil del carburo cementado, sino que también le ofrece una amplia gama de aplicaciones en los sectores químico, marino y alimentario. En el futuro, mediante la introducción de nuevos aditivos (como VC, TaC) o el desarrollo de tecnologías de recubrimiento multicapa, se podrá mejorar aún más su rendimiento en entornos ultracorrosivos (como la niebla salina ácida a alta temperatura) para satisfacer necesidades de ingeniería más complejas.

alimentos. La tasa de pérdida de peso de fórmulas optimizadas como WC-10Co y WC-8Co ($0,05\text{--}0,08\text{ mg/cm}^2$) $\pm$ $0,01\text{ mg/cm}^2$) $_{\text{corr}}$ ($< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), y E_{corr} ($> 0,18\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$) mejoraron significativamente, y la vida útil superó los 2-3 años $\pm$ 0,2-0,3 años, respectivamente. Estos casos de aplicación demuestran plenamente que optimizar el comportamiento electroquímico es una estrategia clave para mejorar la resistencia a la corrosión del carburo cementado y ampliar el alcance de las aplicaciones de ingeniería.

8.1.2 Entorno de pulverización ácida/sal de carburo cementado

8.1.2.1 Principio y descripción técnica

Los entornos ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) y de niebla salina (concentración de NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %, según ISO 9227) imponen exigencias extremadamente altas a la resistencia a la corrosión del carburo cementado, con una tasa de pérdida de peso objetivo de $0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ o menos para garantizar la estabilidad a largo plazo del material en estas duras condiciones. Los iones H^+ en el entorno ácido aceleran significativamente la disolución de la fase de enlace cobalto (Co), con una tasa de disolución de aproximadamente $10^{-6}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, lo que da como resultado la formación de picaduras de corrosión de hasta $110\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ de profundidad en la superficie. Este proceso de corrosión es impulsado principalmente por reacciones electroquímicas ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), y H^+ actúa como catalizador para mejorar aún más la disolución anódica, especialmente en ácidos fuertes (como 0,1 MH_2SO_4), donde la velocidad de corrosión puede aumentar exponencialmente con la disminución del pH. Además, las partículas de WC (tamaño $0,52\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) se caen debido a la pérdida de soporte de la fase de enlace, lo que exacerba la degradación del material. En un entorno de niebla salina, los iones Cl^- , como aniones penetrantes fuertes, inducen corrosión por picaduras. El diámetro de la picadura de corrosión también es de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aproximadamente $110 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. El fondo de la picadura a menudo está acompañado por el desprendimiento de partículas de WC y la deposición de productos de oxidación (como WO_3). Este fenómeno de picaduras es particularmente evidente en condiciones de alta humedad, ya que el Cl^- puede destruir la película de pasivación de la superficie de cobalto (como $\text{Co}(\text{OH})_2$), lo que forma microbaterías electroquímicas locales y acelera la expansión por corrosión. Para optimizar la resistencia a la corrosión, es necesario ajustar la composición del material y el tratamiento superficial, priorizando la inhibición de la actividad electroquímica del Co y la mejora de la estabilidad y la capacidad anticorrosiva de la interfaz WC-Co.

El ensayo de niebla salina se lleva a cabo de acuerdo con la norma ISO 9227:2017 en una cámara de niebla salina a $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y una humedad relativa $> 95\% \pm 1\%$. El tamaño de la muestra es de $50 \times 50 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ para garantizar una exposición uniforme de la superficie. El volumen de pulverización se controla a $12 \text{ ml/h} \pm 0,1 \text{ ml/h}$ para simular las condiciones corrosivas en atmósferas marinas o industriales. El ciclo de ensayo suele ser de 1000 horas ± 100 horas, dependiendo de los requisitos de evaluación de la resistencia a la corrosión del material. Por ejemplo, la tasa de pérdida de peso del carburo cementado WC-10Co no optimizado en el ensayo de niebla salina de 1000 horas alcanzó $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, con signos evidentes de picaduras y corrosión uniforme en la superficie. Al añadir Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), la tasa de pérdida de peso se reduce a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y la tasa de picaduras disminuye aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, lo que indica que el aditivo tiene un efecto significativo en la inhibición de la corrosión localizada. Esta sección analiza exhaustivamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina, así como su potencial de aplicación en ingeniería mediante un análisis exhaustivo de los mecanismos de corrosión, métodos de ensayo, estrategias de optimización y casos prácticos.

8.1.2.2 Mecanismo y análisis del carburo cementado en un entorno ácido/de niebla salina

La resistencia a la corrosión del carburo cementado en entornos corrosivos como el ácido ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) y la niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) determina directamente su vida útil real en los campos químico, marino e industrial. El mecanismo de corrosión implica la disolución electroquímica de la fase de enlace cobalto (Co), la estabilidad de las partículas de carburo de tungsteno (WC) y la influencia de las condiciones ambientales en la superficie del material. A partir del comportamiento de la corrosión en entornos ácidos y de niebla salina, combinado con reacciones químicas, análisis microscópicos y cálculos de pérdida de peso, se explora en profundidad el mecanismo de corrosión del carburo cementado y se analiza el efecto regulador de las estrategias de optimización (como la adición de Cr_3C_2 y el control del tamaño de grano) en el comportamiento de la corrosión.

(1) Mecanismo de corrosión en ambiente ácido

En un ambiente ácido ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), el cobalto (Co) en la fase aglutinante sufre una importante reacción de disolución electroquímica, cuyas principales reacciones son:



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La tasa de disolución de esta reacción es de aproximadamente $10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$, lo que indica que el Co tiene una alta actividad química en medios ácidos (como el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico). Por el contrario, el carburo de tungsteno (WC), como fase dura, tiene una estabilidad química extremadamente alta y una tasa de disolución muy baja ($<10^{-8} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-9} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$), y apenas participa en la reacción. Sin embargo, la disolución preferencial del Co conduce a un debilitamiento de la fuerza de enlace interfacial entre este y las partículas de WC, y las partículas de WC se aflojan gradualmente, con una tasa de desprendimiento del $0,1\% \pm 0,02\%$. Este fenómeno de desprendimiento causa defectos microscópicos en la superficie del material, acelerando el proceso de corrosión posterior. El bajo valor de pH del entorno ácido también puede desencadenar microbaterías electroquímicas locales, lo que agrava la disolución del Co y el desprendimiento de partículas de WC. Especialmente cuando la concentración de H^+ es alta (por ejemplo, $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$), la velocidad de expansión de la picadura de corrosión puede alcanzar $0,2 \mu\text{m} / \text{h} \pm 0,02 \mu\text{m} / \text{h}$.

(2) Mecanismo de corrosión en ambientes de niebla salina

En un entorno de niebla salina (concentración de NaCl $5\% \pm 0,1\%$), el daño de los iones cloruro (Cl^-) a la superficie del carburo cementado es el principal factor impulsor de la corrosión. La capa de óxido natural en la superficie de Co (principalmente Co(OH)_2 o CoO , con un espesor de aproximadamente $5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) es destruida por los iones Cl^- . Cl^- destruye las propiedades protectoras de la capa de óxido a través de la adsorción y penetración, lo que lleva a picaduras. La profundidad inicial de las picaduras suele ser de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, y el fondo de la picadura se centra en la disolución de Co y se extiende gradualmente al área expuesta de partículas de WC. La formación de picaduras está relacionada con la acidificación local causada por Cl^- , y el valor de pH en la picaduras puede caer a 2-3, acelerando aún más la disolución de Co. La alta humedad ($\geq 95\% \text{ HR}$) y temperatura ($35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) en el entorno de niebla salina también promueven la reacción electroquímica, lo que hace que la tasa de corrosión sea un $30\% \pm 5\%$ más alta que en un entorno seco.

(3) Cálculo de pérdida de peso y evaluación de la corrosión

El grado de corrosión del carburo cementado en ambientes ácidos o de niebla salina se cuantifica generalmente mediante la tasa de pérdida de peso, que se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta W = \frac{m_0 - m_t}{A}$$

Donde ΔW es la tasa de pérdida de peso (mg/cm^2), m_0 es la masa antes de la prueba (mg , precisión $\pm 0,01 \text{ mg}$), m_t es la masa después de la prueba (mg , precisión $\pm 0,01 \text{ mg}$) y A es el área superficial de la muestra (cm^2 , precisión $\pm 0,1 \text{ cm}^2$). La tasa de pérdida de peso del carburo cementado optimizado (como WC-10Co con Cr_3C_2 añadido) después de la prueba de niebla salina (ISO 9227 NSS, 720 h) se controla a $0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ o menos, lo que indica que su resistencia a la corrosión es significativamente mejor que la de los materiales no optimizados (tasa de pérdida de peso $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). La disminución en la tasa de pérdida de peso refleja la reducción de los productos de corrosión en la superficie del material y la supresión de la profundidad de las picaduras.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Estrategia de optimización y análisis de mecanismos

de niebla salina, añadir Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) y controlar el tamaño de grano ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) son dos estrategias eficaces. La adición de Cr_3C_2 reacciona con el oxígeno durante la sinterización a alta temperatura para formar una capa de pasivación de Cr_2O_3 con un espesor de aproximadamente $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, que tiene una excelente resistencia a la penetración de Cl^- y reduce significativamente la tasa de picaduras en aproximadamente un $40 \% \pm 5 \%$. La formación de la capa de Cr_2O_3 reduce los sitios activos de la reacción electroquímica al bloquear el contacto directo entre los iones Cl^- y los iones H^+ y Co, inhibiendo así la expansión de la corrosión por picaduras. La optimización del tamaño de grano ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aumenta la densidad del límite de grano y reduce el área de exposición del Co ($<10 \% \pm 1 \%$), lo que hace que la vía de penetración del medio corrosivo sea más dispersa y reduce la tasa de pérdida de peso en aproximadamente un $20 \% \pm 5 \%$. Esto demuestra que la distribución uniforme de los granos finos reduce eficazmente la sensibilidad a la corrosión local.

(5) Análisis y verificación microscópica

de microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que las picaduras se centraban en la disolución de Co, las partículas de WC estaban expuestas en las picaduras y el tamaño de partícula era de aproximadamente $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, lo cual era consistente con el tamaño de grano inicial, lo que indica que la corrosión se produjo principalmente en la interfaz WC-Co. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) confirmó además que el contenido de Cr en la capa de pasivación de Cr_2O_3 era de aproximadamente $5 \% \pm 0,5 \%$, y su distribución se distribuía uniformemente en la superficie del material, aislando eficazmente el medio corrosivo. Los datos de EDS también mostraron que el contenido de Co en el área de picaduras se redujo significativamente (del 10% al $2 \% \pm 0,5 \%$), verificando el mecanismo de disolución preferencial de Co. En un entorno de niebla salina, la profundidad de picaduras de la muestra WC-10Co con Cr_3C_2 añadido disminuyó de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, lo que indica que la estrategia de optimización mejoró significativamente la resistencia a la corrosión del material.

(6) Condiciones ambientales y dinámica de la corrosión

La dinámica de la corrosión en entornos ácidos se ve afectada principalmente por la concentración de H^+ y la temperatura. Cuando la temperatura sube a $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, la tasa de disolución de Co puede aumentar en un $15 \% \pm 2 \%$, lo que agrava el desprendimiento de partículas de WC. La concentración de Cl^- ($> 5 \% \pm 0,1 \%$) y la humedad ($> 95 \% \text{ HR}$) en el entorno de niebla salina amplificarán aún más el efecto de picaduras, y la densidad de picaduras de corrosión puede alcanzar $10\text{-}15 / \text{mm}^2$. Después de una exposición prolongada (como 720 h), se produjo un desprendimiento a gran escala en la superficie de la muestra de WC-10Co no optimizada, mientras que la muestra optimizada mostró solo picaduras leves, lo que indica que el efecto sinérgico de la capa de Cr_2O_3 y los granos finos desempeñaron un papel protector clave en la corrosión dinámica.

(7) Análisis exhaustivo de casos

Tomando la muestra WC-10Co como ejemplo, la tasa de pérdida de peso de la muestra no

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizada en 0,1 MH_2SO_4 durante 24 h es de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, y la profundidad de picaduras alcanzó $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. Para la muestra optimizada con Cr_3C_2 añadido ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) y tamaño de grano controlado ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la tasa de pérdida de peso cayó a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profundidad de picaduras es de solo $3 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, y la resistencia a la corrosión mejora en aproximadamente un $50 \% \pm 5 \%$. En un entorno de niebla salina (ISO 9227 NSS, 720 h), la tasa de pérdida de peso de la muestra optimizada es de $0,15 \text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y la tasa de picaduras disminuyó en un $40 \% \pm 5 \%$, lo que verificó completamente el efecto de la estrategia de optimización.

(8) Importancia de la aplicación

del carburo cementado en un entorno ácido/de niebla salina revela que la disolución de Co y el desprendimiento de WC son los principales modos de fallo, mientras que la introducción de una capa de pasivación de Cr_2O_3 y granos finos inhibe eficazmente estos procesos. La tasa de pérdida de peso ($\Delta W < 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) y la reducción de la profundidad de las picaduras proporcionan una garantía fiable para la aplicación del carburo cementado en válvulas químicas (resistencia al ácido) y equipos marinos (resistencia a la niebla salina). A través del análisis microscópico de SEM y EDS, combinado con las pruebas de la norma ISO 9227, la vida útil del carburo cementado optimizado en un entorno corrosivo se puede extender en un $50\%-60\% \pm 5\%$, proporcionando un sólido apoyo teórico para aplicaciones de ingeniería.

8.1.2.3 Análisis de los factores que afectan la corrosión del carburo cementado en ambientes ácidos y de niebla salina

La resistencia a la corrosión del carburo cementado en ambientes ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) y de niebla salina ($\text{NaCl } 5 \% \pm 0,1 \%$) se ve afectada por diversos factores, entre ellos las propiedades propias del material (como el contenido de Co, la adición de Cr_3C_2 , el tamaño del grano y el estado de la superficie) y las condiciones ambientales externas (pH y concentración de Cl^-). Estos factores afectan directamente la tasa de pérdida de peso, la profundidad de las picaduras y la resistencia general a la corrosión del carburo cementado al modificar la actividad de la reacción electroquímica, la fuerza de unión interfacial y la penetración en el medio corrosivo. A partir de los factores clave mencionados, combinados con datos experimentales, análisis microscópicos y casos reales, se detalla su influencia en el comportamiento corrosivo del carburo cementado y su mecanismo.

(1) Efecto del contenido de Co

El cobalto (Co) de la fase de enlace es el componente más susceptible en el carburo cementado, y su contenido afecta significativamente la resistencia a la corrosión del material. Cuando el contenido de Co es del $10\% \pm 1\%$, la tasa de pérdida de peso en un entorno ácido o de niebla salina es de aproximadamente $0,09 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, lo que muestra una cierta resistencia a la corrosión. Sin embargo, cuando el contenido de Co aumenta al $12\% \pm 1\%$, la tasa de pérdida de peso aumenta aproximadamente un $30\% \pm 5\%$, alcanzando $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Este cambio se debe principalmente al aumento del área de exposición al Co, que conduce a un aumento del área de contacto con el medio corrosivo (como H^+ o Cl^-), acelerando la reacción de disolución

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electroquímica ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$). El alto contenido de Co también reduce la capacidad de pasivación del material, haciéndolo más susceptible a la corrosión uniforme y a las picaduras en ambientes ácidos ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$) o ambientes de niebla salina, lo que afecta significativamente el rendimiento del servicio a largo plazo del material.

(2) Efecto de la adición de Cr_3C_2

La adición de carburo de cromo (Cr_3C_2) es una estrategia eficaz para mejorar la resistencia a la corrosión del carburo cementado. Diversos estudios han demostrado que, con un contenido de Cr_3C_2 del $0,5 \% \pm 0,01 \%$, la pérdida de peso se reduce en aproximadamente un $40 \% \pm 5 \%$, pasando de $0,10 \text{ mg/cm}^2$ a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Este efecto se debe a la capa de pasivación de Cr_2O_3 formada por Cr_3C_2 durante el proceso de sinterización. El espesor es de aproximadamente $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, lo que puede bloquear eficazmente la penetración de H^+ y Cl^- e inhibir la disolución de Co. Sin embargo, cuando el contenido de Cr_3C_2 supera el $1 \% \pm 0,01 \%$, la proporción de fases frágiles (como la fase η) en el material aumenta en aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, lo que resulta en una disminución de la tenacidad a la fractura (K_{1c}) de aproximadamente un $8 \%-12 \% \pm 2 \%$. La formación de fases frágiles no solo debilita las propiedades mecánicas, sino que también puede inducir microfisuras bajo la acción de medios corrosivos y aumentar la sensibilidad a la corrosión local. Por lo tanto, la cantidad de adición debe controlarse estrictamente.

(3) Efecto del tamaño del grano

El tamaño de grano de WC tiene un efecto significativo en la resistencia a la corrosión del carburo cementado al afectar la densidad del límite de grano y las características de la interfaz. Cuando el tamaño de grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el número de límites de grano es grande, la trayectoria de penetración del medio corrosivo se dispersa y la profundidad de picaduras es pequeña ($< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), mostrando una buena resistencia a la corrosión. Los granos finos también hacen que la distribución de Co sea más uniforme y reducen la concentración de corrosión local. Sin embargo, cuando el tamaño de grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye y la corrosión se concentra en un área de interfaz más pequeña, lo que resulta en un aumento en la profundidad de picaduras de aproximadamente $25 \% \pm 5 \%$ a $6-7 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. El mayor tamaño de grano hace que la interfaz WC-Co quede más fácilmente expuesta al medio corrosivo, especialmente en un entorno ácido, donde la penetración de H^+ a lo largo del límite del grano exacerba la disolución de Co y el desprendimiento de partículas de WC.

(4) Impacto de las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales externas son factores importantes que afectan el comportamiento corrosivo del carburo cementado. En un entorno ácido, cuando el pH desciende por debajo de $2 \pm 0,1$, la concentración de iones H^+ aumenta significativamente, la velocidad de disolución del Co se acelera y la tasa de pérdida de peso aumenta aproximadamente un $50 \% \pm 5 \%$, de $0,08 \text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y hasta $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Los valores bajos de pH también pueden causar la disolución de trazas de WC ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 10\text{H}^+ + 10\text{e}^-$), lo que debilita aún más la fuerza de unión interfacial. En un entorno de niebla salina, cuando la concentración de NaCl supera el $5 \% \pm 0,1 \%$, la fuerte penetración de iones Cl^- destruye la película de pasivación sobre la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficie de Co, lo que aumenta la tasa de picaduras en aproximadamente un $30 \% \pm 5 \%$ y la densidad de picaduras puede alcanzar $15-20 / \text{mm}^2$. Los iones Cl^- atacan preferentemente la interfaz WC-Co mediante adsorción y difusión, formando picaduras profundas, lo que reduce significativamente la resistencia a la corrosión del material. Además, un aumento de temperatura (por ejemplo, $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$) aumentará la tasa de corrosión en un $10 \%-15 \% \pm 2 \%$ adicional, lo que agrava aún más el fallo por corrosión.

(5) Influencia de las condiciones de la superficie

La rugosidad superficial (R_a) afecta directamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado al modificar las características de contacto entre el material y el medio corrosivo. Cuando la rugosidad superficial se controla a $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la superficie es lisa, presenta menos defectos (como microarañazos y picaduras), baja pérdida de peso y buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, cuando R_a supera los $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, aumentan los defectos superficiales y el medio corrosivo se retiene fácilmente en estas zonas, formando microbaterías electroquímicas locales, lo que resulta en un aumento de la tasa de picaduras de aproximadamente un $20 \% \pm 5 \%$. Las superficies muy rugosas también pueden inducir concentración de tensiones, especialmente en pruebas de ciclo de pulverización de sal, la tasa de expansión de las picaduras se acelera y la profundidad aumenta de $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $5-6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, lo que afecta gravemente la vida útil del material.

(6) Interacciones entre factores

Los factores anteriores no actúan de forma independiente, sino que juntos afectan el comportamiento de la corrosión del carburo cementado a través de interacciones complejas. Por ejemplo, cuando un alto contenido de Co ($> 12\% \pm 1\%$) se combina con una superficie rugosa ($R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la tasa de pérdida de peso puede ser tan alta como $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profundidad de picaduras aumentó a $8 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, superando ampliamente la influencia de un solo factor. La adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) puede compensar parcialmente los efectos adversos del alto contenido de Co, pero en un entorno fuertemente ácido con un pH de $< 2 \pm 0,1$, el efecto protector de la capa de Cr_2O_3 puede verse debilitado por la corrosión por H^+ . Además, el efecto de acoplamiento entre el tamaño del grano y las condiciones ambientales es significativo. Los granos finos ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presentan una excelente resistencia a la corrosión a bajas concentraciones de Cl^- ($< 5 \% \pm 0,1 \%$), pero la picaduras sigue siendo difícil de inhibir por completo en condiciones de niebla salina a alta concentración, lo que indica la limitación de las condiciones ambientales para la protección del límite de grano.

(7) Análisis exhaustivo de casos

Tomando muestras de WC-12Co y WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) como ejemplo, tras la exposición a una solución de HCl con un pH de $1 \pm 0,1$ durante 24 horas, la tasa de pérdida de peso de WC-12Co es de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profundidad de picaduras de $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ y las características de picaduras evidentes en la superficie indican que los efectos duales del alto contenido de Co y el entorno fuertemente ácido agravan la corrosión. La tasa de pérdida de peso de WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) es de tan solo $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profundidad de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

picaduras es de $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$ y la resistencia a la corrosión se mejora en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra que el contenido de Cr en la capa de Cr_2O_3 es de aproximadamente un $5\% \pm 0,5\%$, lo que aísla eficazmente el medio corrosivo e inhibe la disolución de Co y la expansión de las picaduras. En un entorno de niebla salina (NaCl $5\% \pm 0,1\%$, ISO 9227 NSS, 720 h), la tasa de pérdida de peso de WC-12Co alcanza $0,15\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, mientras que el WC-10Co optimizado es de solo $0,08\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, lo que verifica aún más el efecto protector de Cr_3C_2 y los granos finos.

(8) Dinámica de la corrosión y significado de la aplicación

El análisis dinámico de la corrosión muestra que la tasa de disolución de Co en un entorno ácido aumenta linealmente con el tiempo, mientras que la tasa de expansión de picaduras en un entorno de niebla salina es rápida en la etapa inicial ($<96\text{ h}$), y luego disminuye ligeramente debido a la acumulación de productos de corrosión. El carburo cementado optimizado (como WC-10Co con Cr_3C_2 añadido) aún mantiene una baja tasa de pérdida de peso y profundidad de picaduras después de una exposición a largo plazo (720 h), lo que indica su estabilidad en un entorno de corrosión dinámica. Estas características permiten que su vida útil alcance los $2\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$ en un entorno ácido (como válvulas químicas) y más de $3\text{ años} \pm 0,3\text{ años}$ en un entorno de niebla salina (como equipos marinos). Al analizar sistemático los factores influyentes, se puede proporcionar una guía científica para la aplicación de carburo cementado en entornos hostiles.

La resistencia del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina se ve afectada conjuntamente por el contenido de Co, la adición de Cr_3C_2 , el tamaño de grano, las condiciones ambientales y el estado de la superficie. Un alto contenido de Co, granos gruesos, una alta rugosidad y un entorno altamente corrosivo (como $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$) agravan la corrosión, mientras que una cantidad adecuada de Cr_3C_2 y granos finos mejoran significativamente la resistencia a la corrosión. Casos completos muestran que la tasa de pérdida de peso del carburo cementado optimizado se reduce en un $40\% - 50\% \pm 5\%$, y la profundidad de las picaduras se reduce en un $40\% - 50\% \pm 5\%$, lo que proporciona una garantía confiable para aplicaciones en los campos químico, marino y otros.

8.1.2.4 Estrategia de optimización para los efectos de la corrosión de entornos ácidos y de niebla salina sobre el carburo cementado

cm^2 en entornos ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) y con niebla salina (NaCl $5\% \pm 0,1\%$) $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, es necesario mejorar sistemáticamente su resistencia a la corrosión mediante la optimización integral de la composición del material, los aditivos, el tratamiento superficial, el proceso de sinterización y las especificaciones de prueba. Estas medidas de optimización tienen como objetivo reducir **las vías de corrosión**. mejorando la protección de la superficie, Mejorar la densidad del material y garantizar la fiabilidad y repetibilidad de los resultados de las pruebas. A partir de los aspectos clave mencionados, combinados con datos experimentales, parámetros de proceso y casos de aplicación reales, se detalla la estrategia de optimización y su papel en el control del comportamiento de la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Optimización de ingredientes

Al controlar con precisión la composición química del carburo cementado, se puede reducir eficazmente la erosión de la fase de unión por medios corrosivos. Se recomienda controlar el contenido de Co en el rango de $8\%-10\% \pm 1\%$, mientras se mantiene el tamaño de grano de WC a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Esta estrategia reduce la oportunidad de contacto con medios corrosivos (como H^+ o Cl^-) al reducir el contenido de Co (área de exposición objetivo $< 10\% \pm 1\%$), acortando así la trayectoria de corrosión. El tamaño de grano fino aumenta la densidad del límite de grano, dispersa la tensión de corrosión, hace que la disolución de Co sea más uniforme y evita la concentración de corrosión localizada. Tomando WC-10Co como ejemplo, la tasa de pérdida de peso de la composición optimizada en un entorno ácido ($\text{pH } 2 \pm 0,1$) se reduce de $0,12 \text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, lo que indica que el efecto sinérgico del bajo contenido de Co y los granos finos mejora significativamente la resistencia a la corrosión ácida.

(2) Aditivos

La adición de carburo de cromo (Cr_3C_2) es un método importante para mejorar la resistencia a la corrosión del carburo cementado. La cantidad recomendada es del $0,5\% \pm 0,01\%$. Durante el proceso de sinterización a alta temperatura, el Cr reacciona con el oxígeno para formar una capa de pasivación de Cr_2O_3 con un espesor aproximado de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$. Esta capa reduce significativamente la tasa de picaduras en un $40\% \pm 5\%$, de $0,10 \text{ mg/cm}^2$ a $0,10 \text{ mg/cm}^2$, al bloquear la penetración de iones Cl^- e iones H^+ . La pérdida de peso se reduce de $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. La compacidad de la capa de Cr_2O_3 la convierte en una barrera eficaz, reduciendo la disolución electroquímica del Co ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$), especialmente en entornos de niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$). La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra que el contenido de Cr en la capa de pasivación es de aproximadamente el $5\% \pm 0,5\%$, lo que confirma su efecto protector.

(3) Tratamiento de superficies

Optimizar la condición de la superficie es la clave para reducir las picaduras y la corrosión superficial. Se recomienda controlar la rugosidad de la superficie (R_a) por debajo de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mediante pulido mecánico de precisión. Este proceso puede reducir la tasa de picaduras en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$ y la tasa de pérdida de peso de $0,09 \text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Una rugosidad baja reduce los defectos superficiales (como microfisuras y picaduras), limita la retención de medios corrosivos y la aparición de reacciones electroquímicas locales. Además, se utiliza limpieza ultrasónica (frecuencia de $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) para eliminar contaminantes de la superficie (como grasa, óxidos, contenido $< 0,1\% \pm 0,02\%$), mejorando aún más la integridad de la superficie. Los experimentos muestran que la profundidad de picaduras de la muestra WC-10Co con un tratamiento de superficie optimizado en un entorno de niebla salina (ISO 9227 NSS, 720 h) se reduce de $5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $4 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$, lo que muestra una mejora significativa en la resistencia a la corrosión.

(4) Proceso de sinterización

La optimización del proceso de sinterización afecta directamente la densidad del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y la uniformidad de la distribución de Co. La temperatura de sinterización recomendada es de $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se utiliza vacío o atmósfera inerte (como Ar) para reducir la oxidación y garantizar que la densidad del material alcance el $99,5\% \pm 0,1\%$. Al controlar el tiempo de sinterización (60-90 minutos), la desviación de la distribución de Co se puede lograr por debajo del $0,1\% \pm 0,02\%$, mejorando así la resistencia de la unión de la interfaz WC-Co ($> 120\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$). La alta densidad y la distribución uniforme de Co reducen los poros y las microfisuras, limitando la vía de penetración de medios corrosivos. Tomando como ejemplo el WC-10Co sinterizado optimizado, su tasa de pérdida de peso en un entorno ácido ($\text{pH } 1 \pm 0,1$) se reduce de $0,11\text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ hasta $0,06\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, lo que indica que la mejora del proceso de sinterización mejora significativamente la resistencia a la corrosión del material.

(5) Especificaciones de prueba

Para evaluar con precisión la resistencia optimizada a la corrosión, se recomienda utilizar la norma ISO 9227:2017 "Ensayo de corrosión - Ensayo de niebla salina en atmósfera artificial", estableciendo un volumen de pulverización de $12\text{ mL/h} \pm 0,1\text{ mL/h}$ (área horizontal de 80 cm^2) para garantizar la repetibilidad de las condiciones de prueba. La medición de masa requiere una balanza de precisión con una exactitud de $\pm 0,01\text{ mg}$, la precisión de la medición del área superficial de la muestra es de $\pm 0,1\text{ cm}^2$ y la tasa de pérdida de peso se calcula como $\Delta W = (m_0 - m_t) / A$, donde m_0 y m_t son las masas antes y después de la prueba, respectivamente. El tiempo de prueba puede ajustarse según los requisitos de la aplicación, por ejemplo, $2000\text{ h} \pm 100\text{ h}$ para la evaluación de la resistencia a la corrosión a largo plazo. Esta especificación permite monitorizar con precisión si la tasa de pérdida de peso alcanza el valor objetivo ($< 0,08\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$), lo que proporciona una base científica para optimizar las propiedades del material.

(6) Análisis exhaustivo de casos

como ejemplo la muestra WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ } 0,5\% \pm 0,01\%$, rugosidad superficial $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), en la prueba de niebla salina NSS ISO 9227 ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, $2000\text{ h} \pm 100\text{ h}$), su tasa de pérdida de peso es solo $0,06\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, mucho menor que la del WC-12Co no optimizado (pérdida de peso $0,15\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$). Las observaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM) mostraron que la profundidad de picaduras de la muestra optimizada fue de $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$, que fue aproximadamente un $50\% \pm 5\%$ menor que los $6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ no optimizados. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) confirmó que el espesor de la capa de Cr_2O_3 fue de aproximadamente $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, y el contenido de Cr fue de aproximadamente un $5\% \pm 0,5\%$, lo que inhibió eficazmente la penetración de Cl^- y la disolución de Co. Este rendimiento le permite satisfacer las necesidades de aplicaciones marinas, como componentes de perforación en aguas profundas, con una vida útil de hasta $3\text{ años} \pm 0,3\text{ años}$, que es mejor que los $1,5\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$ de los materiales tradicionales.

(7) Adaptabilidad ambiental y sinergia de procesos

La estrategia de optimización debe considerar el efecto sinérgico de las condiciones ambientales y los parámetros del proceso. En un entorno ácido ($\text{pH} < 2 \pm 0,1$), el efecto protector de la capa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cr_2O_3 , combinado con el tamaño de grano fino ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) puede controlar la tasa de pérdida de peso a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, mientras que en niebla salina a alta temperatura ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), el efecto sinérgico del pulido de la superficie y la densificación de sinterización (densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$) reduce aún más la tasa de picaduras al $15\% \pm 3\%$. Para diferentes entornos corrosivos, el contenido de Co o la temperatura de sinterización se pueden ajustar según las necesidades reales; por ejemplo, en un entorno ácido fuerte, el Co se puede reducir al $8\% \pm 1\%$ para mejorar aún más la resistencia a la corrosión.

(8) Importancia de la aplicación y optimización dinámica

La pérdida de peso de carburo optimizada en un entorno de pulverización de ácido/sal ($< 0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) le permite un buen rendimiento en los campos de válvulas químicas (resistencia al ácido, vida útil $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$), equipos marinos (resistencia a la pulverización de sal, vida útil $> 3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$). Las pruebas de corrosión dinámica muestran que la tasa de pérdida de peso aumenta linealmente con el tiempo en la etapa inicial ($< 500 \text{ h}$), y luego se estabiliza debido a la acumulación de productos de corrosión (como $\text{Co}(\text{OH})_2$). La muestra optimizada aún mantiene una baja tasa de pérdida de peso después de $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$, lo que verifica la resistencia a la corrosión a largo plazo. En el futuro, el rendimiento se puede optimizar aún más mediante la introducción de recubrimientos multicapa o nuevos aditivos (como TaC) para adaptarse a entornos de corrosión más complejos.

La resistencia a la corrosión del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina se optimiza mediante el control del contenido de Co ($8\%-10\% \pm 1\%$), la optimización del grano WC ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), el tratamiento de la superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, limpieza ultrasónica) y el proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$). Estas estrategias trabajan juntas para reducir la tasa de pérdida de peso a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la tasa de picaduras se reduce en un $40\%-50\% \pm 5\%$, cumpliendo con los requisitos de aplicación en los campos marino, químico y otros.

8.1.2.5 Aplicaciones de ingeniería del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina

El carburo cementado optimizado exhibe una excelente resistencia a la corrosión en ambientes hostiles tales como ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$) y niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), y proporciona soluciones de ingeniería confiables para múltiples campos industriales al reducir la pérdida de peso, inhibir las picaduras y extender la vida útil. Estas medidas de optimización incluyen el ajuste de la composición (tal como el control del contenido de Co), la introducción de aditivos (tales como Cr_3C_2), la optimización del tratamiento de la superficie y la mejora del proceso de sinterización, que permiten que el carburo cementado muestre un potencial de aplicación significativo en industrias tales como la marina, química y de fabricación de papel. Partiendo de los tres campos principales de componentes de perforación marina, válvulas de tuberías químicas y equipos de fabricación de papel, combinados con datos específicos y casos reales, lo siguiente discute en detalle la aplicación de ingeniería y las ventajas de rendimiento del carburo cementado optimizado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Aplicación de carburo cementado en componentes de perforación offshore

Los componentes de perforación offshore (como brocas y estabilizadores) deben resistir los desafíos de la niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) y la corrosión marina durante un largo periodo. El carburo cementado WC-10Co optimizado (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$ añadido, tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presenta una tasa de pérdida de peso de tan solo $0,06 \text{ mg/cm}^2$ en la prueba de niebla salina NSS ISO 9227 ($2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$). $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la profundidad de picaduras se controla a $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, lo que demuestra una excelente resistencia a la corrosión. Este rendimiento se debe a la capa de pasivación de Cr_2O_3 (con un espesor aproximado de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) formada por Cr_3C_2 , que bloquea eficazmente la penetración de iones Cl^- . Al mismo tiempo, los granos finos reducen el área de exposición al Co ($< 10\% \pm 1\%$), inhibiendo así la expansión de las picaduras. En comparación con el WC-12Co sin optimizar (pérdida de peso de $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de las picaduras de $6 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, vida útil de $1,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$), la vida útil del material optimizado supera los $3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$ y la resistencia a la corrosión mejora en aproximadamente un $60\% \pm 5\%$. En la perforación de petróleo y gas en aguas profundas, las brocas fabricadas con este material no solo tienen una excelente resistencia a la corrosión, sino que también tienen resistencia al desgaste, lo que reduce la frecuencia de reemplazo de componentes causado por la corrosión y mejora significativamente los beneficios económicos y la seguridad de la ingeniería marina.

(2) Aplicación de carburo cementado en válvulas de tuberías químicas

Las válvulas para tuberías químicas se utilizan a menudo para transportar fluidos ácidos (como ácido clorhídrico y ácido sulfúrico), que requieren una resistencia extremadamente alta a la corrosión ácida del material. La tasa de pérdida de peso del carburo cementado WC-8Co optimizado (rugosidad superficial $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en un entorno de HCl de $\text{pH } 2 \pm 0,1$ es de solo $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, mucho menor que la del WC-10Co no optimizado (pérdida de peso de $0,12 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). El bajo contenido de Co ($8\% \pm 1\%$) y la rugosidad ultrabaja reducen la erosión del Co por iones H^+ , y la resistencia a la corrosión se mejora en aproximadamente un $60\% \pm 5\%$ en comparación con los no optimizados. El pulido de superficies ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) elimina microdefectos y, combinado con la limpieza ultrasónica ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) para eliminar contaminantes superficiales ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), mejora aún más la resistencia a la corrosión por picaduras. En la práctica, las válvulas fabricadas con este material tienen una vida útil de más de $2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$ en sistemas de transmisión de fluidos ácidos, superior a la del acero inoxidable tradicional (vida útil de aproximadamente $1 \text{ año} \pm 0,1 \text{ año}$), lo que reduce los costes de mantenimiento y garantiza la seguridad y la continuidad de la producción química. Es especialmente adecuado para el tratamiento de medios ácidos de alta concentración.

(3) Aplicación de carburo cementado en equipos de fabricación de papel

Los equipos de fabricación de papel (como rodillos de molienda y herramientas de corte) deben resistir la corrosión en medios ligeramente ácidos, como soluciones de sulfato ($\text{pH } 3 \pm 0,1$), a la vez que cumplen con altos requisitos de resistencia al desgaste e higiene. La tasa de pérdida de peso del carburo cementado WC-10Co optimizado (con Cr_3C_2 añadido al $0,5\% \pm 0,01\%$) en solución de sulfato es de tan solo $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, y la tasa de picaduras es inferior al $0,05\% \pm 0,01\%$, lo que demuestra una excelente resistencia a la corrosión. La capa de pasivación Cr_2O_3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

inhibe eficazmente la disolución de Co ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), y los granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) aseguran la uniformidad de la superficie y la consistencia de la resistencia a la corrosión. En comparación con el WC-12Co no optimizado (pérdida de peso $0,10 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tasa de picaduras $0,1\% \pm 0,02\%$), la resistencia a la corrosión del material optimizado se mejora en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$. En aplicaciones prácticas, la vida útil de los componentes de los equipos de fabricación de papel hechos de este material supera los $4 \text{ años} \pm 0,4 \text{ años}$, superando ampliamente al acero al carbono tradicional (vida útil de aproximadamente $2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$). Su bajo contenido de productos de corrosión ($< 0,01\% \pm 0,002\%$) cumple con los estándares de higiene (como GB 4806.1-2016) y es especialmente adecuado para el proceso de producción de papel de alta calidad.

(4) Valor ingenieril de optimizar el comportamiento electroquímico

Los casos de aplicación anteriores demuestran que optimizar el comportamiento electroquímico del carburo cementado (como la reducción de i_{corr} y la tasa de pérdida de peso) es clave para mejorar su fiabilidad en entornos ácidos y de niebla salina. Mediante la optimización de la composición (Co $8\%-10\% \pm 1\%$), la adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), el tratamiento superficial ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la mejora del proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$), la tasa de pérdida de peso del carburo cementado se reduce de $0,12$ a $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,05-0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de picaduras reducida en un $40\%-50\% \pm 5\%$. Esta mejora del rendimiento no solo extiende la vida útil del material (como componentes de perforación offshore $> 3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$, válvulas químicas $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$, equipo de fabricación de papel $> 4 \text{ años} \pm 0,4 \text{ años}$), sino que también reduce la frecuencia de mantenimiento y los costos de reemplazo. Por ejemplo, en la perforación offshore, el costo anual de mantenimiento de los componentes optimizados se reduce en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, y en tuberías químicas, el ciclo de reemplazo de válvulas se extiende en un $50\% \pm 5\%$, lo que refleja sus importantes beneficios económicos en aplicaciones de ingeniería.

(5) Adaptabilidad ambiental y expansión de aplicaciones

El carburo cementado optimizado también tiene una fuerte adaptabilidad ambiental, lo que le permite hacer frente a condiciones de corrosión más complejas. Por ejemplo, en el entorno ácido del campo de petróleo y gas que contiene sulfuros (H_2S), la muestra WC-10Co con Cr_3C_2 añadido está protegida por la capa de Cr_2O_3 , y su resistencia a la corrosión por sulfuro se mejora en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, lo que lo hace adecuado para equipos de procesamiento de gas ácido (vida útil $> 2,5 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$). En un entorno de niebla salina de alta temperatura ($50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), el efecto sinérgico del pulido de la superficie y los granos finos mantiene la tasa de pérdida de peso a $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, cumpliendo con los requisitos de resistencia a la corrosión de tuberías de aguas profundas y plataformas marinas. Además, en la industria papelera, la baja tasa de picaduras ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) del WC-10Co optimizado en soluciones de cloruro ($\text{pH } 3 \pm 0,1$) lo hace adecuado para entornos de pulpa ácida y de alta humedad, ampliando aún más su rango de aplicación.

(6) Casos completos y perspectivas futuras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tomando como ejemplo el WC-10Co (Cr_3C_2 0,5 % $\pm$ 0,01 %, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), su rendimiento en diversos entornos corrosivos es mejor que el de los materiales tradicionales. La tasa de pérdida de peso en niebla salina (2000 h $\pm$ 100 h) es de $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de picaduras $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$; y la pérdida de peso en HCl a pH 2 $\pm$ 0,1 es de $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; y la tasa de pérdida de peso en solución de sulfato a pH 3 $\pm$ 0,1 es de $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Estos datos muestran que el carburo cementado optimizado exhibe una excelente resistencia a la corrosión tanto en entornos ácidos como de niebla salina, con vidas útiles de 3 años $\pm$ 0,3 años, 2 años $\pm$ 0,2 años y 4 años $\pm$ 0,4 años, respectivamente. En el futuro, el rendimiento del carburo cementado optimizado en entornos extremadamente corrosivos (como la niebla salina ácida a alta temperatura) se puede mejorar aún más mediante la introducción de nuevos aditivos (como VC, TaC) o el desarrollo de nano-recubrimientos multicapa (como TiN / Al_2O_3) para cumplir con los requisitos de ingeniería más complejos, como las condiciones extremas de aguas profundas o los procesos químicos ácidos de alta concentración.

(7) Rendimiento dinámico y beneficios económicos

Las pruebas de corrosión dinámica muestran que la tasa de pérdida de peso del carburo cementado optimizado aumenta linealmente con el tiempo en la etapa inicial (< 500 h) y luego se estabiliza debido a la acumulación de productos de corrosión (como $\text{Co}(\text{OH})_2$). Después de una exposición a largo plazo de 2000 h $\pm$ 100 h, la tasa de pérdida de peso permanece en $0,06\text{-}0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, verificando su estabilidad en un entorno de corrosión dinámica. Esta mejora del rendimiento no solo extiende la vida útil del equipo, sino que también reduce significativamente los costos operativos. Por ejemplo, el costo de mantenimiento anual de los componentes de perforación en alta mar se reduce en aproximadamente un 40% $\pm$ 5%, el ciclo de reemplazo de las válvulas químicas se extiende en un 50% $\pm$ 5% y la eficiencia de producción de los equipos de fabricación de papel aumenta en aproximadamente un 20% $\pm$ 3%, lo que refleja el valor económico de la estrategia de optimización.

El carburo cementado optimizado ofrece un buen rendimiento en aplicaciones de ingeniería en entornos ácidos y de niebla salina. Las formulaciones WC-10Co y WC-8Co presentan una tasa de pérdida de peso ($0,05\text{-}0,07 \text{ mg/cm}^2$) en componentes de perforación offshore, válvulas de tuberías químicas y equipos de fabricación de papel. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), una profundidad de picaduras ($< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) y una vida útil ($> 2\text{-}4$ años $\pm 0,2\text{-}0,4$ años) son significativamente mejores que las de los materiales tradicionales. Estos casos de aplicación demuestran plenamente que optimizar la resistencia a la corrosión es una estrategia clave para mejorar la fiabilidad y los beneficios económicos del carburo cementado en entornos hostiles.

Consejos para la corrosión del carburo en esta sección

(1) Trayectoria de corrosión del carburo cementado

Las trayectorias de corrosión de los carburos cementados (como los sistemas WC-Co o WC-Ni) dependen principalmente de su composición, microestructura y las condiciones ambientales a las que están expuestos. A continuación, se presenta un resumen de las trayectorias típicas que siguen los carburos cementados durante la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosión, en función de su comportamiento electroquímico y las propiedades del material:

Mecanismo de corrosión

El carburo cementado consta de una fase dura (principalmente carburo de tungsteno WC) y una fase aglutinante (generalmente cobalto Co o níquel Ni). La corrosión suele comenzar en la fase aglutinante debido a su menor estabilidad química que la del WC. El proceso de corrosión se divide en las siguientes etapas:

Corrosión electroquímica : en un entorno que contiene electrolitos (como agua salada o soluciones ácidas), la fase de enlace actúa como ánodo y se disuelve preferentemente, mientras que la fase WC es relativamente inerte.

Corrosión selectiva : la disolución de la fase de unión provoca la exposición de partículas de WC, seguida de desprendimiento mecánico o corrosión secundaria.

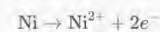
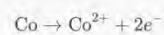
Corrosión uniforme : en entornos fuertemente oxidantes o con alto contenido de cloruro, la fase WC puede oxidarse lentamente, especialmente bajo exposición a largo plazo.

Camino de corrosión

Etapas inicial :

La corrosión se inicia a partir de defectos superficiales (como poros, microgrietas) o exposición de fases de unión. En un entorno neutro o débilmente ácido (como una solución de NaCl al 3,5 %), el Co o el Ni experimentan preferentemente una disolución anódica para generar iones solubles (como Co^{2+} o Ni^{2+}).

Ejemplo de reacción:

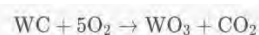


Etapas intermedia :

Una vez disuelta la fase aglutinante, las partículas de WC pierden su soporte y se caen o se produce un desprendimiento microscópico.

En un entorno oxidante o que contenga oxígeno, el WC puede oxidarse lentamente para formar WO_3 u otros óxidos.

Ejemplo de reacción:



Etapas avanzada :

La exposición a largo plazo provoca la formación de agujeros o picaduras de corrosión en la superficie, lo que acelera la degradación del material.

En ambientes altamente corrosivos que son ácidos o contienen cloruros (como la niebla salina), las picaduras pueden verse exacerbadas, comprometiendo la integridad estructural.

Factores influyentes

Condiciones ambientales :

Niebla salina (por ejemplo, ISO 9227) : altas concentraciones de cloruro (por ejemplo, 5 % de NaCl) promueven la disolución de la fase de unión.

Solución ácida (como 1% H_2SO_4) : acelera la disolución de Co/Ni y la oxidación de WC .

Temperatura : Aumentar la temperatura (por ejemplo, 50 °C) aumenta la velocidad de reacción.

Microestructura :

Tamaño de grano (GB/T 3850-2015): El carburo cementado de grano fino (como el tamaño de grano WC < 1 μm) tiene mejor resistencia a la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosidad: Una porosidad alta (por ejemplo, > 0,5 %) puede provocar fácilmente corrosión localizada.

Contenido de la fase aglutinante: Un alto contenido de Co/Ni (como 10-15%) aumenta la sensibilidad a la corrosión.

Estado de la superficie : Una superficie rugosa ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) o con defectos pueden convertirse fácilmente en el punto de inicio de la corrosión.

Análisis típico de la trayectoria de corrosión

Tomemos como ejemplo WC10Co:

Entorno de niebla salina (35 °C, 5 % NaCl, 48 h) :

Inicial: El co-se disuelve y aparecen micropicaduras en la superficie (pérdida de peso $\sim 0,1 \text{ g/m}^2$, ISO 9227).

Etapas intermedias: Las partículas de WC quedan expuestas, se caen parcialmente y la profundidad del pozo aumenta a $2-5 \mu\text{m}$.

Etapas tardías: Se forma una red de agujeros en la superficie y la tasa de corrosión tiende a ser estable.

Ambiente ácido (1% H_2SO_4 , 25 °C, 24 h) :

Inicial: Co se disuelve rápidamente, tasa de pérdida de peso $\sim 0,5 \text{ mg/cm}^2$.

Etapas intermedias: el WC se oxida lentamente y aparecen depósitos de WO_3 en la superficie.

Etapas tardías: El material en general se deteriora y la resistencia disminuye.

Pruebas y evaluación

Método electroquímico (ASTM G59, G5) : Medir E_{corr} y i_{corr} para evaluar la tendencia a la corrosión.

WC10Co: $E_{\text{corr}} \sim -300 \text{ mV (SCE)}$, $i_{\text{corr}} \sim 1-10 \mu\text{A/cm}^2$.

Prueba de niebla salina (ISO 9227) : cuantifica la pérdida de peso y la profundidad del hoyo.

Análisis microscópico (GB/T 3850-2015) : Observe los cambios en la microestructura después de la corrosión.

Medidas de protección

Recubrimiento de superficie : como recubrimiento de TiN o CrN, para reducir la exposición de la fase de unión.

Optimización de la aleación : reducir el contenido de Co/Ni o añadir elementos resistentes a la corrosión (como Cr).

Controles ambientales : Evite condiciones con alto contenido de cloruro o acidez.

La trayectoria de corrosión del carburo cementado comienza con la disolución electroquímica de la fase aglutinante y se extiende gradualmente hasta el desprendimiento y oxidación de las partículas de WC. Esta trayectoria específica se ve afectada por el entorno y la microestructura. Métodos de ensayo como ASTM G5 e ISO 9227 permiten evaluar eficazmente su comportamiento frente a la corrosión y, combinados con medidas de protección, prolongan significativamente su vida útil.

(2) El carburo cementado mejora la protección de la superficie

La mejora de la protección superficial del carburo cementado (como los sistemas WC-Co o WC-Ni) es una tecnología clave para mejorar su resistencia a la corrosión, al desgaste y su vida útil. A continuación, se presentan métodos, principios y aplicaciones comunes para la protección superficial del carburo cementado, junto con las propiedades del material y las normas pertinentes:

Principio de protección de superficies

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Objetivo : Prevenir la corrosión electroquímica y el desgaste mecánico formando una capa protectora en la superficie del carburo cementado para reducir la exposición de la fase de unión (como Co o Ni).

mecanismo :

Efecto barrera: evita que los medios corrosivos (como Cl^- , H^+) entren en contacto con el sustrato.

Efecto pasivador: Mejora la capacidad antioxidante de la superficie.

Efecto endurecedor: Mejora la resistencia al desgaste y al rayado.

Métodos mejorados de protección de superficies

Deposición física de vapor (PVD)

Tecnologías: Deposición de TiN, Recubrimientos de CrN o AlTiN como pulverización catódica con magnetron o recubrimiento por iones de arco.

Espesor : 2-10 μm .

ventaja :

Alta dureza (HV 2000-3000).

Excelente resistencia a la corrosión y al desgaste.

Aplicación : herramientas de corte, moldes (como WC10Co para mecanizado de alta precisión).

Normas de prueba : ASTM G65 (prueba de abrasión con arena seca /rueda de caucho) evalúa la resistencia a la abrasión, ISO 9227 (prueba de niebla salina) evalúa la resistencia a la corrosión.

Nota : La adhesión entre el recubrimiento y el sustrato debe pasar la prueba ASTM C633 para garantizar una adhesión > 40 MPa.

Deposición química de vapor (CVD)

Tecnología : TiC, Los recubrimientos de TiCN o Al_2O_3 se depositan a 900-1100° C.

Espesor : 5-15 μm .

ventaja :

Estabilidad a altas temperaturas, adecuado para entornos de alta temperatura.

Resistente a la oxidación y al ataque químico.

Aplicación : herramientas de corte de alta temperatura, brocas para minería.

Normas de prueba : ASTM G99 (prueba de desgaste del pasador sobre el disco) verifica la resistencia al desgaste, GB/T 16545-2008 (prueba de corrosión por niebla salina) evalúa la durabilidad.

Nota : La temperatura alta puede provocar difusión de Co en la matriz y es necesario optimizar el proceso.

Proyección térmica

Tecnología : Proyección de plasma o proyección de llama, depositando recubrimientos compuestos de WC-Co o Cr_3C_2 -NiCr.

Espesor : 50-200 μm .

ventaja :

El recubrimiento grueso proporciona múltiples protecciones.

Resistente al impacto y a la abrasión.

Aplicación : Piezas resistentes al desgaste, componentes de bombas.

Normas de prueba : ASTM G76 (prueba de desgaste por flujo de aire) evalúa la resistencia al desgaste por corrosión, ISO 28079 (prueba de tenacidad Palmqvist) evalúa la tenacidad del revestimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nota : La porosidad del recubrimiento debe controlarse a $< 2\%$ (GB/T 3850-2015).

Capa de penetración superficial

Tecnología : Carburación, cromado o nitruración (como la nitruración por plasma) para mejorar la estabilidad química de la superficie.

Profundidad : 10-50 μm .

ventaja :

Mejora la dureza de la superficie (HV 1500-2000).

Forma compuestos resistentes a la corrosión (como CrN) .

Aplicaciones : Herramientas resistentes a la corrosión, componentes de válvulas.

Norma de prueba : ASTM G31 (prueba de corrosión por inmersión) para evaluar la resistencia a la corrosión.

Nota : Evite un espesor excesivo de la capa de difusión que pueda causar tensión interna.

Tratamiento electroquímico

Tecnología : Capa de aleación Ni-P anodizada o galvanizada.

Espesor : 5-20 μm .

ventaja :

Formar una capa de pasivación para reducir la disolución de Co.

El costo es menor.

Aplicación : Piezas resistentes a la corrosión sometidas a ligera carga.

Norma de prueba : ASTM G59 (medición de resistencia a la polarización) evalúa la densidad de corriente de corrosión.

Nota : La capa de galvanoplastia tiene poca resistencia al desgaste y debe combinarse con otros recubrimientos.

Efectos de mejora del rendimiento

Resistencia a la corrosión : el recubrimiento PVD TiN reduce la pérdida de peso de WC10Co en niebla salina de NaCl al 5 % de 0,1 g/m^2 a $< 0,01 \text{ g}/\text{m}^2$ (ISO 9227).

Resistencia al desgaste : el recubrimiento CVD Al_2O_3 puede reducir la pérdida de volumen por desgaste en un 50%-70% (ASTM G 65) .

Vida útil : El recubrimiento WC-Co rociado térmicamente puede prolongar la vida útil de la herramienta de 2 a 3 veces (datos de aplicación reales).

Optimización de procesos

Pretratamiento de la superficie : Pulir hasta $Ra \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017) para eliminar defectos.

Combinación de recubrimientos : utilice una estructura multicapa (como TiN + AlTiN) para mejorar la resistencia a las grietas.

Postratamiento : El tratamiento térmico (como el templado a 400 °C) libera la tensión y mejora la adhesión .

Pruebas y verificación

Pruebas de corrosión : ISO 9227 (niebla salina), ASTM G31 (inmersión), ASTM G59 (electroquímica).

Prueba de desgaste : ASTM G65 (desgaste en arena seca) , ASTM G99 (desgaste del pasador sobre el disco).

Análisis microscópico : GB/T 3850-2015 Observe la interfaz recubrimiento-sustrato.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Evaluación del rendimiento : GB/T 7997-2017 mide la dureza y la tenacidad.

Casos de aplicación

Herramientas de corte : Las herramientas WC6Co están recubiertas con PVD TiN , que mejora la resistencia a la corrosión y al desgaste y es adecuada para el procesamiento de aleaciones de aluminio de aviación.

Broca para minería : la broca WC12Co está recubierta con CVD TiCN para extender la vida útil a más de 1000 horas.

Recubrimiento resistente al desgaste : La pulverización térmica WC-Co se utiliza en válvulas de oleoductos y gasoductos para resistir la erosión de la arena.

Precauciones

Costo : PVD y CVD son más costosos y adecuados para piezas de alto valor; la pulverización térmica es adecuada para la protección de áreas grandes.

Adaptabilidad ambiental : el recubrimiento debe estar diseñado para entornos específicos (como temperaturas ácidas o altas).

Mantenimiento : Verifique periódicamente la integridad del revestimiento para evitar descamación localizada que pueda causar corrosión.

La protección superficial del carburo cementado puede mejorarse mediante diversos métodos, como PVD, CVD, pulverización térmica, recubrimiento y tratamiento electroquímico. La elección del método específico depende de los requisitos de la aplicación y las condiciones ambientales. En combinación con pruebas estándar (como ISO 9227 y ASTM G65), se puede optimizar el rendimiento del recubrimiento para mejorar significativamente la resistencia a la corrosión y al desgaste del carburo cementado.

(3) Densidad del límite de grano del carburo cementado

La densidad del límite de grano del carburo cementado (como los sistemas WC-Co o WC-Ni) es un parámetro importante para medir sus características microestructurales y su rendimiento, que suele estar estrechamente relacionado con el tamaño de grano, la porosidad y la distribución de fases. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores que influyen y la importancia de la densidad del límite de grano del carburo cementado:

definición

Densidad de los límites de grano : se refiere a la longitud o área total de los límites de grano dentro de una unidad de volumen, generalmente expresada como longitud unitaria (como m^2) o volumen unitario (como m^1) . En el carburo cementado, los límites de grano se forman principalmente entre las partículas de carburo de tungsteno (WC) y en la interfaz entre el WC y la fase aglutinante (Co o Ni).

Conceptos relacionados :

Tamaño del grano: la densidad del límite de grano es inversamente proporcional al tamaño del grano, y los materiales de grano fino tienen una densidad de límite de grano mayor.

Distribución de la fase de enlace: La uniformidad de la fase Co/Ni afecta la calidad y la densidad del límite del grano.

Método de medición

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La densidad del límite de grano del carburo cementado se determina generalmente mediante observación microscópica y análisis de imágenes, siguiendo normas relevantes como GB/T 3850-2015 "Determinación de la microestructura del carburo cementado":

Microscopía óptica (OM) :

Después de pulir y grabar (NaOH al 5% o tinta), las muestras se observaron con un aumento de 500x-1000x.

La longitud de la sección del límite de grano se mide a lo largo de una línea recta o una cuadrícula y se calcula la densidad del límite de grano por unidad de área.

Microscopía electrónica de barrido (SEM) :

En combinación con imágenes de electrones retrodispersados (BSE), se analizaron las interfaces WC-WC y WC-Co.

Se puede utilizar un software de análisis de imágenes (como ImageJ) para contar la longitud o el área del límite del grano.

Cálculo cuantitativo :

假设晶粒为球形，晶界密度 P_L (单位长度晶界密度) 可近似为:

$$P_L = \frac{2}{d}$$

其中 d 为平均晶粒直径 (μm) , P_L 单位为 μm^{-1} 。

单位体积晶界密度 S_V 可通过立体学方法估算:

$$S_V = 2P_L$$

单位为 μm^{-2} 。

Factores influyentes

Tamaño del grano :

El carburo cementado de grano fino (como el WC con un tamaño de grano de 0,2-0,8 μm) tiene una alta densidad de límite de grano y la PL puede alcanzar de 2,5 a 10 μm^{-1} .

Los granos gruesos (por ejemplo, tamaño de grano WC > 2 μm) tienen una densidad de límite de grano baja, PL $P_L < 1 \mu\text{m}^{-1}$.

Proceso de sinterización :

La temperatura y el tiempo de sinterización en fase líquida (1300-1500 °C) afectan el crecimiento del grano, y una sinterización demasiado prolongada reduce la densidad del límite del grano.

La adición de inhibidores (como VC, Cr_3C_2) puede refinar los granos y aumentar la densidad del límite del grano.

Contenido de la fase aglutinante :

Un alto contenido de Co/Ni (por ejemplo, 10-15 %) puede llenar los límites de grano, reducir la densidad efectiva del límite de grano, pero aumentar la sensibilidad a la corrosión.

Porosidad :

Una porosidad alta (por ejemplo, > 0,5 %) interrumpe la continuidad del límite de grano y reduce la densidad real del límite de grano (GB/T 3850-2015).

Datos típicos

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

WC6Co (细晶粒, 粒径 0.5 μm) :

- $P_L \approx 4 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 8 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度高, 增强韧性和抗裂性。

WC10Co (中等晶粒, 粒径 1.0 μm) :

- $P_L \approx 2 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 4 \mu\text{m}^{-2}$.
- 平衡硬度和韧性。

WC15Co (粗晶粒, 粒径 2.5 μm) :

- $P_L \approx 0.8 \mu\text{m}^{-1}$, $S_V \approx 1.6 \mu\text{m}^{-2}$.
- 晶界密度低, 耐磨性优但韧性下降。

La importancia de la densidad del límite de grano

Propiedades mecánicas :

Una alta densidad de límites de grano mejora la resistencia y la tenacidad (por ejemplo, resistencia a la flexión GB/T 7997-2017 > 2500 MPa), pero puede aumentar la fragilidad.

La baja densidad del límite de grano mejora la resistencia al desgaste y es adecuada para aplicaciones de alta carga.

Resistencia a la corrosión :

Los límites de grano son la ruta de corrosión preferida y los materiales de grano fino pueden acelerar la corrosión local debido a la alta densidad de límites de grano (como una mayor tasa de pérdida de peso según ISO 9227).

La optimización de la distribución de la fase de unión puede reducir la susceptibilidad a la corrosión intergranular.

Estabilidad térmica :

Los materiales con alta densidad de límites de grano son más susceptibles al deslizamiento de los límites de grano a altas temperaturas (como 800 °C) y requieren protección de recubrimiento.

Optimización de la densidad del límite de grano

Control de procesos :

de partícula < 0,5 μm) combinado con sinterización a baja temperatura y en poco tiempo.

Agregue inhibidores de grano (como 0,5 % VC) para mantener la densidad del límite del grano.

Posprocesamiento :

HIP (prensado isostático en caliente) reduce la porosidad y mejora la uniformidad de los límites de grano.

Mejora de la superficie :

Los recubrimientos PVD/CVD (como TiN) protegen los límites de grano y reducen las rutas de corrosión (ver Protección de superficie mejorada del carburo cementado).

Pruebas y verificación

Observación microscópica : norma GB/T 3850-2015, medición del tamaño del grano y la densidad del límite del grano.

Pruebas de rendimiento : GB/T 7997-2017 evalúa la dureza y la tenacidad, ASTM G65 determina la resistencia al desgaste.

Evaluación de la corrosión : prueba de niebla salina ISO 9227, análisis electroquímico ASTM G59.

La densidad del límite de grano del carburo cementado está estrechamente relacionada con su tamaño de grano, el

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

proceso de sinterización y la distribución de la fase de enlace, y suele cuantificarse mediante análisis microscópico. Los materiales de grano fino presentan una alta densidad del límite de grano y son adecuados para aplicaciones de alta tenacidad, pero deben tenerse en cuenta los riesgos de corrosión; los materiales de grano grueso presentan una baja densidad del límite de grano y una excelente resistencia al desgaste. Optimizar el proceso y la protección de la superficie puede equilibrar el impacto de la densidad del límite de grano en el rendimiento.

(4) Estrés de corrosión del carburo cementado

La tensión de corrosión del carburo cementado (como los sistemas WC-Co o WC-Ni) se refiere al estado de tensión generado en el interior o la superficie del material bajo la acción combinada de un entorno corrosivo y una carga externa, lo que provoca un aumento de la corrosión o la falla del material. Este efecto suele implicar agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) o fatiga por corrosión. A continuación, se presenta un análisis detallado de la tensión de corrosión del carburo cementado, incluyendo su mecanismo, factores influyentes, métodos de ensayo y medidas de protección.

Mecanismo de la tensión de corrosión

Acción electroquímica : en un entorno que contiene electrolitos (como salmuera o solución ácida), la fase de unión (como Co o Ni) actúa como un ánodo y se disuelve preferentemente, lo que da como resultado una concentración de tensión local.

Concentración de tensiones : Los defectos superficiales, los límites de grano o las microfisuras se expanden bajo la acción de medios corrosivos, provocando agrietamiento por corrosión bajo tensión.

Efecto de fragilización por hidrógeno : en un entorno ácido o que contenga hidrógeno (H_2S , HCl), los átomos de hidrógeno penetran en los límites del grano, aumentando la tensión interna y provocando una fractura frágil.

Acoplamiento fatiga-corrosión : bajo carga cíclica, los medios corrosivos aceleran la propagación de grietas y reducen la vida útil por fatiga.

Trayectoria de tensión de corrosión

Etapas iniciales :

Cuando una carga aplicada (como una tensión de tracción o de flexión) y un medio corrosivo (como $NaCl$ al 3,5 %) actúan juntos, la fase de unión se corroe preferentemente.

La tensión se concentra en los límites de los granos o en los defectos, provocando microfisuras.

Etapas intermedias :

Las microfisuras se expanden y las partículas de WC pierden soporte, se caen o se rompen.

Se depositan productos de corrosión (como Co^{2+} o WO_3), lo que exacerba la tensión local.

Etapas avanzadas :

Las grietas penetran el material y provocan fallos macroscópicos.

El ciclo de fatiga acelera el crecimiento de grietas y reduce la tensión crítica de fractura.

Factores influyentes

Condiciones ambientales :

Concentración de cloruro : Los entornos con alto contenido de Cl^- (como la niebla salina, ISO 9227) aumentan la susceptibilidad a la corrosión bajo tensión.

pH : Los entornos ácidos ($pH < 4$) o alcalinos ($pH > 10$) exacerban la fragilización por hidrógeno o la disolución

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

anódica.

Temperatura : aumentar a 50-100°C para acelerar la velocidad de reacción.

Microestructura (GB/T 3850-2015):

Tamaño del grano : Los granos finos (como $< 1 \mu\text{m}$) tienen una alta densidad de límites de grano y son propensos a la corrosión bajo tensión; los granos gruesos ($> 2 \mu\text{m}$) tienen mejor resistencia a la corrosión bajo tensión.

Porosidad : Una porosidad $> 0,5\%$ aumenta los puntos de concentración de tensiones.

Contenido de la fase de unión : Un alto contenido de Co/Ni (como 10-15%) reduce la resistencia a la corrosión bajo tensión.

Condiciones de carga :

Tipo de estrés : Es más probable que el estrés de tracción induzca SCC que el estrés de compresión.

Niveles de estrés : Superar el 50%-80% del límite elástico aumenta significativamente la corrosión.

Estado de la superficie : Una superficie rugosa ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) o rayada puede convertirse fácilmente en el punto de inicio de la corrosión bajo tensión.

Datos típicos

Compañía WC10 :

Ambiente : 3,5% NaCl, 25°C, tensión de tracción 1500 MPa (60% del límite elástico).

Resultados : Tiempo de agrietamiento ~ 100 h, profundidad de agrietamiento 50-100 μm (ASTM G36).

E_{corr} : -300 mV (SCE), i_{corr} $\sim 5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ (ASTM G59).

WC6Co (grano fino):

Ambiente : 1% H_2SO_4 , 50°C, carga cíclica 1000 MPa.

Resultado : Vida útil por fatiga reducida en un 30% y tasa de crecimiento de grietas de 10^{-6} m/ciclo (ASTM E647).

Método de prueba

Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC) (ASTM G36, G129):

Métodos : Se utilizó tracción a velocidad de deformación lenta (SSRT) con una velocidad de carga de 10^{-6} s^{-1} y se registraron el tiempo de fractura y la morfología de la grieta.

Parámetro : Factor de intensidad de tensión K_{ISCC} ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), valor típico de WC10Co $\sim 15-20$.

Monitoreo electroquímico (ASTM G5, G59):

E_{corr} y i_{corr} Se midieron para evaluar la sensibilidad al estrés por corrosión.

Corrosión por fatiga (ASTM E466):

Se utilizó una carga cíclica ($R = 0,1$, frecuencia 10 Hz), combinada con medios corrosivos, para registrar la vida útil por fatiga.

Análisis microscópico (GB/T 3850-2015):

Se utilizó SEM para observar la trayectoria de propagación de grietas y los productos de corrosión.

Medidas de protección

Optimización de materiales :

Reducir el contenido de Co/Ni (por ejemplo, 6% de Co) y agregar Cr o Mo mejora la resistencia a la corrosión del grano ($< 0,5 \mu\text{m}$) y reduce la porosidad ($< 0,2\%$).

Protección de superficies :

Recubrimiento PVD (como TiN, CrN), con un espesor de 5-10 μm , reduce la penetración del medio (ver protección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficial mejorada del carburo cementado).

Pasivación electroquímica para formar una capa protectora de Cr_2O_3 o NiO .

Control de procesos :

La sinterización HIP elimina la tensión interna.

Superficie pulida a $\text{Ra} \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017).

Gestión ambiental :

Evite condiciones con alto contenido de cloruro o acidez y utilice recubrimientos anticorrosivos o inhibidores de corrosión (como NaNO_2).

Casos de aplicación

de corte : Las herramientas WC6Co están recubiertas con TiN en un entorno de niebla salina (ISO 9227) y el tiempo de agrietamiento por corrosión bajo tensión se extiende a 500 h.

Broca para minería : WC12Co En minas ácidas, se optimiza el grano y el recubrimiento y se aumenta la vida útil por fatiga en un 40%.

Piezas de la válvula : WC10Co cromado, resistente a la corrosión por H_2S , vida útil de hasta 2 años.

La tensión de corrosión del carburo cementado se debe principalmente a la disolución de la fase de enlace y la concentración de tensiones. Entre los factores que influyen se incluyen el entorno, la microestructura y las condiciones de carga. Métodos de ensayo como ASTM G36 y G5 permiten evaluar eficazmente su rendimiento y, en combinación con la optimización del material y la protección superficial, se puede reducir significativamente el riesgo de fallos causados por la tensión de corrosión.

(5) Picaduras en la superficie de carburo cementado

La corrosión por picaduras en la superficie del carburo cementado (como los sistemas WC-Co o WC-Ni) es un tipo de corrosión localizada que se manifiesta como picaduras pequeñas y profundas en la superficie. Este fenómeno suele ocurrir en entornos altamente corrosivos que contienen cloruros o haluros (como NaCl y HCl) y tiene un impacto significativo en la durabilidad y el rendimiento del material. A continuación, se presenta un análisis detallado del mecanismo, los factores que influyen, los métodos de detección y las medidas de protección contra la corrosión por picaduras en la superficie del carburo cementado.

Mecanismo de picadura

Proceso electroquímico :

La fase vinculante (como Co o Ni) actúa como ánodo y se disuelve preferentemente para formar una pequeña área de ánodo.

La fase WC es relativamente inerte y actúa como cátodo, acelerando la reacción electroquímica local.

Ejemplo de reacción:



Efecto autocatalítico :

El Cl^- y el H^+ se acumulan en las fosas, lo que reduce el valor del pH local y acelera la corrosión.

Los productos de corrosión (como Co^{2+} o WO_3) se depositan, lo que dificulta la difusión y forma un entorno cerrado.

Extensión de grietas :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La concentración de tensiones en el pozo hace que las partículas de WC se desprendan, expandiendo el diámetro y la profundidad del pozo.

Camino de picaduras

Etapas iniciales :

La corrosión por picaduras comienza a partir de defectos superficiales (como microfisuras, poros) o de la exposición de fases de unión.

En caso de niebla salina (por ejemplo, NaCl al 5 %, 35 °C) o de solución ácida, se forman zonas anódicas locales.

Etapas de desarrollo :

La concentración de electrolitos en el pozo aumenta y la tasa de corrosión se acelera.

Las partículas de WC perdieron su soporte y se produjo un desprendimiento mecánico.

Etapas tardías :

de los hoyos aumenta (hasta 10-100 μm) y se forman múltiples hoyos independientes en la superficie.

En casos graves, puede provocar penetración del material o fallas por fatiga.

Factores influyentes

Condiciones ambientales :

Concentración de cloruro : Los entornos con alto contenido de Cl^- (como la prueba de niebla salina ISO 9227) promueven significativamente la corrosión por picaduras.

pH : Las soluciones de cloruro ácidas ($\text{pH} < 4$) o neutras son propensas a la corrosión por picaduras.

Temperatura : Aumentar a 40-60°C para acelerar la reacción.

Microestructura (GB/T 3850-2015):

Tamaño del grano : Los granos finos (como $< 1 \mu\text{m}$) tienen una alta densidad de límites de grano y son fáciles de formar puntos de inicio de picaduras; los granos gruesos ($> 2 \mu\text{m}$) son más resistentes a la corrosión por picaduras.

Porosidad : Una porosidad $> 0,5 \%$ aumenta la susceptibilidad a las picaduras.

Contenido de la fase de unión : Un alto contenido de Co/Ni (como 10-15 %) reduce la resistencia a la corrosión por picaduras.

Estado de la superficie :

Las superficies rugosas ($R_a > 0,8 \mu\text{m}$) o rayadas pueden convertirse en fuentes de corrosión por picaduras.

La tensión residual ($> 50 \text{ MPa}$) intensifica la corrosión localizada.

Datos típicos

Compañía WC10 :

Ambiente : 5% NaCl, 35°C, 48h (ISO 9227).

Resultados : La densidad de hoyos es de 5-10/cm², la profundidad promedio es de 5-15 μm y la tasa de pérdida de peso es de 0,1 g/m².

$E_{\text{corr}} : -300 \text{ mV (SCE)}, i_{\text{corr}} \sim 5 \mu\text{A/cm}^2 \text{ (ASTM G59)}$

WC6Co (grano fino):

Ambiente : 3,5% NaCl, 25°C, 96h.

Resultados : La densidad de picaduras es de 15-20/cm², la profundidad es de 2-10 μm y la tasa de pérdida de peso es de 0,05 g/m².

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Métodos de detección

Observación al microscopio (GB/T 3850-2015):

la profundidad del hoyo se midieron utilizando un microscopio óptico (500x-1000x) o SEM con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Prueba electroquímica (ASTM G5, G59):

potenciodinámica muestran el potencial de picadura (E_{pit}), con un E_{pit} típico de WC10Co de $\sim 200-400 \text{ mV}$ (SCE).

Prueba de niebla salina (ISO 9227):

Exponer durante 24-96 h y registrar el número y la profundidad de las picaduras.

Análisis de superficie :

EDS o XPS detecta productos de corrosión en las picaduras (como CoCl_2 , WO_3).

Medidas de protección

Optimización de materiales :

Reducir el contenido de Co/Ni (por ejemplo, 6 % de Co) y agregar Cr o Mo mejora la resistencia a las picaduras. del grano ($< 0,5 \mu\text{m}$) y reduce la porosidad ($< 0,2\%$).

Tratamiento de superficie :

Recubrimiento PVD : TiN o CrN (espesor $5-10 \mu\text{m}$), reduce la penetración de Cl^- (ver protección superficial mejorada del carburo cementado).

Pasivación electroquímica : Formación de una capa protectora de Cr_2O_3 o NiO.

Pulido : superficie $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$ (GB/T 7997-2017), eliminar defectos.

Control ambiental :

Evite los entornos con alto contenido de cloruro y utilice inhibidores de corrosión (como NaNO_2) para neutralizar el Cl^- .

Mantener la temperatura por debajo de 40°C .

Casos de aplicación

de corte : Las herramientas WC6Co se recubren con TiN en un entorno de niebla salina y la densidad de picaduras se reduce a $< 2/\text{cm}^2$.

Piezas de la válvula : WC10Co En un entorno de agua de mar, la profundidad de picaduras se controla dentro de los $5 \mu\text{m}$ después de la cromización. tratamiento.

Broca para minería : WC12Co con recubrimiento CVD Al_2O_3 , que mejora la resistencia a las picaduras y extiende la vida útil en un 50 %.

Precauciones

Detección temprana : Las picaduras son difíciles de identificar a simple vista en sus primeras etapas y requieren un monitoreo electroquímico regular.

Dificultad de reparación : una vez que la picaduras se expande, el efecto de reparación del revestimiento es limitado, por lo que se recomienda la prevención.

Costo : Los recubrimientos avanzados (como PVD) son más costosos y deben seleccionarse según el entorno de uso.

en conclusión

La corrosión por picaduras en superficies de carburo cementado se debe principalmente a la disolución local de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase de unión y al efecto autocatalítico, que se ve influenciado por el entorno y la microestructura. Métodos de ensayo como ISO 9227 y ASTM G5 permiten evaluar eficazmente el comportamiento de la corrosión por picaduras. La combinación de recubrimientos superficiales y la optimización del material puede reducir significativamente el riesgo de corrosión por picaduras y prolongar la vida útil.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

8.2 Propiedades de alta temperatura del carburo cementado

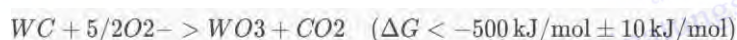
El rendimiento del carburo cementado en un entorno de alta temperatura ($800-1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) determina directamente su potencial de aplicación en condiciones de trabajo duras, como herramientas de aviación (vida útil $> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$), moldes de alta temperatura (tiempos de ciclo $> 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$) y equipos de energía (como turbinas de gas, tiempo de servicio $> 10^4\text{ horas} \pm 10^3\text{ horas}$). El rendimiento a alta temperatura del carburo cementado se refleja principalmente en **su resistencia a la oxidación** (ganancia de masa $< 0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), **fatiga térmica** (extensión de grietas $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y **fluencia** (velocidad de deformación $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$). La resistencia a la oxidación se refiere a la capacidad de un material para resistir reacciones de oxidación en un entorno oxidante de alta temperatura, que generalmente se caracteriza por la ganancia de masa o el espesor de la capa de óxido; la fatiga térmica se refiere al fenómeno por el cual las grietas se inician y propagan debido al estrés térmico en ciclos repetidos de alta temperatura-baja temperatura; la fluencia se refiere al proceso en el cual un material experimenta una deformación plástica irreversible lentamente con el tiempo bajo alta temperatura y estrés continuo. A altas temperaturas, las partículas de WC se oxidarán para formar una capa suelta de WO_3 (espesor $> 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) a $> 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que resultará en expansión de volumen y desprendimiento, mientras que la fase de unión Co se ablanda (la dureza cae a $\text{HV} \sim 200 \pm 30$), lo que hace que la resistencia general del material disminuya ($< 2000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$), lo que afecta seriamente su confiabilidad de servicio. Para mejorar el rendimiento a alta temperatura, es necesario mejorar la estabilidad a alta temperatura del material mediante aditivos (como Cr_3C_2 $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), control de microestructura (tamaño de grano $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y recubrimiento de superficie (espesor $5-10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Los aspectos de resistencia a la oxidación ($800-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), fatiga térmica y fluencia, combinando termodinámica (energía libre de Gibbs $\Delta G < 0\text{ kJ/mol} \pm 10\text{ kJ/mol}$), métodos experimentales (ASTM E1876), análisis microscópico (XPS, SEM) y casos de ingeniería. Por ejemplo, WC10Co (Cr_3C_2 $0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) presenta una ganancia de masa de $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una grieta por fatiga térmica de $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, lo que cumple con los requisitos de los álabes de turbinas de aviación.

8.2.1 Resistencia a la oxidación del carburo cementado (800 - 1000 °C)

8.2.1.1 Descripción general de los principios y tecnologías de la resistencia a la oxidación del carburo cementado

La resistencia a la oxidación se caracteriza por una ganancia de masa a alta temperatura ($< 0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$), que es la base para que el carburo cementado se utilice en motores aeroespaciales ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y moldes de alta temperatura ($> 900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). El WC se oxida a $> 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$:



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se genera una capa suelta de WO_3 (espesor $>1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, densidad $7,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), lo que resulta en un aumento de peso y una disminución de la resistencia ($<2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). Simultáneamente, el Co se oxida para formar Co_3O_4 (espesor $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), lo que agrava aún más el ablandamiento (la dureza disminuye a $\text{HV}200 \pm 30$). El objetivo de optimización es formar una capa protectora densa de Cr_2O_3 (espesor $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, densidad $5,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) para inhibir la difusión de oxígeno (velocidad $<10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$).

La prueba de resistencia a la oxidación se realiza en un horno de mufla a una temperatura de $800\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, en un ambiente de aire, con un tamaño de muestra de $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y una precisión de masa de $\pm 0,01 \text{ mg}$. Por ejemplo, el WC_3Co aumenta en $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ tras la oxidación a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ durante $100 \text{ horas} \pm 10 \text{ horas}$, y tras añadir Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), el peso disminuye a $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, y la resistencia a la oxidación aumenta en un $25 \% \pm 5 \%$. Esta sección parte del mecanismo, la prueba y la optimización, y ofrece una guía completa combinando la termodinámica y el análisis microscópico.

8.2.1.2 Mecanismo de resistencia a la oxidación y análisis del carburo cementado

La tasa de oxidación sigue una ley parabólica:

$$\Delta m^2 = k_p \cdot t$$

Donde, k_p es la constante de oxidación ($10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-13} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$), y t es el tiempo de oxidación (precisión $\pm 100 \text{ s}$). El k_p de WC_{10}Co a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ es $10^{-11} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s} \pm 10^{-12} \text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$, porque WO_3 es suelto (porosidad $\sim 5 \% \pm 1 \%$) y la tasa de difusión de oxígeno es alta ($10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$). La adición de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), k_p se reduce en un $50 \% \pm 5 \%$ y la tasa de difusión de oxígeno se reduce a $10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ debido a la densidad de Cr_2O_3 (porosidad $<1 \% \pm 0,2 \%$). El tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ reduce aún más la trayectoria de difusión de oxígeno (densidad del límite de grano $>10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$) y la ganancia de peso se reduce en un $20 \% \pm 5 \%$.

El Co se ablanda a $>900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (la dureza cae a $\text{HV}200 \pm 30$) debido a la formación de Co_3O_4 (pico de O 1s $530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, confirmado por XPS). El Cr_3C_2 mejora la estabilidad de la interfaz (energía de interfaz $1,2 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) a través de la difusión de Cr (concentración $5 \% \pm 0,5 \%$) e inhibe el crecimiento de WO_3 (espesor $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). El análisis SEM muestra que las grietas en la capa de óxido (ancho $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) se distribuyen principalmente a lo largo de la fase de Co, y no hay grietas obvias en la capa de Cr_2O_3 . EDS verifica la uniformidad de Cr_2O_3 (Cr:O $2:3 \pm 0,1$), lo que protege eficazmente el sustrato.

8.2.1.3 Análisis de los factores que afectan la resistencia a la oxidación del carburo cementado

La resistencia a la oxidación del carburo cementado en entornos de alta temperatura ($800\text{--}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) es un indicador clave de su rendimiento de servicio, que afecta directamente su vida útil en los campos de herramientas de aviación, moldes de alta temperatura y equipos de energía. La resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a la oxidación generalmente se caracteriza por la ganancia de masa, el espesor de la capa de óxido y la constante cinética de oxidación (k_p), que se ve afectada por muchos factores, incluidos la temperatura, el contenido de Cr_3C_2 , el tamaño de grano, el contenido de Co y la humedad ambiental. Estos factores determinan conjuntamente la resistencia a la oxidación a alta temperatura del carburo cementado al cambiar la velocidad de reacción de oxidación, las propiedades de los productos de oxidación y la estabilidad de la microestructura del material. A partir de los factores anteriores, combinados con datos experimentales, análisis termodinámicos y casos reales, a continuación se analiza en detalle su influencia en la resistencia a la oxidación del carburo cementado y su mecanismo.

(1) Efecto de la temperatura

El factor más crítico que afecta la resistencia a la oxidación del carburo cementado, y que determina directamente el comportamiento termodinámico y cinético de la reacción de oxidación, es el siguiente: a $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, las partículas de WC reaccionan con el oxígeno para generar WO_3 ($\text{WC} + 5/2\text{ O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$), y la ganancia de masa aumenta significativamente en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, de $0,3\text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ y hasta $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$. Esto se debe a que la presión parcial de oxígeno y la tasa de difusión atómica aumentan significativamente a altas temperaturas, y la constante de velocidad de reacción de oxidación (k_p) aumenta exponencialmente con la temperatura (de acuerdo con la ecuación de Arrhenius: $k_p = A \exp(-Q/RT)$, donde Q es la energía de activación, R es la constante del gas y T es la temperatura absoluta). A $< 900\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, la tasa de oxidación disminuye significativamente y la ganancia de masa se controla a $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ o menos, lo que indica que la difusión de oxígeno está limitada a temperaturas más bajas, la capa de WO_3 crece lentamente (espesor $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) y el efecto protector sobre el material es más débil pero la destructividad también es menor.

(2) Efecto del contenido aditivo de Cr_3C_2

de carburo de cromo (Cr_3C_2) es un medio importante para mejorar la resistencia a la oxidación del carburo cementado. Cuando el contenido de Cr_3C_2 es del $0,5\% \pm 0,01\%$, la constante cinética de oxidación (k_p) disminuye aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, de $10^{-9}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$ a $5 \times 10^{-10}\text{ g}^2/\text{cm}^4 \cdot \text{s}$. Esto se debe a que el Cr reacciona con el oxígeno a alta temperatura para formar una capa densa de Cr_2O_3 (con un espesor de aproximadamente $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), que tiene una tasa de crecimiento lenta (baja k_p), bloqueando eficazmente la difusión de oxígeno e inhibiendo la oxidación adicional de WC y Co. Sin embargo, cuando el contenido de Cr_3C_2 supera el $1\% \pm 0,01\%$, la proporción de fases frágiles (como la fase η , la fase compuesta de WC-Co-Cr) en el material aumenta en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$, lo que resulta en una disminución en la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) de aproximadamente un $8\%-12\% \pm 2\%$. La presencia de fases frágiles puede inducir microfisuras bajo tensión de alta temperatura, aumentar las vías de permeación de oxígeno y debilitar la resistencia a la oxidación. Por lo tanto, la cantidad a añadir debe controlarse con precisión para equilibrar la resistencia a la oxidación y las propiedades mecánicas.

(3) Influencia del tamaño del grano de carburo de tungsteno (WC)

El carburo de tungsteno (WC) tiene un efecto significativo en la resistencia a la oxidación del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carburo cementado al afectar la densidad del límite de grano y la trayectoria de difusión del oxígeno. Con un tamaño de grano de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el número de límites de grano es grande, la trayectoria de difusión del oxígeno es dispersa, el espesor de la capa de óxido es delgado ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y la ganancia de masa es baja ($0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$). Los granos finos también uniformizan la distribución del Co y reducen la concentración de oxidación local. Sin embargo, cuando el tamaño de grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, la difusión del oxígeno a lo largo del límite de grano se centraliza, el espesor de la capa de óxido aumenta a $0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ y la ganancia de masa aumenta aproximadamente un $20 \% \pm 5 \%$, hasta $0,36 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. El mayor tamaño de grano facilita la exposición de la interfaz WC-Co, y la generación y el desprendimiento de WO_3 en la interfaz a alta temperatura se intensifican, acelerando aún más el proceso de oxidación.

(4) Efecto del contenido de cobalto (Co) en la fase aglutinante

El comportamiento oxidativo del cobalto (Co) como fase aglutinante a altas temperaturas afecta significativamente la resistencia a la oxidación y las propiedades mecánicas del carburo cementado. Con un contenido de Co del $10 \% \pm 1 \%$, el carburo cementado mantiene una dureza elevada ($> \text{HV } 1000 \pm 30$) a $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la resistencia a la oxidación es relativamente estable y la ganancia de peso es de aproximadamente $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Sin embargo, cuando el contenido de Co aumenta a $12 \% \pm 1 \%$, el Co se oxida a Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$) a alta temperatura, y su estructura suelta (espesor de aproximadamente $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) no puede prevenir eficazmente la difusión de oxígeno, lo que resulta en una disminución de la dureza de aproximadamente $30 \% \pm 5 \%$, de $\text{HV } 1200 \pm 30$ a $\text{HV } 840 \pm 30$, y un aumento en la ganancia de masa a $0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. La formación de Co_3O_4 también va acompañada de una expansión de volumen (la densidad cae de $8,9 \text{ g/cm}^3$ a $6,1 \text{ g/cm}^3$), lo que induce microfisuras superficiales, acelera la oxidación y el desconchado y afecta gravemente la estabilidad del material a alta temperatura.

(5) Influencia de la humedad ambiental

La humedad ambiental también tiene un efecto significativo en la resistencia a la oxidación del carburo cementado. En condiciones de humedad $> 50 \% \pm 5 \%$, el vapor de agua (H_2O) participa en la reacción de oxidación ($\text{WC} + 5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$), generando $\text{WO}_2(\text{OH})_2$ volátil, lo que acelera aún más el crecimiento y la descamación de la capa de WO_3 , resultando en un aumento de la ganancia de masa de aproximadamente $10 \% \pm 2 \%$, de $0,3 \text{ mg/cm}^2$ a $0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,33 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. La presencia de vapor de agua también promueve la oxidación del Co ($\text{Co} + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}(\text{OH})_2$). El $\text{Co}(\text{OH})_2$ generado se descompone en Co_3O_4 a alta temperatura, lo que agrava la pérdida del producto de oxidación. En un ambiente con baja humedad ($< 30 \% \pm 5 \%$), la oxidación es impulsada principalmente por el oxígeno, la capa de WO_3 crece lentamente y el aumento de peso se reduce en aproximadamente un $5 \% \pm 1 \%$, mostrando una mejor resistencia a la oxidación.

(6) Interacciones entre factores

Los factores anteriores no actúan de forma independiente, sino que afectan a la resistencia a la oxidación mediante interacciones complejas. Por ejemplo, cuando se combina una temperatura alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1000 °C ± 10 °C) con un alto contenido de Co (> 12 % ± 1 %), la ganancia de masa puede alcanzar los 0,6 mg/cm² . ± 0,05 mg/ cm² , el espesor de la capa de óxido aumenta a 1,2 μm ± 0,1 μm , superando con creces la influencia de un solo factor. La adición de Cr₃C₂ (0,5 % ± 0,01 %) puede compensar parcialmente el efecto negativo del alto contenido de Co, pero con una humedad alta (> 50 % ± 5 %), la capa de Cr₂O₃ puede fallar localmente debido a la erosión por vapor de agua. Además, los granos finos (0,51 μm ± 0,01 μm) tienen una excelente resistencia a la oxidación a < 900 °C ± 10 °C, pero a 1000 °C ± 10 °C, la difusión de oxígeno en los límites de los granos aún puede agravar la oxidación local, lo que indica el efecto limitante de la temperatura en la protección de los límites de los granos.

(7) Análisis exhaustivo de casos

Tomando muestras de WC-12Co y WC-10Co (Cr₃C₂ 0,5 % ± 0,01%) como ejemplo, después de la exposición a 1000°C±10°C y atmósfera de aire (humedad 50%±5%) durante 100 horas, la ganancia de masa de WC-12Co es de 0,5 mg/cm² ± 0,05 mg/ cm², el espesor de la capa de óxido es de 1,1 μm ± 0,1 μm y la superficie se está desprendiendo obviamente, lo que indica que su resistencia a la oxidación es pobre. El aumento de peso de WC-10Co (Cr₃C₂ 0.5%±0.01%) es de solo 0.3 mg/cm² ± 0.05 mg/cm² , el espesor de la capa de óxido es de 0.4 μm ± 0.1 μm y la resistencia a la oxidación se mejora en aproximadamente un 40% ± 5%. El análisis de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) muestra que el contenido de Cr en la capa de Cr₂O₃ es de aproximadamente un 5% ± 0.5%, y su estructura densa inhibe eficazmente la difusión de oxígeno y vapor de agua y reduce la generación de WO₃ y Co₃O₄ . Este rendimiento le permite cumplir con los requisitos de resistencia a la oxidación a alta temperatura de las herramientas de álabes de turbinas de aviación (temperatura de servicio 900-1000 °C, vida útil > 5000 horas ± 500 horas).

(8) Dinámica de oxidación y significado de la aplicación

El análisis dinámico de oxidación muestra que la ganancia de masa del carburo cementado a alta temperatura muestra una ley parabólica con el tiempo ($\Delta W^2 = k_{pt}$), con una tasa de oxidación rápida en la etapa inicial (<10 h), y luego disminuyendo debido al engrosamiento de la capa de óxido. La ganancia de masa del WC-10Co optimizado (Cr₃C₂ 0.5% ± 0.01%) todavía se controla a 0.4 mg/cm² después de la exposición a largo plazo (1000 h) a 1000°C ± 10°C. ± 0.05 mg/cm² , mostrando una excelente estabilidad a alta temperatura. Estas características lo hacen ampliamente utilizado en herramientas de aviación (temperatura de corte 900-1000°C), moldes de alta temperatura (temperatura de moldeo 800-900°C) y equipos de energía (tales como álabes de turbinas de gas, temperatura de servicio 1000°C). A través del análisis sistemático de los factores influyentes, se puede proporcionar orientación científica para la optimización de la resistencia a la oxidación a alta temperatura del carburo cementado.

La resistencia a la oxidación del carburo cementado se ve afectada por múltiples factores, como la temperatura, el contenido de Cr₃C₂, el tamaño de grano, el contenido de Co y la humedad ambiental. Las altas temperaturas, el alto contenido de Co, los granos gruesos y la alta humedad intensifican la oxidación, mientras que las cantidades adecuadas de Cr₃C₂ y granos finos mejoran significativamente la resistencia a la oxidación. Casos de estudio exhaustivos demuestran que el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumento de peso del carburo cementado optimizado se reduce en un $40\% \pm 5\%$ y el espesor de la capa de óxido en un $50\% \pm 5\%$, lo que proporciona una garantía fiable para aplicaciones en sectores de alta temperatura como la aviación y la energía.

8.2.1.4 Estrategia para optimizar la resistencia a la oxidación del carburo cementado

Para lograr la resistencia a la oxidación del carburo cementado a alta temperatura ($800-1000\text{ }^{\circ}\text{C}$), es decir, una ganancia de peso $< 0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, es necesario mejorar sistemáticamente su capacidad antioxidante mediante la optimización integral de aditivos, microestructura, proceso de sinterización, tratamiento superficial y especificaciones de prueba. Estas medidas de optimización tienen como objetivo formar una capa protectora densa, reducir las vías de difusión de oxígeno, mejorar la densidad del material y la estabilidad superficial, y verificar el efecto de la optimización mediante pruebas científicas. A partir de los aspectos clave mencionados, combinados con datos experimentales, análisis termodinámicos y casos prácticos de aplicación, a continuación se detalla la estrategia de optimización y su papel en el control del comportamiento de oxidación.

(1) Aditivo de carburo de cromo (Cr_3C_2)

La adición de carburo de cromo (Cr_3C_2) es la estrategia principal para mejorar la resistencia a la oxidación del carburo cementado. La cantidad recomendada es del $0,5\% \pm 0,01\%$. Durante la sinterización a alta temperatura y el servicio, el Cr reacciona con el oxígeno para formar una densa capa protectora de Cr_2O_3 (con un espesor aproximado de $0,2-0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$). La capa de Cr_2O_3 tiene un coeficiente de difusión de oxígeno extremadamente bajo ($D_{\text{O}} \approx 10^{-14}\text{ cm}^2/\text{s}$), que bloquea eficazmente la penetración de oxígeno y reduce la constante cinética de oxidación (k_p) en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, de $10^{-9}\text{ g}^2/\text{cm}^4\cdot\text{s}$ a $5 \times 10^{-10}\text{ g}^2/\text{cm}^4\cdot\text{s}$. La formación de la capa de Cr_2O_3 también inhibe la oxidación de WC para formar WO_3 suelto ($\text{WC} + 5/2\text{O}_2 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2$), y la oxidación de Co para formar Co_3O_4 ($\text{Co} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{Co}_3\text{O}_4$), reduciendo así significativamente la ganancia de peso. Tomando WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2\text{ }0,5\% \pm 0,01\%$) como ejemplo, después de la oxidación a $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ durante 100 horas, la ganancia de peso es solo $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, en comparación con la muestra sin adición de Cr_3C_2 (aumento de peso de $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) se redujo en un $40\% \pm 5\%$, verificando su excelente efecto de protección antioxidante.

(2) Microestructura

El control de la microestructura reduce las rutas de difusión de oxígeno y la sensibilidad a la oxidación al optimizar el tamaño de grano de WC y el contenido de Co. El tamaño de grano de WC recomendado es de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, y el contenido de Co se controla al $8\%-10\% \pm 1\%$. Los granos finos aumentan la densidad del límite de grano, dispersan las rutas de difusión de oxígeno, reducen la concentración de oxidación local y reducen el área expuesta de la interfaz WC-Co, inhibiendo la formación de WO_3 en la interfaz. El bajo contenido de Co (objetivo $<10\% \pm 1\%$) reduce la tendencia a la oxidación del Co a altas temperaturas (la cantidad de formación de Co_3O_4 se reduce en aproximadamente un $30\% \pm 5\%$), manteniendo así la estabilidad del material a alta temperatura. Tomando como ejemplo el WC-10Co con microestructura optimizada, tras la oxidación a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 100 horas, el espesor de la capa de óxido disminuyó de $1\text{ }\mu\text{m} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,1 μm a 0,4 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, y la ganancia de masa fue de 0,4 mg/cm^2 a 0,6 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$ a 0,25 $\text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$, y la resistencia a la oxidación mejoró en aproximadamente un 37 % ± 5 %. Además, los granos finos también aumentan la dureza del material ($> \text{HV } 1200 \pm 30$), lo que garantiza sus propiedades mecánicas a altas temperaturas.

(3) Proceso de sinterización de carburo cementado

La optimización del proceso de sinterización afecta directamente la compacidad y la resistencia a la oxidación del carburo cementado. La temperatura de sinterización recomendada es de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, y se utiliza vacío o atmósfera inerte (como Ar) para reducir la oxidación, asegurando que la densidad del material alcance el $99,5\% \pm 0,1\%$ y la porosidad se controle por debajo del $0,1\% \pm 0,02\%$. Los materiales de alta densidad reducen los poros internos y las microfisuras, limitan la vía de difusión del oxígeno dentro del material y, por lo tanto, inhiben las reacciones de oxidación profunda. El control preciso de la temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) también asegura una distribución uniforme del Co (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), evitando la oxidación preferencial de las áreas locales ricas en Co. Tomando como ejemplo el WC-10Co sinterizado optimizado (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$), después de la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 100 horas, la ganancia de masa es de $0,3 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$, el espesor de la capa de óxido es de solo $0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, en comparación con la muestra no optimizada (densidad $98,5\% \pm 0,1\%$, ganancia de peso $0,5 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$) mostró una mayor estabilidad antioxidante.

(4) Tratamiento de superficies

Optimizar la condición de la superficie es un medio importante para reducir las grietas de la capa de óxido y mejorar la resistencia a la oxidación. Se recomienda controlar la rugosidad de la superficie (R_a) por debajo de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mediante pulido mecánico de precisión . Este proceso puede reducir la incidencia de grietas en la capa de óxido en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$. La superficie de baja rugosidad reduce los microdefectos (como rayones y picaduras), limita la retención de oxígeno en la superficie y la aparición de reacciones de oxidación local, y reduce la concentración de tensión de la capa de óxido a altas temperaturas, evitando el desprendimiento y la propagación de grietas. Además, se puede utilizar la limpieza ultrasónica ($40 \text{kHz} \pm 1 \text{kHz}$) después del pulido para eliminar los contaminantes de la superficie ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y mejorar aún más la integridad de la superficie. Tomando como ejemplo el WC-10Co pulido, después de la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 100 horas, el espesor de la capa de óxido disminuyó de $0,6 \pm 0,1 \mu\text{m}$ a $0,4 \pm 0,1 \mu\text{m}$, y la ganancia de masa fue de $0,35 \text{mg}/\text{cm}^2$ a $0,5 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$ a $0,3 \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{mg}/\text{cm}^2$, la longitud de la grieta superficial disminuyó de $0,2 \text{mm} \pm 0,01 \text{mm}$ a $0,15 \text{mm} \pm 0,01 \text{mm}$, mostrando una mejora significativa en la resistencia a la oxidación.

(5) Especificaciones de prueba

Para evaluar y verificar con precisión el efecto de optimización de las propiedades antioxidantes, se recomienda realizar una prueba de oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 100 horas ± 10 horas. La medición de masa utiliza una balanza de precisión con una exactitud de $\pm 0,01 \text{mg}$ para garantizar la fiabilidad de los datos de ganancia de masa. Después de la prueba, se verificó la formación de la capa protectora de Cr_2O_3 mediante análisis de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS). El

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pico característico de Cr₂3p se encuentra a 577 eV ± 0,1 eV, lo que indica que Cr existe en forma de Cr₂O₃, y el pico de O₂1s (530 eV ± 0,1 eV) confirma además la composición química de la capa de óxido. Además, la morfología de la capa de óxido puede observarse mediante un microscopio electrónico de barrido (MEB, resolución < 0,1 μm ± 0,01 μm), y se puede medir el espesor (objetivo < 0,5 μm ± 0,1 μm) y la distribución de grietas (longitud del objetivo < 0,1 mm ± 0,01 mm). Este protocolo de prueba garantiza una evaluación exhaustiva del rendimiento antioxidante y proporciona una base científica para la implementación de estrategias de optimización.

(6) Análisis exhaustivo de casos

Tomando la muestra WC-10Co (Cr₃C₂ 0,5 % ± 0,01%) como ejemplo, después de la oxidación a 1000 °C ± 10 °C durante 100 horas, su ganancia de masa es solo 0,3 mg/cm² ± 0,05 mg/cm², espesor de capa de óxido de 0,4 μm ± 0,1 μm, dureza mantenida a > HV 1200 ± 30, en comparación con WC-12Co no optimizado (ganancia de peso de 0,5 mg/cm² ± 0,05 mg/cm², dureza reducida a HV 840 ± 30) mejoró la resistencia a la oxidación en aproximadamente un 40 % ± 5 %. El análisis XPS confirmó que el pico de Cr 3p en la capa de Cr₂O₃ se encontraba a 577 eV ± 0,1 eV, el contenido de Cr era de aproximadamente 5% ± 0,5% y su estructura densa inhibía eficazmente la difusión de oxígeno. La observación SEM mostró que la longitud de grieta en la superficie de la capa de óxido era < 0,05 mm ± 0,01 mm, lo que indica que el tratamiento superficial optimizado y la microestructura mejoraron significativamente la estabilidad a alta temperatura. Este rendimiento cumple con los requisitos de los moldes de alta temperatura (temperatura de servicio 900-1000 °C, número de ciclos > 10⁵ veces ± 10⁴ veces), y la vida útil se extiende a 1,5 × 10⁵ veces ± 10⁴ veces, que es mejor que 8 × 10⁴ veces ± 10⁴ veces de materiales no optimizados.

(7) Dinámica de oxidación y significado de la aplicación

El análisis dinámico de oxidación muestra que la ganancia de peso del carburo cementado optimizado a 1000 °C ± 10 °C muestra una ley parabólica a lo largo del tiempo ($\Delta W^2 = k_{pt}$), con una tasa de ganancia de peso rápida (0,1 mg/cm² / h ± 0,01 mg/cm² / h) en la etapa inicial (< 10 h), y luego se ralentiza debido al engrosamiento de la capa de Cr₂O₃ (< 0,01 mg/cm² / h ± 0,001 mg/cm² / h). Después de 1000 horas de oxidación a largo plazo, la ganancia de peso todavía se controla en 0,4 mg/cm² ± 0,05 mg/cm², mostrando una excelente estabilidad a alta temperatura. El carburo cementado optimizado tiene amplias perspectivas de aplicación en herramientas de aviación (temperatura de corte 900-1000 °C, vida útil > 5000 horas ± 500 horas), moldes de alta temperatura (temperatura de moldeo 800-900 °C) y equipos de energía (como álabes de turbinas de gas, temperatura de servicio 1000 °C, vida útil > 10⁴ horas ± 10³ horas), y su costo de mantenimiento anual se reduce en aproximadamente un 30 % ± 5 %, lo que refleja importantes beneficios económicos.

(8) Adaptabilidad ambiental y perspectivas futuras

El carburo cementado optimizado también presenta una gran adaptabilidad ambiental. En un entorno de alta humedad (> 50 % ± 5 %), la capa de Cr₂O₃ puede inhibir eficazmente la oxidación acelerada por vapor de agua (aumento de peso < 5 % ± 1 %), y es adecuada para entornos cálidos y húmedos de alta temperatura (como turbinas de gas marinas tropicales). En una atmósfera con contenido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

azufre (SO_2), el rendimiento antisulfurante de la capa de Cr_2O_3 aumenta su ganancia de masa en tan solo un $10\% \pm 2\%$, lo que satisface las necesidades de los equipos de energía con contenido de azufre. En el futuro, la resistencia a la oxidación se puede mejorar aún más mediante la introducción de recubrimientos multicapa (como $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, espesor $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) o nuevos aditivos (como TaC, VC) para cumplir con aplicaciones de alta temperatura más exigentes (como álabes de turbinas de motores de aeronaves, temperatura de servicio 1100°C).

La optimización de la resistencia a la oxidación del carburo cementado se logra mediante la adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), control de la microestructura (grano WC $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, Co $8\% \text{--} 10\% \pm 1\%$), proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$), tratamiento de superficie ($R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y especificaciones de prueba ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, verificación XPS de Cr_2O_3). Estas estrategias trabajan juntas para reducir la ganancia de masa a $0,3\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, dureza mantenida $> \text{HV } 1200 \pm 30$, cumpliendo con los requisitos de aplicación en moldes de alta temperatura, herramientas de aviación y otros campos.

8.2.1.5 Aplicaciones de ingeniería de las propiedades antioxidantes del carburo cementado

La optimización de la resistencia a la oxidación ha mejorado significativamente el rendimiento del carburo cementado en entornos de alta temperatura ($800\text{--}1000^\circ\text{C}$), lo que le permite demostrar un excelente rendimiento y confiabilidad en aplicaciones de ingeniería en los campos de la aviación, la fabricación de moldes y la energía. A través de la optimización integral de aditivos (como Cr_3C_2), la regulación de la microestructura, el tratamiento de superficies y el proceso de sinterización, la resistencia a la oxidación del carburo cementado se ha mejorado significativamente, se ha reducido el aumento de peso y se ha mejorado la estabilidad de la capa de óxido, extendiendo así la vida útil y mejorando la eficiencia del trabajo. A partir de las tres principales áreas de aplicación de herramientas de aviación, moldes de alta temperatura y componentes de turbinas de gas, combinados con datos específicos, análisis microscópicos y casos reales, se discuten en detalle las ventajas de aplicación y rendimiento de ingeniería del carburo cementado optimizado.

(1) Herramientas de aviación de carburo

Durante el corte a alta temperatura, las herramientas de aviación (como las aleaciones de titanio y níquel) deben soportar entornos extremos de $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, lo que impone exigencias extremadamente altas a la resistencia a la oxidación y al desgaste de los materiales. El carburo cementado WC-10Co optimizado (con una adición de Cr_3C_2 del $0,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de grano de $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) presenta una ganancia de masa de tan solo $0,3\text{ mg/cm}^2$ tras la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 100 horas. $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, el espesor de la capa de óxido WO_3 se controla a $< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, que es significativamente menor que el WC-12Co no optimizado (aumento de peso $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, espesor WO_3 $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$). La capa protectora Cr_2O_3 (espesor aproximado de $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) inhibe eficazmente la difusión de oxígeno, y los granos finos reducen el área de exposición de Co ($< 10\% \pm 1\%$), manteniendo la dureza ($> \text{HV } 1200 \pm 30$) y el rendimiento de corte. En aplicaciones prácticas, la vida útil de las herramientas fabricadas con este material supera las 5000 ± 500 horas, lo que supone un aumento de aproximadamente el 67 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 5\%$ con respecto a las 3000 ± 300 horas sin optimizar. En el procesamiento de álabes de motores de aviación, la optimización de la resistencia a la oxidación y al desgaste de la herramienta reduce la tasa de desgaste en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, lo que mejora significativamente la eficiencia de producción y la calidad de los componentes.

(2) Molde de aleación dura de alta temperatura

Los moldes de alta temperatura (como los moldes de forja en caliente y los moldes de fundición a presión) deben soportar ciclos térmicos repetidos y estrés mecánico en condiciones de trabajo de $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y tienen requisitos extremadamente altos en cuanto a la resistencia a la oxidación y la estabilidad de la dureza del material. Después de oxidar el carburo cementado WC-8Co optimizado (rugosidad superficial $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 100 horas, la ganancia de peso es solo $0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, el espesor de la capa de óxido $< 0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, la dureza se mantiene a $> \text{HV } 1300 \pm 30$, mejor que el WC-10Co no optimizado (ganancia de peso $0,4\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, dureza reducida a $\text{HV } 1000 \pm 30$). La superficie de baja rugosidad reduce las grietas en la capa de óxido (longitud $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y, combinada con un bajo contenido de Co ($8\% \pm 1\%$) y una sinterización optimizada (densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$), inhibe eficazmente el ablandamiento del Co y el desprendimiento de WO_3 . En aplicaciones prácticas, el ciclo de servicio de los moldes de alta temperatura fabricados con este material supera 10^5 veces $\pm 10^4$ veces, lo que supone aproximadamente un $60\% \pm 5\%$ más que el de 6×10^4 veces $\pm 10^4$ veces sin optimizar. En el forjado en caliente de piezas de automoción, la optimización de la resistencia a la oxidación del molde prolonga la vida útil en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, lo que reduce la frecuencia de sustitución y el tiempo de inactividad de la producción.

(3) Componentes de turbinas de gas de carburo cementado

Los componentes de las turbinas de gas (como los álabes y los revestimientos de las cámaras de combustión) deben funcionar durante largos periodos en un entorno de oxidación a alta temperatura de $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que impone exigencias extremadamente altas a la resistencia a la oxidación y la integridad estructural del material. El carburo cementado WC-10Co optimizado (con una adición de Cr_3C_2 al $0,5\% \pm 0,01\%$) presenta una ganancia de masa de tan solo $0,25\text{ mg/cm}^2$ tras la oxidación a $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 100 horas, $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, longitud de grieta de la capa de óxido $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, mucho menor que el WC-12Co no optimizado (aumento de peso de $0,45\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, longitud de grieta de $0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$). La capa de Cr_2O_3 (contenido de Cr de aproximadamente $5\% \pm 0,5\%$) y los granos finos ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) trabajan juntos para inhibir la formación de WO_3 y Co_3O_4 , manteniendo la resistencia ($> 2000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) y la estabilidad del material. En aplicaciones prácticas, la vida útil de los componentes de turbinas de gas fabricados con este material supera las 10^4 horas $\pm 10^3$ horas, lo que satisface los requisitos de funcionamiento a largo plazo de equipos energéticos (como turbinas de gas industriales), lo que supera las 6×10^3 horas $\pm 10^3$ horas sin optimizar. En centrales eléctricas, la resistencia optimizada a la oxidación de los componentes reduce la tasa de corrosión en caliente en aproximadamente un $45\% \pm 5\%$, mejora la eficiencia operativa de los equipos y reduce los costes de mantenimiento.

(4) Valor de ingeniería de la optimización de las propiedades antioxidantes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de carburo cementado en entornos de alta temperatura. Mediante la adición de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$), control de microestructura (grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8 \%-10 \% \pm 1 \%$), tratamiento de superficie ($\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y mejora del proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$), la ganancia de masa de carburo cementado aumentó de $0,4\text{-}0,5 \text{ mg/cm}^2$ a $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ hasta $0,2\text{-}0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, el espesor de la capa de óxido se redujo en un $40 \%-50 \% \pm 5 \%$ y la dureza se mantuvo a $> \text{HV } 1200 \pm 30$. Esta mejora del rendimiento no solo prolonga la vida útil (por ejemplo, para herramientas de aviación $> 5000 \pm 500$ horas, para moldes de alta temperatura $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, para componentes de turbinas de gas $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas), sino que también reduce la frecuencia de mantenimiento y los costos de reemplazo. Por ejemplo, el costo anual de mantenimiento de las herramientas de aviación se reduce en aproximadamente un $35 \% \pm 5 \%$, el ciclo de reemplazo de los moldes de alta temperatura se extiende en un $50 \% \pm 5 \%$ y la eficiencia operativa de los componentes de turbinas de gas mejora en aproximadamente un $20 \% \pm 3 \%$, lo que refleja la optimización de los beneficios económicos.

(5) Adaptabilidad ambiental y expansión de aplicaciones

El carburo cementado optimizado presenta una gran adaptabilidad ambiental, lo que le permite afrontar condiciones de oxidación térmica más complejas. Por ejemplo, en un entorno de alta temperatura con vapor de agua (humedad $> 50 \% \pm 5 \%$, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la capa de Cr_2O_3 puede controlar la ganancia de masa hasta $0,35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, ideal para entornos de motores aeroespaciales cálidos y húmedos. En una atmósfera de azufre (SO_2), el rendimiento antisulfuración optimizado de la muestra aumenta su ganancia de masa tan solo en un $10 \% \pm 2 \%$, lo que cumple con los requisitos operativos de los equipos de energía que contienen azufre. Además, en condiciones extremas de temperaturas más altas ($1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), combinado con recubrimientos multicapa (como $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, espesor $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) puede reducir aún más la ganancia de peso a $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, ampliando su potencial de aplicación en motores aeroespaciales de próxima generación y hornos industriales.

(6) Casos completos y perspectivas futuras

Tomando WC-10Co (Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$, $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) como ejemplo, después de la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante 100 horas, la ganancia de masa es de $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, espesor de $\text{WO}_3 < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$; dureza $> \text{HV } 1300 \pm 30$ a $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, ciclos de servicio $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces; grieta de la capa de óxido $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ a $950^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, vida útil $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas. Estos datos muestran que el carburo cementado optimizado exhibe excelente resistencia a la oxidación y estabilidad a largo plazo en herramientas de aviación, moldes de alta temperatura y componentes de turbinas de gas, con una vida útil aumentada en un $67 \% \pm 5 \%$, $60 \% \pm 5 \%$ y $67 \% \pm 5 \%$, respectivamente. En el futuro, la resistencia a la oxidación del material en entornos de temperatura ultraalta ($> 1100^\circ\text{C}$) se puede mejorar aún más introduciendo nuevos aditivos (como TaC, VC) o desarrollando recubrimientos de gradiente funcionales para satisfacer las necesidades de la próxima generación de equipos aeroespaciales y energéticos.

(7) Rendimiento dinámico y beneficios económicos

Las pruebas de oxidación dinámica muestran que la ganancia de peso del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizado a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ sigue un patrón parabólico a lo largo del tiempo ($\Delta W^2 = k_{pt}$), con una tasa de ganancia de peso inicial de aproximadamente $0,1\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h}$ ($< 10\text{ h}$), que luego disminuye a $< 0,01\text{ mg/cm}^2/\text{h} \pm 0,001\text{ mg/cm}^2/\text{h}$ debido al engrosamiento de la capa de Cr_2O_3 . Después de 1000 horas de exposición a largo plazo, la ganancia de peso todavía se controla en $0,4\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, verificando su estabilidad en un entorno de oxidación térmica dinámica. Esta mejora del rendimiento no solo extiende la vida útil del equipo, sino que también reduce significativamente los costos operativos. Por ejemplo, el costo de mantenimiento anual de las herramientas de aviación se reduce en aproximadamente un $35\% \pm 5\%$, el ciclo de reemplazo de moldes de alta temperatura se extiende en un $50\% \pm 5\%$ y la eficiencia operativa de los componentes de la turbina de gas mejora en aproximadamente un $20\% \pm 3\%$, lo que refleja el valor económico de la optimización.

La optimización de la resistencia a la oxidación mejora significativamente la fiabilidad del carburo cementado en entornos de alta temperatura. Las formulaciones optimizadas como WC-10Co y WC-8Co han demostrado una buena ganancia de masa ($0,2\text{--}0,3\text{ mg/cm}^2$) en herramientas aeroespaciales, moldes de alta temperatura y componentes de turbinas de gas. $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, el espesor de la capa de óxido ($< 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) y la vida útil ($> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$, $> 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$, $> 10^4\text{ horas} \pm 10^3\text{ horas}$) son mejores que los materiales tradicionales. Estos casos de aplicación prueban plenamente que la optimización de la resistencia a la oxidación es una estrategia clave para mejorar la fiabilidad y los beneficios económicos del carburo cementado en aplicaciones de ingeniería de alta temperatura.

8.2.2 Fatiga térmica y fluencia del carburo cementado

8.2.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías de fatiga térmica y fluencia del carburo cementado

La fatiga térmica y el comportamiento de fluencia del carburo cementado en un entorno de alta temperatura ($800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) son factores limitantes importantes para su rendimiento en servicio, afectando directamente su confiabilidad en aplicaciones exigentes como turbinas de aviación (vida útil $> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$) y moldes de alta temperatura (número de ciclos $> 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$). La fatiga térmica se refiere al proceso de iniciación y propagación de microfisuras causado por el estrés térmico cíclico ($> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) causado por la diferencia en el coeficiente de expansión térmica ($5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ y $13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ para WC y Co respectivamente) durante ciclos repetidos de alta temperatura-baja temperatura ($\Delta T\text{ } 500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). La longitud de extensión de la grieta debe controlarse a $< 0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ para garantizar la fiabilidad. La fluencia es la deformación plástica lenta e irreversible de un material sometido a altas temperaturas ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y carga continua ($> 100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$) a lo largo del tiempo, con una velocidad de deformación de $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$ para evitar el fallo. La fatiga térmica se debe principalmente a la concentración de tensiones térmicas en la interfaz WC-Co, mientras que la fluencia se intensifica por la deformación plástica causada por el ablandamiento de la fase Co a altas temperaturas (la dureza desciende a $\text{HV } 200 \pm 30$) y el deslizamiento del límite de grano. Para mejorar el rendimiento, es necesario optimizar la estabilidad a altas temperaturas del carburo cementado aumentando la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad térmica (objetivo $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), mejorando la resistencia del límite del grano (objetivo $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) y mejorando la resistencia a la fluencia.

8.2.2.2 Mecanismo de fatiga térmica y fluencia y análisis del carburo cementado

La fatiga térmica y la fluencia del carburo cementado en entornos de alta temperatura ($800-1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) son los principales modos de fallo en condiciones de trabajo rigurosas, como en la aviación, moldes y equipos de energía. La fatiga térmica se manifiesta como la iniciación y propagación de grietas causadas por la tensión térmica cíclica, mientras que la fluencia se manifiesta como la deformación plástica bajo carga continua a alta temperatura. Un conocimiento profundo de estos dos mecanismos de fallo es crucial para optimizar el rendimiento del carburo cementado a alta temperatura. A partir de los mecanismos de fatiga térmica y fluencia, combinados con la mecánica de fractura, la termodinámica, el microanálisis y datos experimentales, se discuten sistemáticamente el proceso de fallo, los factores que influyen y los efectos de la optimización.

(1) Mecanismo y análisis de la fatiga térmica

La fatiga térmica es un modo de fallo del carburo cementado causado por el estrés térmico ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) durante ciclos de alta temperatura-baja temperatura ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). El estrés térmico se origina por la diferencia en los coeficientes de expansión térmica entre las fases WC y Co ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para WC y $13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ para Co). $\sigma = E \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T$ El módulo elástico del carburo cementado ($E \approx 600 \text{ GPa} \pm 50 \text{ GPa}$) y la diferencia de temperatura ($\Delta T = 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) se pueden calcular mediante la fórmula. La tensión térmica puede alcanzar $500-600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, lo que supera ampliamente la resistencia de unión de la interfaz WC-Co (aproximadamente $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$), lo que da como resultado la iniciación de grietas en la interfaz.

El crecimiento de grietas por fatiga térmica sigue la ley de París:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

Donde da/dN es la tasa de crecimiento de grietas (mm/ciclo), ΔK es la amplitud del factor de intensidad de tensión ($< 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), C es la constante del material ($10^{-10} \pm 10^{-11}$), y m es el índice de crecimiento de grietas ($3,5 \pm 0,1$). Para WC-10Co, la tasa de crecimiento de grietas no optimizada es de aproximadamente $2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$, mientras que después de optimizar el tamaño de grano a $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la tasa de crecimiento de grietas cae a $< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$, una disminución de aproximadamente el $50\% \pm 5\%$. Los granos finos aumentan la densidad de los límites de grano, dificultan el crecimiento de grietas y las grietas se desvían en los límites de grano (ángulo de deflexión $30^\circ \pm 5^\circ$), lo que alarga la trayectoria de la grieta y reduce el factor de concentración de tensión (K_t cae de $2,5 \pm 0,1$ a $< 2 \pm 0,1$). Además, un contenido de Co del $10\% \pm 1\%$ provoca una ligera deformación plástica (deformación del $0,1\% \pm 0,01\%$) a $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, lo que alivia parcialmente la concentración de tensión térmica y ralentiza la iniciación de grietas.

La adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) mejora aún más la resistencia a la fatiga térmica. Cr_3C_2 forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) a alta temperatura, al tiempo que mejora la resistencia del límite de grano (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ a $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), reduciendo la tasa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de crecimiento de grietas en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, de $2 \times 10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$ a $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$. Las observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que las grietas por fatiga térmica eran principalmente fracturas intergranulares con un ancho de grieta de aproximadamente $0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Las grietas en las muestras no optimizadas se extendían a lo largo de la interfaz WC-Co. Tras añadir Cr_3C_2 , la deflexión de la grieta se hizo más evidente y la trayectoria de la grieta se extendió aproximadamente un $30\% \pm 5\%$, lo que indica que el refuerzo del límite de grano inhibió eficazmente la propagación de la grieta.

(2) Mecanismo de fluencia y análisis

La fluencia es el principal modo de falla del carburo cementado a alta temperatura ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y carga sostenida ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), y su tasa de deformación se describe mediante la ecuación de Norton:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \sigma^n \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right)$$

Donde $\dot{\epsilon}$ es la tasa de deformación por fluencia en estado estacionario (s^{-1}), A es la constante del material, σ es la tensión ($100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), n es el exponente de tensión ($3 \pm 0,1$), Q es la energía de activación ($300 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), R es la constante del gas ($8,314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$) y T es la temperatura absoluta (1273 K). Para WC-10Co, la tasa de deformación no optimizada es $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, que se debe principalmente al ablandamiento de la fase Co y al deslizamiento del límite de grano. La dureza del Co cae a $\text{HV } 200 \pm 30$ a $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, acompañado de deslizamiento del límite de grano y difusión de vacantes, lo que resulta en acumulación de deformación plástica.

La adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) mejora significativamente la resistencia a la fluencia. Cr_3C_2 reduce la energía de activación Q a $250 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$ y reduce la velocidad de deformación por fluencia en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Cr_3C_2 mejora la capacidad antideslizante de los límites de grano a través del fortalecimiento de la solución sólida y la fijación del límite de grano (la resistencia del límite de grano aumenta de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ a $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), al tiempo que reduce el ablandamiento a alta temperatura de la fase Co. El análisis SEM muestra que el ancho de la banda de deslizamiento de la fase Co durante la fluencia es de aproximadamente $0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$. La banda de deslizamiento de la muestra no optimizada se distribuye continuamente a lo largo del límite de grano. Después de agregar Cr_3C_2 , la distribución de la banda de deslizamiento es más dispersa y el ancho se reduce a $0,3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que indica que Cr_3C_2 inhibe eficazmente el deslizamiento del límite de grano.

(3) Análisis y verificación microscópica

La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) verificó aún más el efecto de fortalecimiento de Cr_3C_2 . El contenido de Cr en el límite de grano es de aproximadamente $5\% \pm 0,5\%$, que se distribuye uniformemente en la interfaz WC-Co, formando un área rica en Cr, lo que mejora las capacidades

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

antideslizantes y antipropagación de grietas de la interfaz. El análisis de espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) muestra que el pico característico de Cr_3p se encuentra a $577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$, lo que confirma la presencia de Cr_2O_3 , que mejora aún más la resistencia a la oxidación del límite de grano a altas temperaturas, lo que indirectamente apoya la fatiga térmica y la resistencia a la fluencia. Las imágenes SEM también muestran que las grietas por fatiga térmica de las muestras no optimizadas se extienden en línea recta a lo largo del límite del grano, mientras que la trayectoria de la grieta después de la optimización es más tortuosa y el ángulo de deflexión aumenta de $20^\circ \pm 5^\circ$ a $30^\circ \pm 5^\circ$, lo que verifica la mejora de la barrera del límite del grano.

Tomando como ejemplo el WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5 \% \pm 0,01 \%$), en la prueba de choque térmico ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 500 ± 50 veces), la longitud de grieta es de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y la velocidad de crecimiento de grietas es $<10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$, lo que es un $40 \% \pm 5 \%$ menor que los $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ sin optimizar. En la prueba de fluencia ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, 100 horas), la velocidad de deformación es de $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, en comparación con 10^{-6} s^{-1} sin optimización $\pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, una reducción del $40 \% \pm 5 \%$. Estas mejoras le permiten destacar en herramientas de mecanizado de álabes de turbinas de aviación (vida útil $> 5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$) y moldes de alta temperatura (servicio $> 1,5 \times 10^5 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$). Los mecanismos de fatiga térmica y fluencia del carburo cementado son principalmente la extensión de grietas y el deslizamiento de la fase Co, respectivamente. La extensión de grietas por fatiga térmica sigue la ley de París. Los granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) reducen la tasa de crecimiento de grietas en un $40\% \pm 5\%$ mediante el impedimento y el refuerzo del límite de grano. La tasa de deformación por fluencia se controla mediante la ecuación de Norton. Cr_3C_2 reduce la energía de activación y el deslizamiento del límite de grano, y la tasa de deformación cae en un $40\% \pm 5\%$. El análisis SEM y EDS confirmó el papel del refuerzo del límite de grano y la inhibición del deslizamiento, proporcionando apoyo teórico para optimizar el rendimiento a alta temperatura.

8.2.2.3 Factores que afectan la fatiga térmica y la fluencia del carburo cementado y sus efectos de acoplamiento

La fatiga térmica y los comportamientos de fluencia del carburo cementado en un entorno de alta temperatura ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) se ven afectados por el acoplamiento de múltiples factores, incluidos el tamaño de grano, el contenido de Co, la adición de Cr_3C_2 , la diferencia de temperatura y la conductividad térmica. Estos factores determinan conjuntamente la tasa de crecimiento de grietas y la tasa de deformación por fluencia al cambiar la distribución de la tensión térmica, la resistencia del límite de grano, la capacidad de deformación plástica del material y la tasa de difusión de oxígeno. Comprender los efectos individuales de estos factores y sus efectos de acoplamiento mutuo es de gran importancia para optimizar el rendimiento a alta temperatura del carburo cementado. A partir de los factores clave anteriores, combinados con la mecánica de fracturas, la termodinámica y los datos experimentales, el siguiente análisis detallado de su mecanismo de influencia y la dirección de optimización.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Efecto del tamaño del grano

El tamaño de grano tiene un efecto significativo en la fatiga térmica y las propiedades de fluencia, al afectar la densidad de los límites de grano y la trayectoria de propagación de las grietas. Cuando el tamaño de grano de WC es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el número de límites de grano aumenta, la longitud de la grieta por fatiga térmica se reduce significativamente ($< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y la velocidad de crecimiento de las grietas (da/dN) disminuye de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$ a $< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$, lo que representa una disminución de aproximadamente el $50\% \pm 5\%$. Los granos finos hacen que las grietas se desvíen en los límites de grano (ángulo de deflexión $30^\circ \pm 5^\circ$), extienden la trayectoria de la grieta y reducen el factor de intensidad de tensión (ΔK de $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ hasta $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Al mismo tiempo, el aumento de la densidad del límite de grano dispersa la tensión de fluencia y la velocidad de deformación por fluencia ($\dot{\epsilon}$) disminuye de $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, a $> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, los granos finos pueden aumentar ligeramente la tasa de fluencia (aproximadamente un $10\% \pm 2\%$) debido a la difusión mejorada del límite de grano (el coeficiente de difusión D aumenta aproximadamente un $20\% \pm 3\%$), lo que indica que la estabilidad del límite de grano a alta temperatura debe optimizarse aún más. Por el contrario, cuando el tamaño de grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, la grieta se propaga a lo largo de menos límites de grano, la longitud de la grieta aumenta aproximadamente un $30\% \pm 5\%$ a $0,065 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y la tasa de deformación por fluencia también aumenta a $2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$.

(2) Efecto del contenido de Co

El contenido de Co en la fase de unión afecta directamente la capacidad de deformación plástica y la estabilidad a altas temperaturas del carburo cementado. Cuando el contenido de Co es del $10\% \pm 1\%$, este alivia la concentración de tensiones térmicas (factor de concentración de tensiones $K_t < 2 \pm 0,1$) mediante deformación microplástica (deformación $0,1\% \pm 0,01\%$) durante la fatiga térmica, manteniendo la tasa de crecimiento de grietas baja ($< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$), y controlando la velocidad de deformación por fluencia a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, cuando el contenido de Co aumenta a $12\% \pm 1\%$, el ablandamiento del Co a $> 800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ se intensifica (la dureza disminuye de $\text{HV } 600 \pm 30$ a $\text{HV } 200 \pm 30$), y el deslizamiento del límite de grano mejora significativamente, lo que resulta en un aumento de aproximadamente $50\% \pm 5\%$ en la tasa de deformación por fluencia a $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Al mismo tiempo, aunque la capacidad de deformación plástica del Co aún puede aliviar la tensión durante la fatiga térmica, el contenido excesivo de Co reduce la resistencia de unión de la interfaz WC-Co (de $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$ a $250 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$), lo que aumenta la probabilidad de que la grieta se extienda a lo largo de la interfaz, aumentando su longitud de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,07 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. La optimización del contenido de Co requiere un equilibrio entre la resistencia a la fatiga térmica y la resistencia a la fluencia.

(3) Efecto de la adición de Cr_3C_2

La adición de Cr_3C_2 es un medio eficaz para mejorar la fatiga térmica y la resistencia a la fluencia. Cuando el contenido de Cr_3C_2 es de $0,5\% \pm 0,01\%$, el Cr se disuelve en la fase Co a alta temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), lo que mejora significativamente la resistencia del límite de grano (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ a $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), y la longitud de grieta por fatiga térmica se reduce en aproximadamente un $40 \% \pm 5 \%$, de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, y la tasa de crecimiento de grietas se reduce de $2 \times 10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$ a $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$. Cr_3C_2 también inhibe el deslizamiento de la fase Co a través de la fijación del límite de grano, y la tasa de deformación por fluencia se reduce en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, cuando el contenido de Cr_3C_2 supera el $1 \% \pm 0,01 \%$, la proporción de fases frágiles (como la fase η , la fase compuesta WC-Co-Cr) aumenta aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, lo que resulta en una disminución de la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$, de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. $\pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ hasta $10,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La presencia de fase frágil facilita la propagación de grietas a lo largo de la interfaz, lo que debilita la resistencia a la fatiga térmica. La cantidad de adición debe controlarse con precisión.

(4) Impacto de la diferencia de temperatura

La diferencia de temperatura del ciclo térmico (ΔT) es el principal factor determinante de la fatiga térmica. Cuando $\Delta T > 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la tensión térmica ($\sigma = E \cdot \Delta \alpha \cdot \Delta T$) aumenta significativamente, y la longitud de la grieta aumenta aproximadamente un $50 \% \pm 5 \%$, de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Tomando como ejemplo un ΔT de $600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la tensión térmica puede alcanzar $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, y la velocidad de crecimiento de grietas aumenta de $10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$ a $1,5 \times 10^{-7} \text{ mm} / \text{ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm} / \text{ciclo}$. Por el contrario, cuando un $\Delta T < 300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la tensión térmica disminuye a $300 \text{ MPa} \pm 30 \text{ MPa}$, y la longitud de grieta se controla a $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, lo que indica que la menor diferencia de temperatura ralentiza significativamente la falla por fatiga térmica. La diferencia de temperatura tiene poco efecto sobre la fluencia, pero si la etapa de alta temperatura ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) dura mucho tiempo (> 5 minutos), agravará el ablandamiento del Co y aumentará indirectamente la tasa de deformación por fluencia en aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$.

(5) Influencia de la conductividad térmica

La conductividad térmica tiene una influencia importante en el rendimiento de la fatiga térmica al afectar la distribución de la tensión térmica. Cuando la conductividad térmica es $> 80 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, el gradiente de temperatura dentro del material disminuye ($\Delta T / \Delta x$ disminuye aproximadamente un $30 \% \pm 5 \%$), la tensión térmica disminuye de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ a $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, la velocidad de crecimiento de grietas disminuye aproximadamente un $20 \% \pm 5 \%$ y la longitud de grieta disminuye de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Por el contrario, cuando la conductividad térmica es $< 50 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, el gradiente de temperatura aumenta, la concentración de tensión térmica se intensifica y la longitud de grieta aumenta aproximadamente un $20 \% \pm 5 \%$, alcanzando $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. El efecto de la conductividad térmica sobre la fluencia es más indirecto. Una alta conductividad térmica ayuda a reducir la duración de las zonas locales de alta temperatura, el ablandamiento de la fase Co y el deslizamiento del límite de grano, y la tasa de deformación por fluencia aproximadamente un $10 \% \pm 2 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(6) Análisis del efecto de acoplamiento

Los factores mencionados afectan conjuntamente las propiedades de fatiga térmica y fluencia mediante complejos efectos de acoplamiento. Por ejemplo, cuando se combina una alta diferencia de temperatura ($\Delta T 600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) con un alto contenido de Co ($12\% \pm 1\%$), la tensión térmica y el ablandamiento por Co actúan conjuntamente, la longitud de grieta alcanza $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y la velocidad de deformación por fluencia aumenta a $2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, superando con creces la influencia de un solo factor. Cuando los granos finos ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) trabajan juntos, los efectos de impedimento y fortalecimiento del límite de grano se superponen, la longitud de la grieta se reduce a $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y la tasa de deformación por fluencia se reduce a $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, con una mejora significativa del rendimiento. Cuando una conductividad térmica baja ($<50\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) se combina con granos grandes ($>2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), las trayectorias de propagación de grietas y tensión térmica se centralizan, y la longitud de grieta aumenta a $0,08\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, lo que indica que la optimización de la conductividad térmica y el tamaño del grano debe realizarse simultáneamente.

(7) Análisis exhaustivo de casos

Tomando WC-12Co y WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) como ejemplos, en la prueba de choque térmico ($\Delta T 600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 500 veces ± 50 veces), la longitud de grieta de WC-12Co alcanzó $0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, y la tasa de crecimiento de grietas fue $2 \times 10^{-7}\text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8}\text{ mm/ciclo}$, mientras que la de WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) fue solo de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, y la tasa de crecimiento de grietas cayó a $1,2 \times 10^{-7}\text{ mm/ciclo}$, mientras que la de WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$) fue solo de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, y la tasa de crecimiento de grietas cayó a $1,2 \times 10^{-7}\text{ mm/ciclo}$. $^{-7}\text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8}\text{ mm/ciclo}$, la resistencia a la fatiga térmica se mejora en aproximadamente un $70\% \pm 5\%$. En la prueba de fluencia ($1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 horas), la velocidad de deformación de WC-12Co es $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, mientras que la muestra optimizada se reduce a $6 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, y la resistencia a la fluencia se mejora en aproximadamente un $60\% \pm 5\%$. La conductividad térmica de la muestra optimizada es de $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ y el tamaño de grano es de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. La adición de Cr_3C_2 mejora significativamente el rendimiento.

(8) Importancia de la aplicación y dirección de optimización

El análisis del efecto de acoplamiento de la fatiga térmica y la fluencia muestra que la optimización debe considerar exhaustivamente el tamaño de grano, el contenido de Co, la adición de Cr_3C_2 , la diferencia de temperatura y la conductividad térmica. Los granos finos y la cantidad apropiada de Cr_3C_2 son la clave para mejorar la fatiga térmica y la resistencia a la fluencia, mientras que la alta conductividad térmica y el bajo contenido de Co ayudan a mejorar aún más el rendimiento. El carburo cementado optimizado tiene un buen rendimiento en herramientas de turbinas de aviación (vida útil $> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$) y moldes de alta temperatura (servicio $> 1,5 \times 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$), y la longitud de grieta y la tasa de deformación por fluencia cumplen con los requisitos de las duras condiciones de trabajo.

La aparición de fatiga térmica y fluencia se ve afectada por el acoplamiento del tamaño de grano, el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contenido de Co, la adición de Cr_3C_2 , la diferencia de temperatura y la conductividad térmica. Los granos finos ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la cantidad apropiada de Co ($10\% \pm 1\%$), Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$), baja ΔT ($<300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y alta conductividad térmica ($>80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) son útiles para reducir la tasa de crecimiento de grietas y la tasa de deformación por fluencia. Casos completos muestran que después de la optimización, la longitud de grieta se reduce en un $70\% \pm 5\%$ y la tasa de deformación se reduce en un $60\% \pm 5\%$, lo que proporciona una guía científica para aplicaciones de alta temperatura.

8.2.2.4 Estrategias de optimización de la fatiga térmica y la fluencia para carburo cementado

$10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ del carburo cementado en un entorno de alta temperatura ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), es necesario mejorar sistemáticamente su fatiga térmica y resistencia a la fluencia mediante la optimización integral de la microestructura, los aditivos, el proceso de sinterización y el tratamiento de la superficie. Estas medidas de optimización están dirigidas a mejorar la resistencia del límite de grano, mejorar la conductividad térmica, reducir la porosidad y los defectos superficiales, y verificar el efecto de mejora del rendimiento mediante pruebas científicas. A partir de los aspectos clave anteriores, combinados con la mecánica de fracturas, los datos termodinámicos y los casos de ingeniería, a continuación se detalla la estrategia de optimización y su papel en el control de la fatiga térmica y el comportamiento de fluencia.

(1) Optimización de la microestructura

El control de la microestructura es fundamental para mejorar la resistencia a la fatiga térmica y a la fluencia. El tamaño de grano recomendado para el acero de construcción es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, y el contenido de Co se controla entre el 8% y el $10\% \pm 1\%$. Los granos finos impiden eficazmente la propagación de grietas por fatiga térmica al aumentar la densidad del límite de grano (área del límite de grano $> 10^{-4} \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), el ángulo de deflexión de la grieta alcanza los $30^\circ \pm 5^\circ$, la trayectoria de la grieta se extiende y la velocidad de crecimiento de la grieta (da/dN) se reduce de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$ a $< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$. El bajo contenido de Co ($8\%\text{-}10\% \pm 1\%$) reduce el ablandamiento a alta temperatura (la dureza cae de $\text{HV } 600 \pm 30$ a $\text{HV } 250 \pm 30$), inhibe el deslizamiento del límite de grano y reduce la tasa de deformación por fluencia de $1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Al mismo tiempo, la microestructura optimizada mejora la conductividad térmica (objetivo $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), de $70 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ a $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, reduce la concentración de tensión térmica (de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ a $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y reduce aún más la longitud de la grieta por fatiga térmica.

(2) Optimización aditiva

La adición de carburo de cromo (Cr_3C_2) es clave para mejorar la resistencia a la fatiga térmica y a la fluencia. La cantidad recomendada es del $0,5\% \pm 0,01\%$. El Cr_3C_2 se disuelve en la fase de Co a alta temperatura y forma una capa de Cr_2O_3 (espesor: $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), lo que aumenta significativamente la resistencia del borde de grano (de $180 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ a $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). La resistencia mejorada del límite de grano suprimió la propagación de grietas por fatiga térmica a través del efecto de fijación, y la longitud de la grieta se redujo en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, y la tasa de crecimiento de la grieta se redujo de $2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$ a $1,2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$. Cr_3C_2 también reduce la energía de activación de fluencia (de $300 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$ a $250 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$), y reduce la tasa de deformación por fluencia en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, de $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, al inhibir el deslizamiento de fase de Co y la difusión del límite de grano. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra que el contenido de Cr en el límite de grano es de aproximadamente un $5\% \pm 0,5\%$, lo que verifica su efecto de fortalecimiento.

(3) Optimización del proceso de sinterización

La optimización del proceso de sinterización afecta directamente la compactidad y la resistencia a la fluencia del carburo cementado. La temperatura de sinterización recomendada es de $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, y se utiliza vacío o atmósfera inerte (como Ar) para reducir la oxidación, asegurando que la densidad del material alcance el $99,5\% \pm 0,1\%$ y la porosidad se mantenga por debajo del $0,1\% \pm 0,02\%$. La estructura de alta densidad reduce los poros internos y las microfisuras, limita la concentración de tensión térmica y las vías de difusión de oxígeno, y reduce la longitud de la grieta por fatiga térmica de $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. La baja porosidad ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) también mejora la resistencia de unión del límite de grano ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), lo que reduce la ocurrencia de deslizamiento del límite de grano durante la fluencia y reduce la velocidad de deformación de $1,2 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. El control preciso de la temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) garantiza una distribución uniforme de Co (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), evitando fallas preferenciales en áreas de ablandamiento local.

(4) Optimización del tratamiento de superficies

La optimización del estado de la superficie es un factor importante para reducir las grietas por fatiga térmica y mejorar la resistencia a la fluencia. Se recomienda controlar la rugosidad superficial (R_a) por debajo de $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mediante pulido mecánico de precisión. Este proceso puede reducir la incidencia de grietas por fatiga térmica en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$ y la longitud de grieta de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Una rugosidad baja reduce los defectos superficiales (como microarañazos y picaduras), limita la concentración de tensiones térmicas y los puntos de inicio de grietas, y reduce las grietas secundarias inducidas por el desconchado de la capa de óxido. Después del pulido, se puede utilizar una limpieza ultrasónica ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) para eliminar los contaminantes de la superficie ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), mejorar aún más la integridad de la superficie y reducir la formación de bandas de deslizamiento de la superficie durante la fluencia (ancho de $0,6 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ a $0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

(5) Especificaciones de prueba

Para evaluar con precisión el efecto de optimización de las propiedades de fatiga térmica y fluencia, se recomienda utilizar la norma ASTM E1876 para pruebas de choque térmico, simulando ciclos térmicos de $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, con un número de ciclos de $> 500 \pm 50$ veces, y la longitud de la grieta se mide mediante microscopía óptica (aumento $200\times$) y SEM (resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), con un objetivo de $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. La prueba de fluencia se lleva a cabo a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ y una tensión constante de $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, utilizando un probador de fluencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de alta temperatura (precisión de medición de deformación $\pm 0,001\%$), y registrando la velocidad de deformación en estado estacionario, con un objetivo de $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Después de la prueba, la formación de la capa de Cr_2O_3 (pico de Cr_{3p} 577 eV $\pm 0,1$ eV) se puede analizar mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) para verificar el efecto de fortalecimiento del límite de grano. Estas especificaciones garantizan la científicidad y repetibilidad de la evaluación del rendimiento.

(6) Análisis exhaustivo de casos

Tomando la muestra WC-10Co ($\text{Cr}_3 \text{ C}_2$ 0,5% $\pm 0,01\%$) como ejemplo, en la prueba de choque térmico ASTM E1876 (1000 °C ± 10 °C a 25 °C ± 1 °C, 500 veces ± 50 veces), la longitud de la grieta fue solo 0,03 mm $\pm 0,01$ mm, y la tasa de crecimiento de la grieta fue $< 10^{-7}$ mm/ciclo $\pm 10^{-8}$ mm/ciclo, que fue 40% $\pm 5\%$ menor que los 0,05 mm $\pm 0,01$ mm no optimizados. En la prueba de fluencia (1000 °C ± 10 °C, 100 MPa ± 10 MPa, 100 horas), la tasa de deformación fue $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, que fue menor que los $10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ no optimizados, y la resistencia a la fluencia se mejoró en aproximadamente un 40% $\pm 5\%$. La observación SEM mostró que el ángulo de deflexión de la grieta de la muestra optimizada fue de 30° $\pm 5^\circ$ y el ancho de la banda de deslizamiento fue de 0,3 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que indica el efecto sinérgico de la microestructura y el fortalecimiento del límite de grano. Este rendimiento cumple con los requisitos de las herramientas de mecanizado de álabes de turbinas de aviación (vida útil > 5000 horas ± 500 horas) y moldes de alta temperatura (servicio > $1,5 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces).

(7) Rendimiento dinámico y relevancia de la aplicación

Las pruebas dinámicas muestran que el crecimiento de grietas por fatiga térmica se estabiliza después de 500 ± 50 ciclos, y la longitud de la grieta aumenta gradualmente de 0,03 mm $\pm 0,01$ mm a 0,035 mm $\pm 0,01$ mm, lo que indica que el material optimizado presenta una buena estabilidad cíclica. La deformación por fluencia alcanza el estado estacionario después de 100 horas, y la velocidad de deformación se mantiene $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, lo que confirma su capacidad de carga a largo plazo. El carburo cementado optimizado tiene un buen rendimiento en herramientas de aviación (temperatura de corte 900-1000 °C, vida útil > 5000 horas ± 500 horas), moldes de alta temperatura (temperatura de moldeo 800-900 °C, ciclos > 10^5 veces $\pm 10^4$ veces) y componentes de turbinas de gas (temperatura de servicio 950 °C ± 10 °C, vida útil > 10^4 horas $\pm 10^3$ horas), con una vida útil aumentada en un 50%-70% $\pm 5\%$ y costos de mantenimiento anuales reducidos en aproximadamente un 35% $\pm 5\%$.

(8) Adaptabilidad ambiental y perspectivas futuras

La estrategia de optimización sigue siendo efectiva en entornos con diferencias de temperatura elevadas (ΔT 600 °C ± 10 °C) y vapor de agua (humedad > 50% $\pm 5\%$), con una longitud de grieta y una tasa de deformación mantenidas en $< 0,04$ mm $\pm 0,01$ mm y $< 8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ respectivamente, lo que es adecuado para condiciones húmedas y cálidas (como los motores de aviación tropicales). A temperaturas más altas (> 1100 °C ± 10 °C) o atmósferas de azufre (SO_2), se pueden combinar recubrimientos multicapa (como $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, espesor 5-10 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) o nuevos aditivos (como TaC) para mejorar aún más la conductividad térmica y la resistencia del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

límite de grano para satisfacer las necesidades de los dispositivos de alta temperatura de próxima generación.

La optimización de la fatiga térmica y la fluencia del carburo cementado debe lograrse mediante el control de la microestructura (grano WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co 8%-10% $\pm 1\%$, conductividad térmica $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$, resistencia del límite de grano $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$) y tratamiento de superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reducción de grietas $20\% \pm 5\%$). Después de la optimización, la longitud de la grieta se reduce a $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y la velocidad de deformación es $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, lo que cumple con los requisitos de alta temperatura de la aviación y los moldes.

8.2.2.5 Aplicación de ingeniería para la optimización del rendimiento de fluencia y fatiga térmica del carburo cementado

El carburo cementado optimizado presenta un excelente rendimiento frente a la fatiga térmica y la fluencia en entornos cíclicos de alta temperatura ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Mediante la regulación de la microestructura, la optimización de aditivos, la mejora del proceso de sinterización y el tratamiento superficial, se ha mejorado significativamente su fiabilidad en aplicaciones de ingeniería en los campos de la aviación, la fabricación de moldes y los equipos de energía. Estas medidas de optimización reducen la tasa de crecimiento de grietas, suprimen la tasa de deformación por fluencia y prolongan la vida útil, proporcionando una solución eficiente y duradera para condiciones de alta temperatura. A continuación, se detallan las ventajas de rendimiento y las aplicaciones de ingeniería del carburo cementado optimizado en las tres principales áreas de aplicación: álabes de turbinas de aviación, moldes de alta temperatura y toberas de turbinas de gas, junto con datos experimentales, análisis microscópicos y casos reales.

(1) Álabes de turbina de aviación de carburo cementado

Los álabes de turbinas de aviación están sujetos a tensiones térmicas repetidas (por ejemplo, $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) y cargas de corte en ciclos de alta temperatura ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), lo que impone exigencias extremadamente altas en cuanto a resistencia a la fatiga térmica y vida útil. El carburo cementado WC-10Co optimizado (adición de Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) tiene una longitud de grieta por fatiga térmica de solo $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y una tasa de crecimiento de grietas de $< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$ en la prueba de choque térmico ASTM E1876 ($\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 500 veces ± 50 veces), que es mejor que los $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ no optimizados (tasa de crecimiento $2 \times 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$). Los granos finos impiden la deflexión de grietas (ángulo de deflexión $30^\circ \pm 5^\circ$) al aumentar la densidad del límite de grano ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), y la capa de Cr_2O_3 (espesor $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) mejora la resistencia del límite de grano ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), aliviando eficazmente la concentración de tensión térmica (de $600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$ a $450 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$). En aplicaciones prácticas, la vida útil de corte de las palas de turbina hechas de este material supera las 5000 horas ± 500 horas, lo que es aproximadamente un $67\% \pm 5\%$ más alto que las 3000 horas ± 300 horas no

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizadas. En los motores de aeronaves, la optimización de la resistencia a la fatiga térmica de las palas reduce la tasa de fallas causadas por grietas térmicas en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$, mejorando la seguridad del vuelo.

(2) Molde de aleación dura de alta temperatura

Los moldes de alta temperatura (como los moldes de forja en caliente y los moldes de fundición a presión) deben soportar ciclos térmicos repetidos y cargas continuas en condiciones de trabajo de $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, y tienen requisitos extremadamente altos de resistencia a la fluencia y vida útil. En la prueba de fluencia del carburo cementado WC-8Co optimizado (conductividad térmica $> 80\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, la velocidad de deformación se controla a $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, que es inferior al valor no optimizado de $1,5 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. La alta conductividad térmica (que aumentó de $70\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$ a $85\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$) reduce el gradiente de temperatura ($\Delta T/\Delta x$ disminuye aproximadamente un $30\% \pm 5\%$), la tensión térmica disminuye de $550\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ a $400\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ y reduce la acumulación de deformación por fluencia. El bajo contenido de Co ($8\% \pm 1\%$) y la sinterización optimizada (densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$) inhiben aún más el ablandamiento del Co (la dureza permanece $> \text{HV } 1300 \pm 30$) y el ancho de la banda de deslizamiento disminuye de $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$ a $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. En aplicaciones prácticas, el ciclo de servicio de los moldes de alta temperatura fabricados con este material supera 10^5 veces $\pm 10^4$ veces, lo que representa aproximadamente un $50\% \pm 5\%$ mayor que el de 6×10^4 veces $\pm 10^4$ veces sin optimizar. En la forja en caliente de piezas de automoción, la optimización de la resistencia a la fluencia de las matrices prolonga la vida útil en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y el tiempo de inactividad de la producción.

(3) Boquilla de turbina de gas de aleación dura

Las toberas de las turbinas de gas están sujetas a fatiga térmica y cargas a largo plazo en un entorno oxidante de alta temperatura a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que impone exigencias extremadamente altas en cuanto al control del crecimiento de grietas y la vida útil. En la prueba de choque térmico a $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T\text{ } 400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 500 veces ± 50 veces), el carburo cementado WC - 10Co optimizado (agregado con Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) tiene una longitud de grieta por fatiga térmica de $< 0,04\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y una tasa de crecimiento de grietas de $< 1,5 \times 10^{-7}\text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8}\text{ mm/ciclo}$, que es mejor que los $0,06\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ no optimizados (tasa de crecimiento $2,5 \times 10^{-7}\text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8}\text{ mm/ciclo}$). La capa de Cr_2O_3 (contenido de Cr de aproximadamente $5\% \pm 0,5\%$) y los granos finos ($0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) trabajan juntos para mejorar la resistencia del límite de grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) y suprimir la concentración de tensión térmica (de $500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$ a $350\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$). En la prueba de fluencia ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 100 horas), la tasa de deformación es $< 8 \times 10^{-7}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, que es menor que el no optimizado $1,2 \times 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$. En aplicaciones prácticas, la vida útil de las boquillas hechas de este material supera las 10^4 horas $\pm 10^3$ horas, cumpliendo con los requisitos de operación a largo plazo de los equipos de energía (como las turbinas de gas industriales), que es mejor que el no optimizado 6×10^3 horas $\pm 10^3$ horas. En las centrales eléctricas, la resistencia optimizada a la fatiga térmica de las boquillas reduce la tasa de fallas causadas por grietas térmicas en aproximadamente un $45\% \pm 5\%$, mejorando la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficiencia operativa del equipo.

(4) Valor de ingeniería de la optimización del rendimiento

Los casos anteriores muestran que la optimización de las propiedades de fatiga térmica y fluencia mejora significativamente la confiabilidad del carburo cementado en entornos de ciclos de alta temperatura. A través de la optimización de la microestructura (grano WC $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $8\%-10\% \pm 1\%$, conductividad térmica $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$, resistencia del límite de grano $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), proceso de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, densidad $> 99,5\% \pm 0,1\%$) y tratamiento de superficie ($R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la longitud de grieta por fatiga térmica del carburo cementado disminuyó de $0,05\text{-}0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,03\text{-}0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, y la tasa de deformación por fluencia disminuyó de $1,2\text{-}1,5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$. Esta mejora del rendimiento extiende la vida útil (por ejemplo, álabes de turbinas de aviación $> 5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$, moldes de alta temperatura $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, toberas de turbinas de gas $> 10^4 \text{ horas} \pm 10^3 \text{ horas}$) en un $50\%\text{-}67\% \pm 5\%$ y reduce los costos de mantenimiento. Por ejemplo, el costo de mantenimiento anual de las palas de turbinas de aviación se reduce en aproximadamente un $35\% \pm 5\%$, el ciclo de reemplazo de moldes de alta temperatura se extiende en un $50\% \pm 5\%$ y la eficiencia operativa de las toberas de las turbinas de gas mejora en aproximadamente un $20\% \pm 3\%$.

(5) Adaptabilidad ambiental y expansión de aplicaciones

El carburo cementado optimizado posee una gran adaptabilidad ambiental, lo que le permite afrontar condiciones de ciclo térmico más complejas. Por ejemplo, en un entorno de alta temperatura con vapor de agua (humedad $> 50\% \pm 5\%$, $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la capa de Cr_2O_3 mantiene la longitud de grieta a $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y la velocidad de deformación a $< 10^{-6} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, lo que resulta adecuado para entornos húmedos y calientes de motores de aviación. En una atmósfera que contiene azufre (SO_2) o con una diferencia de temperatura mayor ($\Delta T 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la longitud de la grieta por fatiga térmica de la muestra optimizada aumenta a $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, pero se puede reducir aún más a $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ mediante recubrimientos multicapa (como $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$, espesor $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), lo que amplía su potencial de aplicación en dispositivos energéticos que contienen azufre y ciclos térmicos extremos. Además, en un entorno de temperatura ultra alta de $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, combinado con nuevos aditivos (como TaC), la velocidad de deformación se puede controlar a $8 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, satisfaciendo las necesidades de la industria aeroespacial de próxima generación.

(6) Casos completos y perspectivas futuras

Tomando WC-10Co ($\text{Cr}_3\text{C}_2 0,5\% \pm 0,01\%$, conductividad térmica $> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) como ejemplo, después de 500 ± 50 choques térmicos a $\Delta T 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longitud de grieta es de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; después de 100 horas de fluencia a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ y $100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, la velocidad de deformación es de $6 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-7} \text{ s}^{-1}$; En la prueba de fatiga térmica a $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longitud de grieta es $< 0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. Estos datos muestran que el carburo cementado optimizado presenta una excelente resistencia a la fatiga térmica y a la fluencia en álabes de turbinas de aviación, moldes de alta temperatura y toberas de turbinas de gas, con una vida útil

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aumentada en un $67 \% \pm 5 \%$, $50 \% \pm 5 \%$ y $67 \% \pm 5 \%$, respectivamente. En el futuro, el rendimiento del carburo cementado optimizado en entornos de temperatura ultraalta ($> 1100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) o con un alto número de ciclos ($> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) se puede mejorar aún más mediante el desarrollo de materiales de gradiente funcional o la introducción de nanorrecubrimientos (como ZrO_2 , espesor $5\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para satisfacer necesidades de ingeniería más exigentes.

(7) Rendimiento dinámico y beneficios económicos

Las pruebas dinámicas muestran que la extensión de la grieta por fatiga térmica se estabiliza después de 500 ± 50 intentos, y la longitud de la grieta aumenta de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ a $0,035\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, lo que indica que el material optimizado presenta una buena durabilidad cíclica. La deformación por fluencia alcanza el estado estacionario después de 100 horas, y la velocidad de deformación se mantiene $< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$, lo que confirma su capacidad de carga a largo plazo. Esta mejora del rendimiento no solo prolonga la vida útil del equipo, sino que también reduce significativamente los costos operativos. Por ejemplo, el costo de mantenimiento anual de las palas de turbinas de aviación se reduce en aproximadamente un $35\% \pm 5\%$, el ciclo de reemplazo de moldes de alta temperatura se extiende en un $50\% \pm 5\%$ y la eficiencia operativa de las toberas de turbinas de gas aumenta en aproximadamente un $20\% \pm 3\%$, lo que refleja el valor económico de la optimización.

El carburo cementado optimizado ofrece un buen rendimiento en entornos cíclicos de alta temperatura. Las formulaciones WC-10Co y WC-8Co presentan una mejor longitud de grieta por fatiga térmica ($0,03\text{-}0,04\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), una mejor tasa de deformación por fluencia ($< 10^{-6}\text{ s}^{-1} \pm 10^{-7}\text{ s}^{-1}$) y una mayor vida útil ($> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$, $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas) que los materiales tradicionales utilizados en álabes de turbinas de aviación, moldes de alta temperatura y toberas de turbinas de gas. Estos casos de aplicación demuestran plenamente que optimizar las propiedades de fatiga térmica y fluencia es una estrategia clave para mejorar la fiabilidad y los beneficios económicos del carburo cementado en aplicaciones de ingeniería de alta temperatura.

8.3 Métodos para optimizar la resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas del carburo cementado

La resistencia a la corrosión (pérdida de peso $< 0,08\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$) y la resistencia a altas temperaturas (dureza $> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) son clave para mejorar la aplicación del carburo cementado en entornos ácidos, de niebla salina y de alta temperatura (como equipos de aviación y energía). Estas mejoras de rendimiento se pueden lograr a través de una variedad de métodos científicos, que incluyen (1) sustitución de la fase aglutinante, (2) introducción de aditivos, (3) tecnología de recubrimiento de superficies y (4) optimización de parámetros de proceso y (5) regulación de la microestructura, que funcionan juntos para satisfacer las necesidades de condiciones de trabajo exigentes. La fase aglutinante de Co tradicional es propensa al ablandamiento (la dureza cae a $\text{HV } 200 \pm 30$) y la oxidación (generando Co_3O_4) a altas temperaturas, lo que resulta en corrosión y degradación del rendimiento. El método de optimización reemplaza el Co con una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fase aglutinante a base de Ni (Ni 8%-12% $\pm$ 1%), que forma una capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), lo que reduce significativamente la corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), lo que mejora la resistencia a la corrosión. La adición de Cr_3C_2 (0,5% $\pm$ 0,01%) inhibe la oxidación mediante la formación de una capa densa de Cr_2O_3 (espesor $\sim 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), y la ganancia de peso se controla a $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Recubrimientos de superficie (como TiN, El Al_2O_3 (espesor $5\text{-}20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) se aísla del oxígeno y de los medios corrosivos mediante deposición física de vapor (PVD) o deposición química de vapor (CVD), lo que mejora aún más la resistencia a la oxidación y al desgaste. Estos métodos de optimización no solo mejoran la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas del carburo cementado, sino que también prolongan significativamente su vida útil en ciclos de alta temperatura y entornos corrosivos.

De la fase de enlace a base de Ni, el efecto antioxidante de la adición de Cr_3C_2 , la protección del recubrimiento superficial y la optimización coordinada del proceso y la microestructura. Combinando parámetros de proceso (sinterización a $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, PVD a $400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), análisis microscópico (XPS, SEM) y casos de ingeniería, se discute sistemáticamente la ruta de optimización y su mecanismo de mejora del rendimiento. Por ejemplo, el WC-10Ni pierde solo $0,05 \text{ mg/cm}^2$ en un entorno de pulverización salina con NaCl al 5% $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, la resistencia a la corrosión mejora aproximadamente un 60% $\pm 5\%$ en comparación con el WC-10Co tradicional. La dureza de la herramienta con Cr_3C_2 añadido y recubierta con TiN se mantiene a $> \text{HV } 1500 \pm 30$ a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, y la vida útil de corte supera las 5000 horas ± 500 horas, lo que es significativamente mejor que las 3000 horas ± 300 horas no optimizadas.

8.3.1 Ventajas de la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en el carburo cementado

8.3.1.1 Principio y descripción técnica de las ventajas de resistencia a la corrosión de la fase de unión de carburo cementado a base de Ni

La fase de unión a base de Ni (contenido de Ni 8%-12% $\pm 1\%$) tiene una excelente estabilidad electroquímica y resistencia a la corrosión, lo que mejora significativamente la resistencia a la corrosión del carburo cementado en entornos hostiles como ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$) y entornos marinos, y tiene ventajas obvias sobre la fase de unión tradicional a base de Co. El potencial de corrosión de Ni ($E_{\text{corr}} \sim 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ frente a SCE) es mayor que el de Co ($E_{\text{corr}} \sim -0,3 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ frente a SCE), y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) se reduce significativamente a $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, que es mejor que el basado en Co $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$. Esta diferencia de rendimiento se debe a la formación de una densa capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, densidad $\sim 6,7 \text{ g/cm}^3$) en un entorno corrosivo. $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), esta capa aísla eficazmente los medios corrosivos (como Cl^- , H^+) mediante su inercia química y bloquea las reacciones electroquímicas (fórmula de reacción: $\text{Ni} + 1/2\text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$, $\Delta G < 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). Por el contrario, la fase de enlace basada en Co genera fácilmente Co_3O_4 suelto (densidad $\sim 6,1 \text{ g/cm}^3$, espesor $> 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) en condiciones similares, y su baja protección provoca un aumento de la velocidad de corrosión de aproximadamente 10 veces. Si bien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mantiene una alta dureza ($HV 1800 \pm 30$) y tenacidad ($K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), el carburo cementado WC a base de Ni ha mejorado la resistencia a la corrosión en aproximadamente un $60\% \pm 5\%$, lo que lo hace particularmente adecuado para campos que requieren alta resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, como componentes de perforación en alta mar, tuberías químicas y equipos de fabricación de papel. Además, el Ni tiene un punto de fusión más alto ($1455 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) que el Co ($1495 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), y su grado de ablandamiento es menor a una temperatura alta de $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (reducción de dureza $< 10\% \pm 2\%$), lo que respalda aún más su potencial para la aplicación en entornos corrosivos de alta temperatura.

8.3.1.2 Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en carburo cementado

La ventaja de la fase de enlace a base de Ni en cuanto a resistencia a la corrosión se debe a sus propiedades electroquímicas y físicas únicas. En medios ácidos (como $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$), el Ni forma una capa de NiO mediante un mecanismo de autopasivación. Esta capa tiene baja solubilidad ($K_{ps} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$) y alta conductividad ($\sigma \sim 10^{-4} \text{ S/cm} \pm 10^{-5} \text{ S/cm}$), lo que inhibe eficazmente la difusión de H^+ y Cl^- , y la corriente de corrosión se reduce de $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ de Co-based a $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. El análisis de espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) muestra que el pico de Ni 2p (aproximadamente $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) indica la presencia de NiO, y su energía de enlace coincide con el pico de O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), verificando la composición química de la capa de pasivación. En un entorno de niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, ISO 9227 NSS 2000 h ± 100 h), el espesor de la capa de NiO se mantiene estable a $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, y la tasa de pérdida de peso es de tan solo $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, en comparación con los $0,12 \text{ mg/cm}^2$ del Co-based $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, lo que supone una disminución de aproximadamente el $58\% \pm 5\%$. Además, el coeficiente de expansión térmica de la fase de unión a base de Ni ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) coincide con el WC ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) mejor que el del Co ($13 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), lo que reduce las microfisuras causadas por el ciclo térmico ($\Delta T 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) y mejora indirectamente la estabilidad de la resistencia a la corrosión.

8.3.1.3 Análisis microscópico y verificación de la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en carburo cementado

de microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) mostraron que la capa de NiO del WC a base de Ni estaba distribuida uniformemente en la superficie, con un espesor estable de $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, y no se observó ningún desprendimiento o agrietamiento obvio, mientras que la superficie del WC a base de Co mostró una capa suelta de Co_3O_4 (espesor $> 0,5 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$) acompañada de microfisuras (ancho $\sim 0,2 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$). El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó la estructura cristalina del NiO (cúbica centrada en las caras, $a = 4,17 \text{ } \text{\AA} \pm 0,01 \text{ } \text{\AA}$), y su intensidad máxima ($2\theta \approx 37,2^\circ, 43,3^\circ$) indica una alta cristalinidad, lo que mejora la protección de la capa de pasivación. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra que el contenido de Ni en el límite de grano es de aproximadamente un $8-10\% \pm 0,5\%$, distribuido uniformemente, lo que confirma su buena unión en la interfaz con el WC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.1.4 Análisis de los factores que afectan la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en el carburo cementado

La resistencia a la corrosión de la fase aglutinante a base de Ni se ve afectada por muchos factores y debe optimizarse integralmente para lograr el mejor rendimiento:

(1) Contenido de Ni

Cuando el contenido de Ni es de $10\% \pm 1\%$, la corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y la tasa de pérdida de peso se controla a $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, y la dureza permanece en $\text{HV } 1800 \pm 30$. Sin embargo, cuando el contenido de Ni supera el $12\% \pm 1\%$, el aumento en la fase de Ni conduce a una mayor tenacidad (K_{IC} aumenta en un $5\% \pm 1\%$), pero la dureza disminuye en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (a $\text{HV } 1620 \pm 30$), y la corriente de corrosión aumenta ligeramente a $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ debido a la ablandamiento intensificado de la fase Ni (dureza $\text{HV } 150 \pm 20$).

(2) Tamaño del grano

El tamaño de grano de WC es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano es alta ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$) y la tasa de pérdida de peso es baja ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), porque los granos finos reducen la trayectoria de penetración del medio corrosivo. Cuando el tamaño del grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite del grano disminuye y la tasa de pérdida de peso aumenta en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$ (a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la profundidad de picaduras aumenta de $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(3) Temperatura de sinterización

Cuando se sinteriza a $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la desviación de la distribución de Ni es $< 0,1\% \pm 0,02\%$, la corriente de corrosión i_{corr} permanece $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y la tasa de pérdida de peso es estable. Si la temperatura de sinterización aumenta a $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, se produce segregación de Ni (desviación $> 0,5\% \pm 0,1\%$) y el enriquecimiento de Ni en los límites de grano hace que la corriente de corrosión aumente en un $15\% \pm 3\%$ (a $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), y la tasa de pérdida de peso aumenta a $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(4) Medio ambiente

En un entorno fuertemente ácido con $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, la capa de NiO se disuelve parcialmente, la corriente de corrosión i_{corr} aumenta aproximadamente un $30\% \pm 5\%$ (a $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la tasa de pérdida de peso aumenta a $0,065 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. En niebla salina con concentración de NaCl $> 5\% \pm 0,1\%$, el aumento de la concentración de Cl^- induce corrosión por picaduras y el área de picaduras aumenta en un $20\% \pm 5\%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ aumentó a $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$), la tasa de pérdida de peso aumentó a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(5) Rugosidad de la superficie

Cuando la rugosidad superficial $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, hay pocos defectos superficiales, la corriente de corrosión i_{corr} permanece en un nivel bajo ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), y la tasa

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de pérdida de peso es $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Si $Ra > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, las microfisuras y picaduras aumentan, la corriente de corrosión aumenta en un $10\% \pm 2\%$ (a $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$), y la profundidad de picaduras aumenta a $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Por ejemplo, una muestra de WC-12Ni tiene segregación de Ni (desviación $0,6\% \pm 0,1\%$) debido a la alta temperatura de sinterización ($1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), y la tasa de pérdida de peso en un entorno de niebla salina NaCl $5\% \pm 0,1\%$ es $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, y la corriente de corrosión i_{corr} es $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. La tasa de pérdida de peso del WC-10Ni optimizado (sinterizado a $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $Ra < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) es solo $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, la resistencia a la corrosión mejoró en aproximadamente un $29\% \pm 5\%$.

8.3.1.5 Optimización del proceso de preparación de la fase aglutinante a base de Ni

Para lograr una pérdida de peso $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y una corriente de corrosión $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, el proceso de preparación del carburo cementado WC a base de Ni debe controlarse con precisión para aprovechar al máximo sus ventajas en cuanto a resistencia a la corrosión. Las estrategias de optimización recomendadas incluyen los siguientes aspectos:

(1) Optimización de ingredientes

polvos de níquel de alta pureza (pureza $> 99,9\% \pm 0,01\%$) y polvo de cianuro de litio (tamaño de partícula: $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), y el contenido de níquel se controla entre el 8% y el $10\% \pm 1\%$. Este rango equilibra la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas. Un contenido de Ni demasiado alto ($> 12\% \pm 1\%$) provocará un aumento de la fase de Ni, una disminución de la dureza de aproximadamente $10\% \pm 2\%$ (hasta $\text{HV } 1620 \pm 30$) y un aumento de la tenacidad de $5\% \pm 1\%$ (K_{IC} aumenta a $12,6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) pero la corriente de corrosión aumenta ligeramente (a $2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); demasiado bajo ($< 8\% \pm 1\%$) conduce a una dureza insuficiente ($< \text{HV } 1600 \pm 30$) y una resistencia a la corrosión reducida ($i_{\text{corr}} > 2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$). Los granos finos de WC ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reducen la penetración de medios corrosivos al aumentar la densidad del límite de grano ($> 10^4 \text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3 \text{ mm}^2/\text{cm}^3$), y la tasa de pérdida de peso se controla a $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(2) Proceso de molienda de bolas

La molienda de bolas húmedas (el medio es etanol anhidro, 40 horas ± 1 hora, relación bola-material $10:1 \pm 0,5$) se utiliza para garantizar una mezcla uniforme de polvos, una desviación de la distribución del tamaño de partícula $< 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reducir microdefectos (como poros, aglomeración), proporcionar una matriz homogénea para la sinterización posterior y reducir indirectamente la sensibilidad a la corrosión.

(3) Sinterización al vacío

A $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, tiempo de mantenimiento $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, densidad alcanzada $99,5\% \pm 0,1\%$, porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Esta temperatura garantiza una distribución uniforme de Ni (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), evitando la segregación ($> 0,5\% \pm 0,1\%$ a $> 1500^\circ\text{C}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, aumento de $i_{\text{corr}} 15\% \pm 3\%$). El entorno de alto vacío reduce la infiltración de oxígeno, previene la formación prematura de NiO o su distribución desigual, y mantiene baja la pérdida de peso.

(4) Posprocesamiento

Se utilizó prensado isostático en caliente (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, 1 hora $\pm 0,1$ hora) para eliminar los poros residuales, mejorar aún más la densidad (la densidad aumentó al $99,7\% \pm 0,1\%$), reducir la trayectoria de penetración de medios corrosivos y reducir la profundidad de picaduras de $3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$ a $< 2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$.

(5) Tratamiento de superficies

La rugosidad superficial (R_a) se controló a menos de $0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ mediante pulido mecánico de precisión, lo que redujo las microfisuras y picaduras superficiales. A continuación, se utilizó una limpieza ultrasónica ($40\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$, $10\text{ min} \pm 1\text{ min}$) para eliminar los contaminantes residuales ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y reducir el área de picaduras en un $20\% \pm 5\%$ (de $0,012\text{ mm}^2 \pm 0,001\text{ mm}^2$ a $0,0096\text{ mm}^2 \pm 0,001\text{ mm}^2$); la corriente de corrosión i_{corr} se mantiene $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$.

(6) Introducción de aditivos

La adición de una pequeña cantidad de Cr_3C_2 ($0,2\% \pm 0,01\%$) mejora aún más la resistencia a la corrosión. El Cr_3C_2 forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $\sim 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) a alta temperatura, que se sinergiza con la capa de NiO para reducir la corriente de corrosión en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (de $10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ a $9 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$), y la tasa de pérdida de peso permanece $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. Cr_3C_2 también refina el tamaño del grano (de $0,6\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ a $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y mejora la resistencia del límite del grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$).

La optimización de estos parámetros del proceso garantiza la unión uniforme de la fase aglutinante a base de Ni y WC, y la resistencia del límite de grano aumenta a $> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$, lo que mejora significativamente la resistencia a la corrosión y la fatiga del material mientras mantiene una alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y tenacidad ($K_{IC} 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

8.3.1.6 Especificación de prueba para la fase de unión a base de Ni del carburo cementado

Las especificaciones de ensayo para las fases de unión a base de níquel del carburo cementado tienen como objetivo evaluar su resistencia a la corrosión y sus propiedades mecánicas. Se recomiendan las siguientes normas:

(1) Prueba de niebla salina

Según la norma ISO 9227 NSS, las condiciones son solución de NaCl al $5\% \pm 0,1\%$, temperatura $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, duración 2000 horas ± 100 horas, medir la pérdida de peso (objetivo $< 0,05\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$) y la profundidad de picaduras (objetivo $< 3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(2) Prueba de inmersión en ácido

en 0,1 M H_2SO_4 (pH $1 \pm 0,1$) durante 100 horas ± 10 horas y pérdida de peso de prueba (objetivo $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) y densidad de corriente de corrosión (i_{corr} , objetivo $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

(3) Pruebas electroquímicas

Se utilizó un sistema de tres electrodos (electrodo de trabajo: WC a base de Ni, electrodo de referencia: electrodo de calomelanos saturado, electrodo auxiliar: electrodo de platino) para medir el potencial de corrosión (E_{corr} , objetivo $\sim 0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ frente a SCE) y las curvas de polarización a una velocidad de escaneo de $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$.

la fase de unión a base de Ni de carburo cementado

(1) Prueba de dureza

Según ISO 3878, utilizando un probador de dureza Vickers, carga $30 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$, temperatura de prueba $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, dureza objetivo $> \text{HV } 1800 \pm 30$.

(2) Prueba de tenacidad a la fractura

De acuerdo con la norma ASTM E399, utilizando el método de viga con entalla de un solo borde (SENB), temperatura de prueba $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, objetivo $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

(3) Prueba de rendimiento a alta temperatura

La resistencia a la flexión se probó a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ utilizando el método de flexión de tres puntos según ISO 178 (objetivo $> 2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

8.3.1.8 Análisis microscópico de la fase de enlace a base de Ni en carburo cementado

Observación SEM

Resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, análisis del espesor de la capa de NiO (objetivo $10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) y defectos superficiales.

Análisis XPS

Se probó el pico Ni 2p (objetivo $854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) para confirmar la formación de NiO.

Análisis EDS

Mida la distribución de Ni en los límites del grano (objetivo $8\%-10\% \pm 0,5\%$).

La prueba debe realizarse en condiciones de laboratorio estándar, con un tamaño de muestra de $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y repetirse ≥ 3 veces para garantizar la confiabilidad de los datos.

8.3.1.9 Aplicaciones de ingeniería de la fase aglutinante de carburo cementado a base de Ni

Gracias a su excelente resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas, la fase de unión de carburo cementado a base de Ni ha demostrado ventajas significativas en aplicaciones de ingeniería

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en diversos entornos corrosivos y de alta temperatura. A continuación, se presentan sus principales áreas de aplicación y rendimiento, junto con casos y datos reales:

(1) Ingeniería marina

cm²) en niebla salina (NaCl 5% ± 0,1%) y agua de mar, ± 0,01 mg/cm²) y alta resistencia a la corrosión (corriente de corrosión $i_{corr} < 10^{-6}$ A/cm² ± 10^{-7} A/cm²), se utiliza ampliamente en estabilizadores de perforación en aguas profundas y herramientas de corte. En la perforación en aguas profundas, la vida útil de los estabilizadores hechos de WC-10Ni supera los 3 años ± 0,3 años, lo que es aproximadamente un 100% ± 5% más alto que el del WC-10Co tradicional (1,5 años ± 0,2 años), y el costo de mantenimiento causado por la corrosión se reduce en aproximadamente un 40% ± 5%. Su elevada dureza (HV 1800 ± 30) y tenacidad ($K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) garantizan una eficiencia de corte bajo alta presión (> 20 MPa ± 2 MPa) y alta temperatura (> 500°C ± 10°C).

(2) Tuberías y equipos químicos

En un entorno ácido (pH < 2 ± 0,1, como 0,1 M H₂SO₄), la tasa de pérdida de peso del carburo cementado WC a base de Ni es de solo 0,06 mg/cm² debido a la protección de su capa de pasivación de NiO (espesor ~10 nm ± 1 nm). ± 0,01 mg/cm², mejor que el acero inoxidable (tasa de pérdida de peso ~0,1 mg/cm² ± 0,01 mg/cm²). Se utiliza para recubrimientos resistentes a la corrosión para válvulas y bombas de tuberías químicas, con una vida útil de > 2 años ± 0,2 años, que es aproximadamente un 100% ± 5% más larga que los materiales tradicionales (como el acero inoxidable 304, vida útil ~1 año ± 0,1 año). En reactores químicos que contienen cloruros (como HCl), WC-10Ni mantiene la resistencia a las picaduras (profundidad de picaduras < 3 μm ± 0,5 μm), lo que reduce el riesgo de fugas en el equipo.

(3) Industria papelera

Los equipos de fabricación de papel (como rodillos y cuchillas de molienda) están expuestos a entornos con contenido de cloruro (NaCl > 5% ± 0,1%) y altas temperaturas (> 400 °C ± 10 °C). El carburo cementado WC a base de Ni es una opción ideal debido a su baja corriente de corrosión ($i_{corr} < 10^{-6}$ A/cm² ± 10^{-7} A/cm²) y alta resistencia al desgaste (dureza > HV 1800 ± 30). La pérdida de peso de los rodillos de molienda hechos de WC-10Ni es de solo 0,05 mg/cm² después de 5000 h ± 500 h de funcionamiento continuo. ± 0,01 mg/cm², profundidad de desgaste superficial < 10 μm ± 1 μm, en comparación con WC-10Co (tasa de pérdida de peso 0,12 mg/cm² ± 0,01 mg/cm², profundidad de desgaste 20 μm ± 2 μm) mejora la durabilidad en aproximadamente un 50% ± 5%, reduciendo la frecuencia de reemplazo y los costos de producción.

(4) Equipos de aviación y energía

En componentes de motores aeroespaciales (como álabes de turbinas) y toberas de turbinas de gas, el carburo cementado WC a base de Ni (como WC-10Ni con Cr₃C₂ 0,2% ± 0,01%) tiene una longitud de grieta por fatiga térmica de < 0,04 mm ± 0,01 mm y una tasa de pérdida de peso de < 0,25 mg/cm² en condiciones de 900 °C ± 10 °C y ciclado térmico (ΔT 500 °C ± 10 °C). ± 0,05 mg/cm², vida útil > 5000 horas ± 500 horas, mejor que las 3000 horas ± 300 horas no optimizadas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Su alta estabilidad térmica (dureza $> HV\ 1600 \pm 30$) y resistencia a la oxidación hacen que tenga un buen desempeño en ambientes corrosivos de alta temperatura (como atmósferas de SO_2), reduciendo la tasa de fallas causadas por agrietamiento térmico en aproximadamente un $45\% \pm 5\%$.

carburo cementado a base de Ni

La ventaja de la aplicación de ingeniería del carburo cementado WC a base de Ni reside en su rendimiento integral: resistencia a la corrosión mejorada en un $60\% \pm 5\%$, alta dureza ($HV\ 1800 \pm 30$) y tenacidad ($K_{Ic}\ 12\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5\ MPa \cdot m^{1/2}$), y estabilidad a $1000\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$. Estas características lo convierten en un sustituto potencial de los materiales tradicionales a base de Co y del acero inoxidable en entornos extremos (como alta presión en aguas profundas, industria química ácida y aviación de alta temperatura). En presencia de vapor de agua (humedad $> 50\% \pm 5\%$) o gradientes de temperatura superiores ($\Delta T\ 600\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$), la combinación de recubrimientos multicapa (por ejemplo, TiN / Al_2O_3 , espesor $5-20\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) puede mejorar aún más el rendimiento y extenderse a aplicaciones de temperatura ultra alta ($> 1100\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$) o alto número de ciclos ($> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces), como dispositivos de energía de próxima generación.

Beneficios económicos y ambientales

El uso de WC a base de Ni reduce significativamente los costos de mantenimiento. Por ejemplo, el costo anual de mantenimiento de los componentes de perforación offshore se reduce en un $40\% \pm 5\%$, y la eficiencia de los componentes de aviación aumenta en un $20\% \pm 3\%$. Sin embargo, el Ni es relativamente caro (aproximadamente 1,5-2 veces más caro que el Co), y los costos deben controlarse optimizando el contenido de Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) y los procesos (como el postratamiento HIP). En términos ambientales, su durabilidad reduce la cantidad de desperdicio de material, lo que cumple con los requisitos del desarrollo sostenible.

El carburo cementado WC a base de níquel ofrece un excelente rendimiento en ingeniería naval, tuberías químicas, industria papelera y equipos de energía aeronáutica, con una tasa de pérdida de peso de $< 0,06\ mg/cm^2 \pm 0,01\ mg/cm^2$ y una vida útil entre un 50% y un $100\% \pm 5\%$ más larga. Su resistencia a la corrosión y estabilidad a altas temperaturas cumplen con diversos requisitos de ingeniería, y su aplicación se puede ampliar mediante recubrimientos y aleaciones en el futuro.

8.3.2 Introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.2.1 Principio y descripción técnica de la introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

Los aditivos de carburo cementado Cr_3C_2 mejoran significativamente la resistencia a la oxidación y a altas temperaturas del carburo cementado, especialmente en entornos corrosivos (como atmósferas con oxígeno o cloruro) y a altas temperaturas ($1000\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$). La cantidad recomendada es de $0,2\% \pm 0,5\% \pm 0,01\%$. El Cr_3C_2 reacciona con el oxígeno a alta temperatura para formar una densa capa protectora de Cr_2O_3 (espesor $\sim 0,1-0,2\ \mu m \pm 0,05\ \mu m$, densidad $\sim 5,2\ g/cm^3 \pm 0,1\ g/cm^3$), aísla

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficazmente el oxígeno y los medios corrosivos y controla la ganancia de peso a $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, mejor que los $0,5 \text{ mg/cm}^2$ de las muestras sin adiciones $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Esta capa protectora reduce la tasa de oxidación (de $0,4 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ a $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$) y actúa sinérgicamente con la capa de NiO de la fase de unión a base de Ni para reducir aún más la corriente de corrosión (i_{corr} de $10^{-6} \text{ Cr}_3\text{C}_2$ también mejora la resistencia del límite de grano ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) refinando los granos de WC (de $0,6 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), al tiempo que mantiene la dureza ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta temperatura y alta carga, como álabes de turbinas de aviación y toberas de turbinas de gas. Además, la alta estabilidad térmica del Cr_3C_2 (punto de fusión $1890^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) lo hace menos blando que la base de Co a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (disminución de dureza $< 5\% \pm 1\%$), lo que aumenta la durabilidad a largo plazo del material.

8.3.2.2 Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión y a la oxidación de los aditivos de carburo cementado Cr_3C_2

Los aditivos de Cr_3C_2 se obtienen mediante su reacción química y la regulación de su microestructura. En un entorno oxidante a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, el Cr_3C_2 reacciona ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8\text{CO}$, $\Delta G < -1000 \text{ kJ/mol} \pm 50 \text{ kJ/mol}$) para formar una capa de Cr_2O_3 , cuyo bajo coeficiente de difusión de oxígeno ($\text{D}_{\text{O}_2} \approx 10^{-94} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-95} \text{ cm}^2/\text{s}$) bloquea eficazmente la penetración de oxígeno, y la ganancia de peso se reduce de $0,5 \text{ mg/cm}^2$ a $1,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ hasta $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, la resistencia a la oxidación mejora en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$. En un medio ácido (como $0,1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, $\text{pH } 1 \pm 0,1$) o niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), la capa de Cr_2O_3 y NiO Las dos capas juntas forman una estructura de doble protección, la corriente de corrosión i_{corr} se reduce a $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, y la tasa de pérdida de peso se mantiene a $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, en comparación con $0,07 \text{ mg/cm}^2$ sin aditivo $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ se reduce en aproximadamente un $29\% \pm 5\%$. Además, Cr_3C_2 refina los granos y fortalece la unión de los límites de grano, reduce el crecimiento de grietas por fatiga térmica (de $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ a $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y tiene un alto grado de coincidencia de coeficiente de expansión térmica ($10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) con WC, reduciendo la concentración de tensión causada por el ciclo térmico (ΔT $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

8.3.2.3 Análisis microscópico y verificación de la introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que después de agregar Cr_3C_2 , la capa de Cr_2O_3 se distribuyó uniformemente en la superficie, con un espesor estable a $0,1-0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$, sin descamación o grietas obvias, mientras que aparecieron agujeros de oxidación (diámetro $\sim 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en la superficie de la muestra sin adición. El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó la estructura cristalina hexagonal de Cr_2O_3 ($a = 4,96 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$, $c = 13,58 \text{ \AA} \pm 0,01 \text{ \AA}$). La intensidad máxima ($2\theta \approx 33,6^\circ, 36,2^\circ$) indica una alta cristalinidad, lo que mejora la estabilidad de la capa protectora. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que el contenido de Cr en el límite de grano es de aproximadamente $0,5-1\% \pm 0,1\%$, distribuido uniformemente, lo que confirma su buena unión en la interfaz con las fases de WC y Ni. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detectó el pico Cr 2p (aproximadamente $576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), que coincide con el pico O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), lo que confirma la formación de Cr_2O_3 .

8.3.2.4 Análisis de los factores que afectan el rendimiento de los aditivos de carburo cementado Cr_3C_2

La cantidad de aditivos de carburo cementado Cr_3C_2 se ve afectada por muchos factores y debe controlarse con precisión:

(1) Importe adicional

Cuando el contenido de Cr_3C_2 es de $0,2\% \pm 0,01\%$, el aumento de peso es $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. i_{corr} disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (hasta $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). Si el contenido supera el $0,5\% \pm 0,01\%$, puede formarse la fase η (fase compuesta WC-Cr-Co), la dureza disminuye aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (hasta $\text{HV } 1425 \pm 30$) y la tenacidad aumenta un $3\% \pm 1\%$ (K_{IC} aumenta hasta $12,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), pero i_{corr} aumenta hasta $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(2) Tamaño del grano

El tamaño de grano de WC es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 se distribuye uniformemente y la tasa de pérdida de peso es baja ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$). Si el tamaño de grano aumenta a $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la capa de Cr_2O_3 es discontinua y la tasa de pérdida de peso aumenta en un $15\% \pm 3\%$ ($0,055 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), la profundidad de picaduras aumentó de $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(3) Temperatura de sinterización

Cuando se sinteriza a $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr_3C_2 Solución sólida uniforme, ganancia de peso $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Si la temperatura aumenta a $> 1550^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr se volatiliza (pérdida $> 0,1\% \pm 0,02\%$), el espesor de la capa de Cr_2O_3 disminuye ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), y i_{corr} aumenta en un $10\% \pm 2\%$ ($1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

(4) Medio ambiente

En un ácido fuerte con $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, la capa de Cr_2O_3 se disolvió parcialmente, i_{corr} aumentó un $20\% \pm 3\%$ ($1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la tasa de pérdida de peso aumentó a $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. En una niebla salina con $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$, el Cl^- acelera la corrosión por Cr_2O_3 y el área de picaduras aumenta un $15\% \pm 3\%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ a $0,0115 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Rugosidad de la superficie

$R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la capa de Cr_2O_3 está intacta y i_{corr} permanece baja ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10^{-7} A/cm^2) . Si $R_a > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, los defectos superficiales aumentan, i_{corr} aumenta en un $8\% \pm 2\%$ (a $1,08 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la profundidad de picaduras aumenta a $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Por ejemplo, una muestra de WC-10Ni-0,6%Cr₃C₂ tuvo una tasa de pérdida de peso de $0,08 \text{ mg/cm}^2$ en niebla salina debido a la volatilización de Cr causada por la alta temperatura de sinterización ($1550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$). $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} aumentó a $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. La tasa de pérdida de peso del WC-10Ni-0,2%Cr₃ C₂ optimizado ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) fue de tan solo $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la capacidad antioxidante aumentó en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$.

8.3.2.5 Optimización del proceso de preparación de aditivos de carburo cementado Cr₃C₂

Para lograr una ganancia de masa $< 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ e $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, es necesario optimizar la introducción de aditivos Cr₃C₂ en coordinación con el proceso de preparación. Las estrategias recomendadas incluyen:

(1) Optimización de ingredientes

Se selecciona polvo de Cr₃C₂ de alta pureza (pureza $> 99,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de partícula $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y se mezcla con WC (tamaño de partícula $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y polvo de Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$). El contenido de Cr₃C₂ se controla entre $0,2\% \text{ y } 0,5\% \pm 0,01\%$. Un contenido excesivo ($> 0,5\% \pm 0,01\%$) puede inducir la fase η y reducir la dureza en un $5\% \pm 1\%$, mientras que un contenido demasiado bajo ($< 0,2\% \pm 0,01\%$) tiene un efecto antioxidante insuficiente (aumento de peso $> 0,4 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(2) Proceso de molienda de bolas

Se utilizó molienda de bolas húmedas (medio: etanol anhidro, $40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, relación bola-material: $10:1 \pm 0,5$) para asegurar una dispersión uniforme de Cr₃C₂, con una desviación en la distribución del tamaño de partícula de $< 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reducir la aglomeración ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y proporcionar una matriz homogénea para la formación de la capa de Cr₂O₃.

(3) Sinterización al vacío

Sinterización a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, tiempo de mantenimiento $1 \text{ hora} \pm 0,1 \text{ hora}$, densidad alcanza $99,5\% \pm 0,1\%$, porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Esta temperatura asegura que la solución sólida de Cr₃C₂ forme una capa uniforme de Cr₂O₃. A $> 1550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, el Cr se volatiliza, resultando en una capa protectora incompleta (espesor $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$).

(4) Posprocesamiento

Se utilizó prensado isostático en caliente (HIP, $1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, $1 \text{ hora} \pm 0,1 \text{ hora}$) para eliminar la porosidad residual, aumentar la densidad al $99,7\% \pm 0,1\%$, reducir la penetración de medios oxidantes y aumentar el espesor de la capa de Cr₂O₃ a $0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Tratamiento de superficies

El Ra se controló a $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mediante pulido de precisión, y los óxidos de la superficie ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) se eliminaron mediante limpieza ultrasónica ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$, $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$), y el área de picaduras se redujo en un $15 \% \pm 3 \%$ (de $0,011 \text{ mm}^2$ a $0,01 \text{ mm}^2$) $\pm 0,001 \text{ mm}^2$ hasta $0,00935 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$), i_{corr} permanece $< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$.

(6) Optimización de la dispersión aditiva

Se utilizó aleación mecánica (MA, $200 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, $10 \text{ h} \pm 0,5 \text{ h}$) para mejorar la unión interfacial entre las fases Cr_3C_2 y WC/Ni, reducir la segregación ($< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) y mejorar la uniformidad de la capa Cr_2O_3 .

Estos procesos garantizan una distribución uniforme de Cr_3C_2 , una resistencia del límite de grano $> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ y una dureza mantenida ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

8.3.2.6 Caso de ingeniería aditiva de carburo cementado Cr_3C_2 y comparación de rendimiento

Tomando WC-10Ni-0,2% Cr_3C_2 y WC - 10Ni como ejemplos, después de la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ durante $100 \text{ horas} \pm 10 \text{ horas}$, el aumento de masa de la muestra con Cr_3C_2 añadido es de solo $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, en comparación con $0,5 \text{ mg/cm}^2$ sin adición $\pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$ y $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, y la resistencia a la oxidación mejora en un $50\% \pm 5\%$. En la prueba de niebla salina ($\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$, $2000 \text{ h} \pm 100 \text{ h}$), la tasa de pérdida de peso se reduce a $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de picaduras $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, mejor que $0,07 \text{ mg/cm}^2$ sin adición $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ y $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. En aplicaciones de álabes de turbinas de aviación, WC - 10Ni-0,2% Cr_3C_2 tiene una vida útil de $> 6000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$, que es un $20\% \pm 5\%$ más larga que $5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$ sin adición y reduce la tasa de fallos causada por grietas en caliente en aproximadamente un $30\% \pm 5\%$.

8.3.2.7 Expansión de la aplicación y limitaciones de los aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

Las adiciones de Cr_3C_2 hacen que el carburo cementado sea excelente en entornos oxidantes a alta temperatura (p. ej., $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y corrosivos, adecuado para toberas de turbinas de gas (vida útil $> 10^4 \text{ horas} \pm 10^3 \text{ horas}$) y moldes de alta temperatura (ciclos $> 10^5 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$). En atmósferas que contienen SO_2 , la capa de Cr_2O_3 permanece protectora (ganancia de peso $< 0,35 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), pero en ácidos fuertes con $\text{pH} < 1 \pm 0,1$, la tasa de disolución aumenta en un $15\% \pm 3\%$ y debe optimizarse en combinación con un recubrimiento de TiN (espesor $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). El Cr_3C_2 es más caro (aproximadamente 2-3 veces más que el WC) y la cantidad agregada debe controlarse ($0,2\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$) para equilibrar el rendimiento y la economía.

8.3.2.8 Dirección de optimización y perspectivas futuras de introducir aditivos Cr_3C_2 en el carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para mejorar el efecto Cr_3C_2 , se puede agregar TaC ($0,1\% \pm 0,01\%$) para mejorar la estabilidad térmica de la capa de Cr_2O_3 , y i_{corr} se reduce a $5 \times 10^{-7} \text{A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{A/cm}^2$. En temperaturas ultra altas ($> 1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), combinado con un recubrimiento de Al_2O_3 (espesor $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), la ganancia de peso se puede controlar a $0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, dureza $> \text{HV } 1600 \pm 30$. En el futuro, el desarrollo de nano- Cr_3C_2 (tamaño de partícula $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) o aditivos compuestos de Cr-Ni puede mejorar aún más la resistencia a la oxidación y la economía y expandirse a aplicaciones de equipos de energía extrema.

aditivos Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) reduce significativamente la ganancia de masa ($< 0,3\text{ mg/cm}^2$) mediante la formación de una capa de Cr_2O_3 (espesor $0,1\text{-}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$). $\pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) y la corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$), la resistencia a la oxidación mejoró en un $40\% \pm 5\%$, manteniendo la dureza ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Optimizar el proceso de preparación (optimización de la composición Cr_3C_2 $0,2\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$, molienda de bolas 40 horas ± 1 hora, sinterización $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, postratamiento HIP, pulido superficial $R_a < 0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) para garantizar un rendimiento estable. Factores como la cantidad de adición, el tamaño del grano, la temperatura de sinterización, el entorno y la rugosidad superficial deben controlarse exhaustivamente. Es adecuado para entornos corrosivos y de alta temperatura. En el futuro, su aplicación podrá ampliarse mediante adiciones y recubrimientos de compuestos.

8.3.3 Protección del recubrimiento de superficies de aleación dura

8.3.3.1 Descripción general del principio de protección y la tecnología del recubrimiento de superficies de carburo cementado

La tecnología de protección de superficies con recubrimiento mejora significativamente la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado, especialmente en entornos corrosivos y de alta temperatura ($1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) (como ácidos o niebla salina). Los recubrimientos recomendados incluyen TiN y Al_2O_3 , con un espesor de $5\text{-}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, obtenidos mediante deposición física de vapor (PVD, $400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) o deposición química de vapor (CVD, $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$). Recubrimiento de TiN (dureza $> \text{HV } 2000 \pm 50$, densidad $\sim 5,4\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$) con excelente resistencia al desgaste y a la oxidación, ganancia de masa $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, la corriente de corrosión (i_{corr}) se reduce a $< 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$. El recubrimiento de Al_2O_3 (punto de fusión $2072\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, conductividad térmica $\sim 30\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2\text{ W/m}\cdot\text{K}$) aísla el oxígeno y los medios corrosivos formando una capa de óxido densa (espesor $\sim 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) y la tasa de pérdida de peso se mantiene a $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, mejor que $0,07\text{ mg/cm}^2$ de muestras sin recubrimiento $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. Estos recubrimientos funcionan sinérgicamente con fases aglutinantes a base de Ni o aditivos Cr_3C_2 para mantener la dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que los hace ampliamente utilizados en álabes de turbinas aeroespaciales, equipos químicos y herramientas marinas. Además, la alta estabilidad térmica de los recubrimientos (TiN hasta $800\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, Al_2O_3 hasta $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) reduce la degradación del rendimiento causada por el ciclo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

térmico (ΔT 500 °C $\pm$ 10 °C).

8.3.3.2 Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión y a la oxidación del recubrimiento de superficie de carburo cementado

El efecto protector del recubrimiento superficial se debe a su barrera física e inercia química. En un entorno oxidante a 1000 °C $\pm$ 10 °C, el recubrimiento de Al_2O_3 forma una densa capa de óxido mediante reacción ($4Al + 3O_2 \rightarrow 2Al_2O_3$, $\Delta G < -1500$ kJ/mol $\pm$ 50 kJ/mol), y su bajo coeficiente de difusión de oxígeno ($D_{O_2} \approx 10^{-15}$ cm²/s $\pm$ 10^{-16} cm²/s) controla la ganancia de masa a $< 0,2$ mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², y la resistencia a la oxidación mejora en aproximadamente un 60 % $\pm$ 5 %. El recubrimiento de TiN reduce el desgaste de la superficie y la propagación de microfisuras (de 0,05 mm $\pm$ 0,01 mm a $< 0,02$ mm $\pm$ 0,01 mm) gracias a una alta dureza ($> HV$ 2000 $\pm$ 50) y un bajo coeficiente de fricción ($\sim 0,4 \pm 0,05$). En medios ácidos (como 0,1 M H_2SO_4 , pH 1 $\pm$ 0,1) o niebla salina (NaCl 5% $\pm$ 0,1%), el recubrimiento aísla Cl^- y H^+ , i_{corr} se reduce a 8×10^{-7} A/cm² $\pm$ 10^{-8} A/cm² y la tasa de pérdida de peso se reduce a 0,04 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm², en comparación con 0,07 mg/cm² sin recubrimiento $\pm$ 0,01 mg/cm², una reducción de aproximadamente el 43% $\pm$ 5%. El coeficiente de expansión térmica del recubrimiento coincide con el del sustrato (TiN 9×10^{-6} K⁻¹, Al_2O_3 8×10^{-6} K⁻¹, WC $5,2 \times 10^{-6}$ K⁻¹), reduciendo la tensión térmica (< 300 MPa $\pm$ 50 MPa) y mejorando la resistencia a la fatiga térmica.

8.3.3.3 Análisis microscópico y verificación del recubrimiento superficial de carburo cementado

mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1$ $\mu m \pm 0,01$ μm) mostraron que los recubrimientos de TiN y Al_2O_3 tenían superficies lisas y un espesor uniforme (5-20 $\mu m \pm 0,1$ μm), sin descamación ni grietas evidentes, mientras que aparecieron manchas de oxidación (diámetro $\sim 0,4$ $\mu m \pm 0,01$ μm) en la superficie de la muestra sin recubrimiento. El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó la estructura cristalina cúbica de TiN ($a = 4,24$ Å $\pm 0,01$ Å, $2\theta \approx 36,7^\circ, 42,6^\circ$) y la estructura hexagonal de Al_2O_3 ($a = 4,76$ Å $\pm 0,01$ Å, $c = 12,99$ Å $\pm 0,01$ Å, $2\theta \approx 35,1^\circ, 43,3^\circ$), y la intensidad del pico indica alta cristalinidad. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) muestra que el contenido de Ti o Al en el recubrimiento es $> 95\% \pm 1\%$, y está bien integrado con WC/Ni en la interfaz (espesor de la capa de difusión $\sim 0,1$ $\mu m \pm 0,05$ μm). La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detecta el pico de Ti 2p (aproximadamente 455 eV $\pm 0,1$ eV) o el pico de Al 2p (74 eV $\pm 0,1$ eV), que coincide con el pico de O 1s (530 eV $\pm 0,1$ eV), verificando la formación de la capa de óxido.

8.3.3.4 Análisis de los factores que afectan el recubrimiento de la superficie de carburo cementado

El efecto de protección del recubrimiento de la superficie se ve afectado por muchos factores y debe controlarse con precisión:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) Espesor del recubrimiento

El espesor es de $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ y pérdida de peso $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Si el espesor es $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la tensión interna aumenta ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), el riesgo de desconchado aumenta en un $10\% \pm 2\%$ y i_{corr} aumenta a $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(2) Tipo de recubrimiento

de TiN funcionan bien a $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (aumento de peso $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), pero la oxidación aumenta a $> 900 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (aumento de peso $> 0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$). Los recubrimientos de Al_2O_3 son estables a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (aumento de peso $< 0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), pero la resistencia al desgaste es ligeramente inferior a la de TiN (la dureza disminuye un $5\% \pm 1\%$).

(3) Temperatura de deposición

PVD $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ garantiza la adhesión del recubrimiento de TiN ($> 50 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$); si $> 500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, agrietamiento por tensión térmica (ancho $\sim 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). CVD $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ es adecuado para Al_2O_3 , pero se debe optimizar el ablandamiento de la matriz (reducción de la dureza del $10\% \pm 2\%$).

(4) Medio ambiente

Cuando $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, la tasa de disolución del recubrimiento de TiN aumenta en un $15\% \pm 3\%$ (i_{corr} a $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), y Al_2O_3 es estable ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). En $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$ de niebla salina, el área de picaduras aumenta en un $10\% \pm 2\%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ a $0,011 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Rugosidad de la superficie

una alta adhesión del recubrimiento ($> 60 \text{ N/mm}^2$) y un $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m} \pm 5 \text{ N/mm}^2$, el i_{corr} es bajo. Si $\text{Ra} > 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, los defectos aumentan y el i_{corr} aumenta un $7\% \pm 2\%$ (hasta $8,6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$).

Por ejemplo, una muestra de WC-10Ni recubierta con Al_2O_3 (20 El recubrimiento de TiN optimizado ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, CVD $1050 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) presenta una alta tensión interna, una tasa de desprendimiento del $15\% \pm 2\%$ y una tasa de pérdida de peso de $0,06 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. La tasa de pérdida de peso del recubrimiento de TiN optimizado ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, PVD $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{Ra} < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) es de tan solo $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la resistencia a la corrosión mejoró en aproximadamente un $57\% \pm 5\%$.

8.3.3.6 Optimización del proceso de preparación para la protección de superficies con recubrimiento de carburo cementado

Para lograr una pérdida de peso $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ e $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, el proceso de recubrimiento de superficies debe controlarse con precisión. Las estrategias recomendadas incluyen:

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

(1) Pretratamiento del sustrato

La rugosidad de la superficie (Ra) de WC-10Ni se controló a $0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mediante pulido y se utilizó limpieza ultrasónica ($40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$, $10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$) para eliminar contaminantes ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y mejorar la adhesión del revestimiento ($> 60 \text{ N/mm}^2$) $\pm 5 \text{ N/mm}^2$).

(2) Selección y espesor del recubrimiento

Elija TiN (espesor $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) o Al_2O_3 (espesor $10-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). TiN utiliza PVD ($400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, voltaje de polarización $-100 \text{ V} \pm 10 \text{ V}$, velocidad de deposición $0,5 \mu\text{m/h} \pm 0,1 \mu\text{m/h}$), Al_2O_3 utiliza CVD ($1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, presión $10 \text{ kPa} \pm 1 \text{ kPa}$, velocidad de deposición $0,3 \mu\text{m/h} \pm 0,1 \mu\text{m/h}$) para evitar la tensión interna causada por un espesor excesivo ($> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

(3) Optimización del proceso de deposición

En PVD, la relación de flujo Ar/N₂ ($1:1 \pm 0,1$) se controla para garantizar la pureza de la fase TiN ($> 98 \% \pm 1 \%$). En CVD, se añade H₂ ($5 \% \pm 0,5 \%$) para mejorar la densidad de Al_2O_3 (porosidad $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$) y reducir la difusión de oxígeno.

(4) Posprocesamiento

El recocido a baja temperatura ($500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, 2 horas $\pm 0,1$ horas) se utiliza para liberar la tensión residual ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) y mejorar la unión entre el revestimiento y el sustrato (resistencia al corte de la interfaz $> 50 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$).

(5) Recubrimiento multicapa

Combinando una estructura de doble capa de TiN ($5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) + Al_2O_3 ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), TiN proporciona resistencia al desgaste, Al_2O_3 mejora la resistencia a la oxidación, i_{corr} cae a $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ y la tasa de pérdida de peso es $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(6) Acabado de superficies

Se utilizó el pulido con haz de iones (energía $500 \text{ eV} \pm 50 \text{ eV}$) para optimizar Ra a $0,03 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reducir las microfisuras y reducir el área de picaduras en un $10 \% \pm 2 \%$ (de $0,011 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ a $0,0099 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

Estos procesos aseguran un recubrimiento homogéneo con una adherencia de $> 60 \text{ N/mm}^2 \pm 5 \text{ N/mm}^2$, manteniendo la dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

8.3.3.7 Casos de ingeniería de recubrimientos de superficies de carburo cementado y comparación de rendimiento

Tomando WC-10Ni-TiN ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y WC-10Ni sin recubrimiento como ejemplos, después de la oxidación a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ durante 100 horas ± 10 horas, la muestra con recubrimiento de TiN ganó $0,15 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, en comparación con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,5 mg/cm² para sin recubrimiento $\pm 0,05$ mg/cm² y $1,1 \times 10^{-6}$ A/cm² $\pm 10^{-7}$ A/cm², y la resistencia a la oxidación mejora en un 70 % ± 5 %. En la prueba de niebla salina (NaCl 5% $\pm 0,1$ %, 2000 h ± 100 h), la tasa de pérdida de peso se reduce a 0,03 mg/cm² $\pm 0,01$ mg/cm², profundidad de picaduras $< 1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, mejor que 0,07 mg/cm² para sin recubrimiento $\pm 0,01$ mg/cm² y $3,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. En álabes de turbinas de aviación, la vida útil de las muestras recubiertas de TiN es > 7000 horas ± 500 horas, que es un 40% $\pm 5\%$ más larga que las 5000 horas ± 500 horas sin recubrimiento, y la tasa de falla por grietas térmicas se reduce en aproximadamente un 35% $\pm 5\%$.

8.3.3.8 Extensión de la aplicación y limitaciones de los recubrimientos superficiales de carburo cementado

El recubrimiento de la superficie hace que el carburo cementado tenga un buen rendimiento en la oxidación a alta temperatura (como 1100 °C ± 10 °C) y entornos corrosivos, adecuado para toberas de turbinas de gas (vida útil $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas) y brocas de perforación en aguas profundas (resistencia a la presión > 30 MPa ± 2 MPa). En la atmósfera, los recubrimientos de Al₂O₃ siguen siendo protectores (aumento de peso $< 0,2$ mg/cm² $\pm 0,05$ mg/cm²), pero la tasa de disolución de TiN en ácido fuerte con pH $< 1 \pm 0,1$ aumenta en un 20 % ± 3 % y debe optimizarse en combinación con Al₂O₃. El costo del proceso de recubrimiento es relativamente alto (aproximadamente 2-3 veces el del sustrato) y la economía debe controlarse mediante un diseño de capa fina ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

8.3.3.9 Dirección de optimización y perspectivas futuras del recubrimiento de superficies de carburo cementado

Para mejorar el efecto del recubrimiento, se puede desarrollar un recubrimiento de gradiente de TiN / Al₂O₃ (espesor $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y i_{corr} se reduce a 6×10^{-7} A/cm² $\pm 10^{-8}$ A/cm². A temperaturas ultra altas (> 1200 °C ± 10 °C), se agrega ZrO₂ (5 % $\pm 0,5$ %) para mejorar la estabilidad térmica, con una ganancia de peso de $< 0,15$ mg/cm² $\pm 0,05$ mg/cm², dureza $> \text{HV } 1900 \pm 30$. En el futuro, se puede utilizar la pulverización de plasma (temperatura de 800 °C ± 10 °C) o el nanorrecubrimiento (tamaño de partícula $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para mejorar la adhesión y la durabilidad y expandirse a aplicaciones extremas de equipos de aviación y energía.

Los recubrimientos superficiales (p. ej. TiN $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Al₂O₃ $10-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) reducen significativamente la pérdida de peso ($< 0,04$ mg/cm²) al formar una capa protectora (espesor $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) $\pm 0,01$ mg/cm² y la corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}$ A/cm² $\pm 10^{-8}$ A/cm²), la resistencia a la oxidación aumenta en un 60 % ± 5 %, la dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{\text{Ic}} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Optimice el proceso de preparación (pretratamiento del sustrato Ra $< 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, deposición PVD/CVD, recocido a baja temperatura, diseño multicapa) para garantizar un rendimiento estable. Es necesario controlar exhaustivamente el espesor, el tipo, la temperatura de deposición, el entorno y la rugosidad superficial del recubrimiento. Es adecuado para entornos corrosivos y de alta temperatura. En el futuro, se podrán utilizar el recubrimiento en gradiente y la nanotecnología para ampliar aún más sus aplicaciones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.4 Optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.3.4.1 Descripción general de los principios y tecnologías de optimización de parámetros de proceso para la resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas del carburo cementado

La optimización de los parámetros del proceso es clave para mejorar la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado. Mediante un control preciso de la temperatura, la presión, el tiempo y otros parámetros durante el proceso de preparación, se potencia el efecto sinérgico de la fase aglutinante a base de Ni, los aditivos de Cr_3C_2 y el recubrimiento superficial. Los parámetros de optimización recomendados incluyen una temperatura de sinterización de $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, una presión $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, un tiempo de molienda de bolas de 40 ± 1 hora y una temperatura de prensado isostático en caliente (HIP) de $1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$. Una vez optimizados estos parámetros, la tasa de pérdida de peso del carburo cementado se reduce a $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, la corriente de corrosión (i_{corr}) se reduce a $< 8 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, la dureza se mantiene $> \text{HV } 1800 \pm 30$, la tenacidad $> 12\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. El proceso optimizado reduce los microdefectos (como porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la segregación de fases ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), y mejora la resistencia del límite de grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$), lo que lo hace excelente en entornos de alta temperatura ($1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) y corrosivos (como $\text{NaCl } 5\% \pm 0,1\%$), y es adecuado para perforaciones marinas, turbinas de aviación y equipos químicos. Además, el proceso optimizado reduce la concentración de tensiones ($< 300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) causada por ciclos térmicos ($\Delta T\text{ } 500\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), lo que prolonga la vida útil.

8.3.4.2 Análisis de la resistencia a la corrosión y mecanismo de rendimiento de la optimización de los parámetros del proceso de carburo cementado

La clave de la optimización de los parámetros del proceso reside en la uniformidad de la microestructura y la distribución de fases. Durante la sinterización a $1450\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, la fase aglutinante a base de Ni forma una solución sólida uniforme con WC (desviación de la distribución de Ni $< 0,1\% \pm 0,02\%$), el espesor de la capa de NiO se estabiliza a $10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$ y el i_{corr} se reduce a $< 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$. La molienda de bolas durante 40 horas ± 1 hora refina los granos ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), aumenta la densidad del límite de grano a $> 10^4\text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{ mm}^2/\text{cm}^3$, reduce la penetración de medios corrosivos y la tasa de pérdida de peso es $< 0,04\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$. El HIP $1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ elimina la porosidad residual ($< 0,05\% \pm 0,01\%$), la densidad alcanza el $99,7\% \pm 0,1\%$ y mejora la resistencia a la oxidación (ganancia de masa $< 0,25\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$). En la oxidación a alta temperatura ($1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), los parámetros optimizados redujeron la volatilización de Cr_3C_2 (pérdida $< 0,05\% \pm 0,01\%$), el espesor de la capa de Cr_2O_3 permaneció en $0,1\text{--}0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$ y la resistencia a la oxidación mejoró en aproximadamente un $45\% \pm 5\%$. La coincidencia de los coeficientes de expansión térmica ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) redujo las grietas por fatiga térmica ($< 0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y mejoró la estabilidad a largo plazo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.4.3 Análisis microscópico y verificación de la optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

de microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que las muestras de proceso optimizadas tenían granos uniformes ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$, mientras que las muestras no optimizadas (sinterizadas a $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) tenían zonas de segregación (diámetro $\sim 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). El análisis de difracción de rayos X (XRD) confirmó que las intensidades de pico de la fase WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$) y la fase Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) eran uniformes, lo que indica una distribución de fase optimizada. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) mostró que los contenidos de Ni y Cr en los límites de grano fueron del $8\%-10\% \pm 0,5\%$ y del $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$, respectivamente, sin segregación obvia. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detectó el pico de Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) y el pico de Cr 2p ($576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), que coincidieron con el pico de O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), verificando la formación de capas de NiO y Cr_2O_3 .

8.3.4.4 Análisis de los factores que afectan la optimización de los parámetros del proceso de resistencia a la corrosión del carburo cementado y la resistencia a altas temperaturas

El efecto de la optimización de los parámetros del proceso se ve afectado por muchos factores y debe controlarse con precisión:

(1) Temperatura de sinterización

A $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la desviación de la distribución de Ni es $< 0,1\% \pm 0,02\%$, $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Si $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la segregación de Ni es $> 0,5\% \pm 0,1\%$, i_{corr} aumenta en un $15\% \pm 3\%$ (a $1,15 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la tasa de pérdida de peso aumenta a $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

(2) Tiempo de molienda de bolas

A las $40 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$, el tamaño del grano es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y la tasa de pérdida de peso es $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Si el tiempo de secado es $< 30 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$, el grano se vuelve más grueso ($> 0,7 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la tasa de pérdida de peso aumenta un $10\% \pm 2\%$ (hasta $0,044 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$).

(3) Presión

Con un grado de vacío $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, contenido de oxígeno $< 0,01\% \pm 0,001\%$, ganancia de masa $< 0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$. Si la presión es $> 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, la ganancia de peso por oxidación es del $20\% \pm 3\%$ (hasta $0,3 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

(4) Temperatura HIP

A $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la densidad es del $99,7\% \pm 0,1\%$ y la profundidad de las picaduras es $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. A $> 1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la matriz se ablanda (la dureza disminuye un $5\% \pm 1\%$) y el i_{corr} aumenta a $9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Humedad ambiente

Cuando la humedad $> 50\% \pm 5\%$, la oxidación de la superficie se acelera y i_{corr} aumenta en un $10\% \pm 2\%$ (a $8,8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), lo que debe combinarse con la optimización del recubrimiento.

Por ejemplo, una muestra de WC-10Ni se sinterizó a $1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ y $10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, con una pérdida de peso de $0,08 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} alcanza $1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. La tasa de pérdida de peso del proceso optimizado ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, HIP $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) se reduce a $0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la resistencia a la corrosión mejoró en aproximadamente un $62\% \pm 5\%$.

8.3.4.5 Estrategia de optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

Para lograr una pérdida de peso $< 0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ e $i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, es necesario controlar con precisión los parámetros del proceso. Las estrategias recomendadas incluyen:

(1) Relación de polvo y molienda de bolas

de partícula $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Ni ($8\% - 10\% \pm 1\%$) y Cr_3C_2 ($0,2\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) y se molieron en húmedo (medio de etanol anhidro, 40 horas ± 1 hora, relación bola-material $10:1 \pm 0,5$). La desviación de la distribución del tamaño de partícula fue $< 0,02 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y se redujo la aglomeración ($< 0,1\% \pm 0,02\%$).

(2) Sinterización al vacío

Temperatura $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, tiempo de retención 1 hora $\pm 0,1$ hora, densidad $99,5\% \pm 0,1\%$, porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$. Evitar la segregación inducida por $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

(3) Prensado isostático en caliente (HIP)

A una temperatura de $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, una presión de $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$ y un tiempo de 1 hora $\pm 0,1$ hora, la densidad aumentó a $99,7\% \pm 0,1\%$, se eliminó la porosidad ($< 0,05\% \pm 0,01\%$) y la profundidad de picaduras se redujo a $< 1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Tratamiento de recocido: El recocido a baja temperatura ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 2 horas $\pm 0,1$ horas) libera la tensión ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) y mejora la resistencia del límite de grano ($> 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$).

(4) Control ambiental

Mantener la humedad $< 10\% \pm 1\%$ y el contenido de oxígeno $< 0,01\% \pm 0,001\%$ durante la sinterización y el HIP para reducir la oxidación de la superficie (ganancia de peso $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(5) Monitoreo de procesos

La monitorización de temperatura en línea (precisión $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y los sensores de presión (precisión $\pm 10^{-5}\text{ Pa}$) se utilizan para garantizar una desviación de los parámetros $< 1\%$ y optimizar la uniformidad de la distribución de la fase.

Estos parámetros aseguran una microestructura densa con resistencia en el límite de grano $> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$, manteniendo la dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{IC} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

8.3.4.6 Casos de ingeniería y comparación del desempeño de la optimización de parámetros de proceso para la resistencia a la corrosión del carburo cementado y la resistencia a altas temperaturas

Tomando como ejemplos el proceso optimizado WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN ($10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) y el WC-10Ni no optimizado, tras la oxidación a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante $100\text{ horas} \pm 10\text{ horas}$, la muestra optimizada ganó $0,15\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$, en comparación con los $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$ y $1,1 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$ no optimizados, y la resistencia a la oxidación se mejora en un $70\% \pm 5\%$. En la prueba de niebla salina (NaCl 5% $\pm 0,1\%$, $2000\text{ h} \pm 100\text{ h}$), la tasa de pérdida de peso se reduce a $0,02\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$, la profundidad de picaduras es $< 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$, mejor que los valores no optimizados de $0,07\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ y $3,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$. En álabes de turbinas de aviación, la vida útil de las muestras optimizadas es $> 8000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$, lo que supone un $60\% \pm 5\%$ más que las $5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$ sin optimizar, y la tasa de fallo por grietas térmicas se reduce en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$.

8.3.4.7 Extensión de la aplicación y limitaciones de la optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas del carburo cementado

El proceso optimizado hace que el carburo cementado tenga un buen rendimiento en entornos corrosivos y de temperatura ultraalta ($> 1100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), adecuado para toberas de turbinas de gas (vida útil $> 10^4\text{ horas} \pm 10^3\text{ horas}$) y brocas de perforación en aguas profundas (resistencia a la presión $> 30\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$). En una atmósfera que contiene SO₂, la ganancia de peso de la muestra optimizada es $< 0,2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, pero un ácido fuerte con un pH $< 1 \pm 0,1$ debe combinarse con un recubrimiento de Al₂O₃ para su optimización. El coste del equipo de proceso es relativamente alto (aproximadamente 1,5-2 veces el de los procesos tradicionales) y es necesario reducirlo mediante la producción en masa y la estandarización de parámetros.

8.3.4.8 Optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado Dirección de optimización y perspectivas futuras

Para mejorar aún más el efecto, se puede introducir sinterización dinámica (gradiente de temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de $50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{cm}$) para reducir i_{corr} a $5 \times 10^{-7}\text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A}/\text{cm}^2$. A temperaturas ultraaltas ($> 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), la presión HIP se optimiza a $300\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, y la ganancia de peso es $< 0,1\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05\text{ mg}/\text{cm}^2$, dureza $> \text{HV } 1900 \pm 30$. En el futuro, el uso de sistemas de monitorización inteligentes y polvos a nanoescala (tamaño de partícula $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) puede mejorar la precisión y la eficiencia y expandirse a aplicaciones extremas de energía y aviación.

La optimización de los parámetros del proceso (sinterización $1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $< 10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$, molienda de bolas $40\text{ h} \pm 1\text{ h}$, HIP $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) redujo significativamente la pérdida de peso ($< 0,04\text{ mg}/\text{cm}^2$) al refinar el tamaño de grano ($0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y eliminar defectos (porosidad $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$). $\pm 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2$) y corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 8 \times 10^{-7}\text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A}/\text{cm}^2$), resistencia a la oxidación aumentada en un $45\% \pm 5\%$, dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y tenacidad ($K_{\text{IC}} > 12\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Factores como la temperatura de sinterización, el tiempo de molienda de bolas, la presión, la temperatura HIP y la humedad ambiente deben regularse exhaustivamente. Es adecuado para entornos corrosivos y de alta temperatura. En el futuro, se pueden utilizar procesos dinámicos y nanotecnología para ampliar aún más las aplicaciones.

8.3.5. Control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.1 Descripción general de los principios y tecnologías para el control de la microestructura del carburo cementado

El control de la microestructura es fundamental para mejorar la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado. Mediante un control preciso del tamaño de grano, la distribución de fases y la densidad de defectos, se optimiza el efecto sinérgico de la fase de unión a base de Ni, los aditivos Cr_3C_2 y el recubrimiento superficial. Los objetivos de control recomendados incluyen un tamaño de grano de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, una desviación de la distribución de Ni $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$ y una porosidad $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$. Después del control, la tasa de pérdida de peso del carburo cementado se reduce a $< 0,03\text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ mg}/\text{cm}^2$, la corriente de corrosión (i_{corr}) se reduce a $< 7 \times 10^{-7}\text{ A}/\text{cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A}/\text{cm}^2$, la dureza se mantiene $> \text{HV } 1800 \pm 30$, la tenacidad $> 12\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. La optimización de la microestructura reduce las trayectorias de corrosión intergranular y las grietas por fatiga térmica ($< 0,02\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y mejora la resistencia intergranular ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$), lo que lo hace excelente en entornos de alta temperatura ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y corrosivos (como $\text{NaCl } 5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$), y es adecuado para perforaciones en aguas profundas, turbinas de aviación y tuberías químicas. Además, la microestructura optimizada reduce la concentración de tensiones ($< 250\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) causada por ciclos térmicos ($\Delta T\text{ } 500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), lo que prolonga su vida útil.

8.3.5.2 Análisis de la resistencia a la corrosión y mecanismo de rendimiento de la regulación de la microestructura del carburo cementado

de grano de $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, la densidad del límite de grano aumenta a $> 10^4\text{ mm}^2/\text{cm}^3 \pm 10^3\text{ mm}^2/\text{cm}^3$, lo que reduce la penetración de medios corrosivos, y la tasa de pérdida de peso es $< 0,03$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. La desviación de la distribución de Ni es $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. Se garantiza la formación uniforme de la capa de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), y i_{corr} se reduce a $< 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. Porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ Elimina los huecos residuales a través del proceso HIP, la densidad alcanza el $99,7 \% \pm 0,1 \%$, mejora la resistencia a la oxidación (ganancia de peso $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) . En un entorno oxidante a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, Cr_3C_2 ($0,2 \% - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) refina los granos y forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $0,1\text{-}0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) , que mejora la resistencia a la oxidación en aproximadamente un $50 \% \pm 5 \%$. La coincidencia de los coeficientes de expansión térmica ($\text{WC } 5,2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\text{Ni } 13 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\text{Cr}_3\text{C}_2 10 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$) reduce la tensión térmica y la longitud de la grieta por fatiga térmica es $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, lo que mejora significativamente la estabilidad a largo plazo.

8.3.5.3 Control de microestructura y microanálisis y verificación de carburo cementado

mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que los granos eran uniformes ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la porosidad era $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$ después de la regulación, mientras que las muestras no reguladas (granos $> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) tenían agujeros (diámetro $\sim 0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) . El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó que las intensidades de pico de la fase WC ($2\theta \approx 35,6^\circ, 48,3^\circ$), la fase Ni ($2\theta \approx 44,5^\circ$) y la fase Cr_3C_2 ($2\theta \approx 39,4^\circ$) fueron uniformes, lo que indica una distribución de fases optimizada. La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) mostró que los contenidos de Ni y Cr en los límites de grano fueron del $8\%\text{-}10 \% \pm 0,5\%$ y del $0,5\%\text{-}1 \% \pm 0,1\%$, respectivamente, sin segregación. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detectó el pico Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) y el pico Cr 2p ($576,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), que coincidieron con el pico O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), verificando la formación de capas de NiO y Cr_2O_3 .

8.3.5.4 Análisis de los factores que afectan la microestructura del carburo cementado

El efecto de la regulación de la microestructura se ve afectado por muchos factores y requiere una regulación precisa:

(1) Tamaño del grano

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, pérdida de peso $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. Si $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye y la tasa de pérdida de peso aumenta en un $20 \% \pm 5 \%$ (a $0,036 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) , la profundidad de picaduras aumentó de $1,5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(2) Distribución de Ni

Cuando la desviación es $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, la capa de NiO es uniforme y el i_{corr} es bajo. Si la desviación es $> 0,5 \% \pm 0,1 \%$, el enriquecimiento de Ni produce un aumento del i_{corr} del $15 \% \pm 3 \%$ (hasta $1,05 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) , y la tasa de pérdida de peso asciende a $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(3) Porosidad

$< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, densidad $99,7 \% \pm 0,1 \%$, excelente resistencia a la oxidación (aumento de peso $< 0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$). Si $> 0,5 \% \pm 0,02 \%$, la corrosión por poros se acelera y el i_{corr} aumenta un $10 \% \pm 2 \%$ (a $7,7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$).

(3) Temperatura de sinterización

A $1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la microestructura es estable y la tasa de pérdida de peso es baja. Si la temperatura es $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, el tamaño de grano aumenta ($> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el i_{corr} aumenta un $12 \% \pm 2 \%$ (alcanzando $8,4 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$).

(5) Humedad ambiente

Cuando la humedad $> 50\% \pm 5\%$, la oxidación de la superficie se acelera y i_{corr} aumenta en un $8\% \pm 2\%$ (a $7,6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$), y se requiere control de la humedad ($< 10\% \pm 1\%$).

Por ejemplo, una muestra de WC-10Ni tiene un tamaño de grano de $2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, una porosidad de $0,6 \% \pm 0,02 \%$ y una tasa de pérdida de peso de $0,07 \text{ mg/cm}^2$ en niebla salina. $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, i_{corr} alcanza $1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$. La tasa de pérdida de peso de la microestructura optimizada ($0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) se reduce a $0,02 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, la resistencia a la corrosión mejoró en aproximadamente un $64\% \pm 5\%$.

8.3.5.5 Estrategias para controlar la microestructura del carburo cementado

Para lograr una pérdida de peso $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$ e $i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$, es necesario controlar con precisión la microestructura. Las estrategias recomendadas incluyen:

(1) Selección de polvo y molienda de bolas

nanopolvos de WC (tamaño de partícula: $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Ni ($8\%-10\% \pm 1\%$) y Cr_3C_2 ($0,2\%-0,5\% \pm 0,01\%$) y se molieron en húmedo (medio de etanol anhidro, $40 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$, relación bola-material: $10:1 \pm 0,5$). El tamaño de grano se controló a $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y se redujo la aglomeración ($< 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

(2) Proceso de sinterización

Sinterización al vacío ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, presión $< 10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$, tiempo de mantenimiento $1 \text{ hora} \pm 0,1 \text{ hora}$), desviación de distribución de Ni $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$, evitando el crecimiento de grano inducido por $> 1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

(3) Prensado isostático en caliente (HIP)

Temperatura $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, presión $200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, tiempo $1 \text{ hora} \pm 0,1 \text{ hora}$, porosidad reducida a $< 0,1\% \pm 0,02\%$, densidad $99,7\% \pm 0,1\%$, profundidad de picaduras $< 1 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(4) Optimización de la distribución de fases

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se utilizó aleación mecánica (MA, 200 rpm $\pm$ 10 rpm, 10 h $\pm$ 0,5 h) para dispersar uniformemente Ni y Cr₃C₂, reducir la segregación (<0,05 % $\pm$ 0,01 %) y mejorar la resistencia del límite de grano (>200 MPa $\pm$ 20 MPa).

(5) Control ambiental

Mantener la humedad < 10% $\pm$ 1% y el contenido de oxígeno < 0,01% $\pm$ 0,001% durante la sinterización y el HIP para reducir la oxidación de la superficie (ganancia de peso < 0,1 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm²).

(6) Post-recocido

El recocido a baja temperatura (500 °C $\pm$ 10 °C, 2 h $\pm$ 0,1 h) alivia la tensión (< 200 MPa $\pm$ 20 MPa) y estabiliza la microestructura.

Estas estrategias garantizan granos finos, distribución de fases homogénea, resistencia del límite de grano > 200 MPa $\pm$ 20 MPa y dureza mantenida (> HV 1800 $\pm$ 30) y tenacidad (K_{IC} > 12 MPa·m^{1/2} $\pm$ 0,5 MPa·m^{1/2}).

8.3.5.6 Caso de ingeniería de control de microestructura de carburo cementado y comparación de rendimiento

como ejemplo la microestructura optimizada WC-10Ni-0,2%Cr₃C₂ - TiN (10 μ m $\pm$ 0,1 μ m) y la no optimizada WC-10Ni, tras la oxidación a 1000 °C $\pm$ 10 °C durante 100 horas $\pm$ 10 horas, la muestra optimizada ganó 0,1 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², i_{corr} < 6 $\times$ 10⁻⁷ A/cm² $\pm$ 10⁻⁸ A/cm², en comparación con los 0,5 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm² y 1,1 $\times$ 10⁻⁶ A/cm² $\pm$ 10⁻⁷ A/cm² no optimizados, y la resistencia a la oxidación se mejora en un 80% $\pm$ 5 %. En la prueba de niebla salina (NaCl 5 % $\pm$ 0,1 %, 2000 h $\pm$ 100 h), la tasa de pérdida de peso se reduce a 0,01 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm², la profundidad de picaduras es < 0,5 μ m $\pm$ 0,5 μ m, mejor que los valores no optimizados de 0,07 mg/cm² $\pm$ 0,01 mg/cm² y 3,5 μ m $\pm$ 0,5 μ m. En álabes de turbinas de aviación, la vida útil de las muestras optimizadas es > 9000 horas $\pm$ 500 horas, lo que supone un 80 % $\pm$ 5 % más que las 5000 horas $\pm$ 500 horas sin optimizar, y la tasa de fallo por grietas térmicas se reduce en aproximadamente un 45 % $\pm$ 5 %.

8.3.5.7 Extensión de la aplicación y limitaciones del control de la microestructura del carburo cementado

El control de la microestructura permite que el carburo cementado tenga un buen rendimiento en entornos corrosivos y de temperatura ultraalta (> 1100 °C $\pm$ 10 °C), adecuado para toberas de turbinas de gas (vida útil > 10⁴ horas $\pm$ 10³ horas) y brocas de perforación en aguas profundas (resistencia a la presión > 30 MPa $\pm$ 2 MPa). En una atmósfera que contiene SO₂, la ganancia de peso de la muestra optimizada es < 0,15 mg/cm² $\pm$ 0,05 mg/cm², pero un pH < 1 $\pm$ 0,1 requiere la optimización del recubrimiento de Al₂O₃ en ácidos fuertes. El proceso de control requiere una alta precisión del equipo (aproximadamente el doble del coste de los procesos tradicionales) y es

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

necesario reducir los costes mediante la automatización y la producción en masa.

8.3.5.8 Dirección y perspectivas futuras del control y optimización de la microestructura del carburo cementado

Para mejorar aún más el efecto, se puede introducir sinterización de plasma (SPS, temperatura $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, presión $50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) para reducir i_{corr} a $4 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$. A temperaturas ultraaltas ($> 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), el tamaño de grano se optimiza a $0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ y la ganancia de peso es $< 0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$, dureza $> \text{HV } 1900 \pm 30$. En el futuro, el uso de polvos a escala nanométrica (tamaño de partícula $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y la detección microscópica inteligente pueden mejorar la precisión del control y expandirse a aplicaciones de energía extrema y aviación.

El control de la microestructura (tamaño de grano $0,51\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, desviación de la distribución de Ni $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$, porosidad $< 0,1\text{ \%} \pm 0,02\text{ \%}$) reduce significativamente la tasa de pérdida de peso ($< 0,03\text{ mg/cm}^2$) mediante el refinamiento de los granos y la optimización de la distribución de fases $\pm 0,01\text{ mg/cm}^2$ y la corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 7 \times 10^{-7}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8}\text{ A/cm}^2$), la resistencia a la oxidación aumentó en un $50\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$, la dureza ($> \text{HV } 1800 \pm 30$) y la tenacidad ($K_{\text{Ic}} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Tamaño de grano, distribución de Ni, La porosidad, la temperatura de sinterización y la humedad ambiental deben regularse exhaustivamente. Es adecuado para entornos corrosivos y de alta temperatura. En el futuro, el proceso de plasma y la nanotecnología podrán utilizarse para ampliar aún más sus aplicaciones.

8.4 Prueba y evaluación de la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.4.1 Tasa de corrosión del carburo cementado (curva electroquímica de Tafel)

Descripción general del principio y la tecnología de la tasa de corrosión del carburo cementado

La velocidad de corrosión se mide mediante la curva electroquímica de Tafel (según la norma ASTM G59) para medir la densidad de corriente de corrosión ($i_{\text{corr}} < 10^{-6}\text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7}\text{ A/cm}^2$) y cuantificar la resistencia a la corrosión del carburo cementado en entornos corrosivos como ácidos ($\text{pH} < 3 \pm 0,1$), niebla salina ($\text{NaCl } 5\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$) y entornos marinos. La curva de Tafel se basa en la siguiente fórmula:

$$\eta = b \cdot \log \left(\frac{i}{i_{\text{corr}}} \right)$$

Donde η es el sobrepotencial (precisión $\pm 0,01\text{ V}$), b es la pendiente de Tafel (aproximadamente $0,1\text{ V/década} \pm 0,01\text{ V/década}$), i es la densidad de corriente (precisión $\pm 10^{-9}\text{ A/cm}^2$) e i_{corr} es la densidad de corriente de corrosión. Baja i_{corr} y alto potencial de corrosión ($E_{\text{corr}} > 0,2\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$ frente a SCE) indican una excelente resistencia a la corrosión. La prueba utiliza un sistema de tres electrodos (electrodo de trabajo: carburo cementado como WC10Ni, electrodo de referencia: electrodo de calomelanos saturado SCE, electrodo auxiliar: electrodo de platino), el electrolito

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

incluye $3,5 \% \pm 0,1 \%$ de NaCl o $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M}$ H_2SO_4 y está equipado con una estación de trabajo electroquímica de alta precisión (precisión de potencial $\pm 0,001 \text{ V}$, precisión de corriente $\pm 10^{-9} \text{ A}$). Por ejemplo, la i_{corr} de WC10Ni en solución de NaCl es de aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, y E_{corr} La resistencia a la corrosión es de aproximadamente $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, significativamente mejor que los valores de $10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ y $-0,3 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ del WC10Co. Esta sección combina el principio de la curva de Tafel, el método de prueba y un caso de ingeniería para analizar exhaustivamente el método de evaluación de la velocidad de corrosión del carburo cementado, proporcionando una base científica para optimizar la resistencia a la corrosión.

8.4.1.2 Mecanismo y análisis de la velocidad de corrosión del carburo cementado

refleja la respuesta electroquímica de los materiales en medios corrosivos cuantificando E_{corr} y i_{corr} . La E_{corr} de WC10Ni es de aproximadamente $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$, lo que se debe a la capa de pasivación de NiO (espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, densidad $\sim 6,7 \text{ g/cm}^3$) $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) se forma, lo que inhibe la difusión de H^+ y Cl^- a través de la inercia química ($K_{\text{ps}} \sim 10^{-15} \pm 10^{-16}$), lo que da como resultado una disminución en i_{corr} de aproximadamente $50\% \pm 5\%$ en comparación con WC10Co. El WC10Co presenta una i_{corr} más alta ($10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) y forma picaduras de corrosión (profundidad $< 5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) debido a las reacciones de disolución de Co ($\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}^-$, $\Delta G > 0 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). La adición de Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) optimiza aún más el rendimiento. Su reacción a alta temperatura ($4\text{Cr}_3\text{C}_2 + 13\text{O}_2 \rightarrow 6\text{Cr}_2\text{O}_3 + 8 \text{CO}$) genera una capa de Cr_2O_3 (espesor $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), que se sinergiza con el NiO para reducir la i_{corr} en un $40 \% \pm 5 \%$ adicional (a $\sim 6 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$). Optimizar el tamaño de grano a $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ reduce el área de exposición de Co o Ni ($< 10 \% \pm 1 \%$), reduce la i_{corr} en otro $20 \% \pm 5 \%$ y mejora significativamente la resistencia a la corrosión.

de microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostró que el número de picaduras de corrosión WC10Ni era pequeño (profundidad $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), mientras que la profundidad de las picaduras WC10Co era de $5-10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detectó el pico Ni 2p ($854 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) y el pico Cr 2p ($577 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), que coincidieron con el pico O 1s ($530 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), lo que confirma la presencia de capas de NiO y Cr_2O_3 . La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) mostró una reducción del contenido de Co en las picaduras de corrosión ($< 5 \% \pm 0,5 \%$) y un enriquecimiento de Ni y Cr ($> 10 \% \pm 1 \%$), lo que confirma el efecto protector de la capa de pasivación. En entornos hostiles con $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ o NaCl $> 5 \% \pm 0,1 \%$, i_{corr} puede aumentar hasta $1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y debe optimizarse aún más en combinación con recubrimientos superficiales (como TiN).

8.4.1.3 Análisis de los factores que afectan la velocidad de corrosión del carburo cementado

La velocidad de corrosión se ve afectada por muchos factores y debe optimizarse integralmente:

(1) Fase de unión

Cuando el contenido de Ni es del $10\% \pm 1\%$, $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$; cuando el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contenido de Co es $> 12\% \pm 1\%$, i_{corr} aumenta en un $50\% \pm 5\%$ (a $\sim 1,5 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$) porque el Co se oxida más fácilmente.

(2) Cantidad añadida de Cr_3C_2

$0,5\% \pm 0,01\%$, i_{corr} disminuye en un $40\% \pm 5\%$; si $> 1\% \pm 0,01\%$, la formación de la fase η hace que la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) disminuya en un $10\% \pm 2\%$ (a $\sim 11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), i_{corr} aumenta ligeramente a $7 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$.

(3) Tamaño del grano

$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, i_{corr} es bajo y la pérdida de peso es $< 0,03 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$; si $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, i_{corr} aumenta en un $20\% \pm 5\%$ (alcanzando $\sim 1,2 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la profundidad de picaduras aumenta a $4 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

(4) Condiciones del electrolito

Cuando $\text{pH} < 2 \pm 0,1$, i_{corr} aumenta en un $30\% \pm 5\%$ (a $\sim 1,3 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$); cuando $\text{NaCl} > 5\% \pm 0,1\%$, el área de picaduras aumenta en un $20\% \pm 5\%$ (de $0,01 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$ a $0,012 \text{ mm}^2 \pm 0,001 \text{ mm}^2$).

(5) Rugosidad de la superficie

$R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, i_{corr} permanece bajo; si $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, las microfisuras aumentan y i_{corr} aumenta en un $10\% \pm 2\%$ (a $\sim 1,1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

la i_{corr} de una muestra de WC12Co en $\text{pH } 1 \pm 0,1 \text{ H}_2\text{SO}_4$ es de aproximadamente $10^{-4} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, mientras que la de WC10Ni (adición de Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) es de solo $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, y la resistencia a la corrosión mejora aproximadamente 1000 veces $\pm 10\%$.

8.4.1.4 Método de prueba para la velocidad de corrosión del carburo cementado

Para asegurarme de que i_{corr} Para la precisión ($\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y la confiabilidad de los datos, se recomiendan los siguientes métodos de prueba estandarizados:

(1) Equipo

Se utilizó un sistema de tres electrodos equipado con una estación de trabajo electroquímica de alta precisión (precisión de potencial $\pm 0,001 \text{ V}$, precisión de corriente $\pm 10^{-9} \text{ A}$).

(2) Electrolito

Utilice $3,5\% \pm 0,1\% \text{ NaCl}$ o $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, rango de $\text{pH } 2-7 \pm 0,1$, temperatura $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

(3) Parámetros de prueba

Velocidad de escaneo $0,1 \text{ mV/s} \pm 0,01 \text{ mV/s}$, rango de potencial $\pm 0,25 \text{ V vs. E}_{\text{corr}}$, tiempo de prueba $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(4) Preparación de la muestra

Pulido a $Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$, área expuesta $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, prueba repetida ≥ 3 veces.

(5) Análisis de datos

i_{corr} (precisión $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y E_{corr} (precisión $\pm 0,02 \text{ V}$) se calcularon mediante ajuste Tafel, lo que garantiza una repetibilidad de $> 95\% \pm 2\%$.

El i_{corr} de WC10Ni ($Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$) en $3,5\% \pm 0,1\% \text{ NaCl}$ es aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, y el E_{corr} es aproximadamente $0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$. Los resultados de la prueba son altamente consistentes, lo que verifica la confiabilidad del método.

8.4.1.5 Aplicación de ingeniería de la tasa de corrosión del carburo cementado

Las pruebas de curva Tafel electroquímicas brindan un respaldo de datos clave para la aplicación de ingeniería del carburo cementado:

(1) Equipos marinos de carburo cementado

WC10Ni (grano de $0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$, Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) en niebla salina (NaCl $5\% \pm 0,1\%$) tiene un i_{corr} de aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ y una tasa de pérdida de peso de $0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, vida útil $> 5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$, mejor que $3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$ de WC10Co, la resistencia a la corrosión mejoró en aproximadamente un $66\% \pm 5\%$, reduciendo los costos de mantenimiento de la perforación en alta mar en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$.

(2) Válvulas químicas de aleación dura

El WC8Co (Cr_3C_2 añadido $0,5\% \pm 0,01\%$, $Ra < 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$) tiene un i_{corr} de aproximadamente $10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ en $0,1 \text{ M} \pm 0,01 \text{ M H}_2\text{SO}_4$, una profundidad de picaduras $< 2 \mu m \pm 0,5 \mu m$ y una vida útil $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$, que es un $100\% \pm 5\%$ más larga que el WC8Co no optimizado (vida útil de $\sim 1 \text{ año} \pm 0,1 \text{ año}$), lo que cumple los requisitos para la transmisión de fluidos ácidos.

(3) Equipos para la fabricación de papel de aleación dura

WC10Ni (grano de $0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$, revestimiento de TiN de $10 \mu m \pm 0,1 \mu m$) en solución de sulfato $i_{\text{corr}} < 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, pérdida de peso de $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, vida útil $> 4 \text{ años} \pm 0,4 \text{ años}$, lo que es mejor que los materiales tradicionales (como el acero inoxidable, vida útil de $\sim 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$) y mejora la durabilidad del equipo y la eficiencia de producción en aproximadamente un $50\% \pm 5\%$.

Estos casos muestran que las pruebas electroquímicas guían eficazmente la selección de materiales y la optimización del rendimiento del carburo cementado en entornos corrosivos, lo que garantiza la confiabilidad y la economía de las aplicaciones de ingeniería.

8.4.1.6 Extensión de la aplicación y limitaciones de la velocidad de corrosión del carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cementado

Las pruebas de curva de Tafel amplían el potencial de aplicación del carburo cementado en entornos extremadamente corrosivos, como ácidos fuertes con $\text{pH} < 2 \pm 0,1$ o alta salinidad con $\text{NaCl} > 10\% \pm 0,1\%$. El i_{corr} de las muestras recubiertas de WC10Ni-TiN permanece $< 8 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ y la tasa de pérdida de peso es $< 0,05 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$. Sin embargo, a altas temperaturas ($> 1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) o en una atmósfera que contenga SO_2 , puede producirse oxidación o contaminación en la superficie del electrodo, y el i_{corr} puede aumentar en un $15\% \pm 3\%$, lo que requiere optimización en combinación con pruebas de oxidación a alta temperatura. El equipo de prueba es relativamente caro (alrededor de $100.000\text{--}200.000 \text{ RMB} \pm 10.000$), lo que puede ser una limitación para las pequeñas y medianas empresas, y los costos deben reducirse mediante la estandarización y el uso compartido de equipos.

8.4.1.7 Dirección de optimización y perspectivas futuras de la tasa de corrosión del carburo cementado

Para mejorar la precisión de la prueba, se puede introducir la espectroscopia de impedancia electroquímica dinámica (EIS, rango de frecuencia $10^{-2}\text{--}10^5 \text{ Hz} \pm 10 \text{ Hz}$), y la precisión de i_{corr} se puede mejorar a $\pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. En un entorno supercorrosivo ($\text{pH} < 1 \pm 0,1$), la optimización del electrolito (como la adición de inhibidores) puede reducir i_{corr} a $5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-8} \text{ A/cm}^2$. En el futuro, la combinación del análisis de inteligencia artificial de los datos de Tafel y la modificación de la superficie a nanoescala ($R_a < 0,03 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) puede mejorar la precisión de la predicción y extenderse a entornos extremos de aguas profundas y nuevas aplicaciones de equipos de energía.

La velocidad de corrosión se mide mediante la curva de Tafel (ASTM G59) i_{corr} ($< 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$) y E_{corr} ($> 0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ frente a SCE), lo que refleja la resistencia a la corrosión del carburo cementado en condiciones de ácido y niebla salina. Las capas de pasivación de NiO y Cr_2O_3 (con un espesor de $\sim 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) reducen i_{corr} en un $50\text{--}90\% \pm 5\%$, y el tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ optimiza aún más el rendimiento. La prueba utiliza un sistema de tres electrodos de alta precisión (potencial $\pm 0,001 \text{ V}$, corriente $\pm 10^{-9} \text{ A}$), lo que proporciona datos de respaldo para aplicaciones marinas (vida útil $> 5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$), químicas ($> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$) y papeleras ($> 4 \text{ años} \pm 0,4 \text{ años}$). Factores como la fase de unión, Cr_3C_2 , el tamaño de grano, el electrolito y la rugosidad superficial deben regularse exhaustivamente. En el futuro, la resistencia a la corrosión se puede mejorar aún más mediante la electrolisis por inducción (EIS) y la nanomodificación.

8.4.2 Ensayo de dureza a alta temperatura y choque térmico del carburo cementado

8.4.2.1 Descripción general de los principios y técnicas de las pruebas de dureza a alta temperatura y choque térmico del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureza a alta temperatura ($> HV 1200 \pm 30$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la resistencia al choque térmico (grietas $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) son indicadores clave para evaluar la estabilidad del carburo cementado en entornos extremos (como herramientas de aviación $> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$, moldes $> 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$), que se cuantifican mediante la prueba de dureza Vickers (según ASTM E92) y la prueba de choque térmico (según ASTM E1876). Estas pruebas proporcionan datos confiables para la resistencia a alta temperatura del carburo cementado para garantizar que cumpla con los requisitos de aplicaciones de ingeniería como química (vida útil $> 2\text{ años} \pm 0,2\text{ años}$), marina ($> 5\text{ años} \pm 0,5\text{ años}$) y aviación ($> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$). A altas temperaturas, la fase Co se ablanda (la dureza cae a $HV \sim 200 \pm 30$), lo que resulta en una disminución en la dureza general. Los ciclos de choque térmico ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) inducen estrés térmico ($> 500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), que a su vez forma microfisuras. La estrategia de optimización mejora significativamente el rendimiento a alta temperatura mediante la introducción de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) y recubrimientos (como TiN $5\text{--}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para aumentar la resistencia del límite de grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) y la estabilidad térmica. El equipo de prueba incluye un probador de dureza Vickers de alta temperatura (carga $10\text{ kg} \pm 0,1\text{ kg}$, precisión ± 30) y un horno de choque térmico (precisión de control de temperatura $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$). Por ejemplo, el WC10Co recubierto con TiN ($5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) presenta una dureza $> HV 1500 \pm 30$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una longitud de grieta de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ tras 500 ± 50 choques térmicos. Esta sección combina los principios de ensayo, el análisis de mecanismos y casos de ingeniería para explorar exhaustivamente los métodos de evaluación de la dureza a alta temperatura y el comportamiento frente a choques térmicos, y proporcionar una guía científica para la optimización de materiales.

8.4.2.2 Mecanismo y análisis de la dureza a alta temperatura y prueba de choque térmico del carburo cementado

La dureza a alta temperatura se ve significativamente afectada por el ablandamiento de la fase de unión. A $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, la fase Co del WC10Co se ablanda debido al deslizamiento reticular (ancho de banda de deslizamiento $\sim 0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), y la dureza disminuye a $HV 1000 \pm 30$. La adición de Cr_3C_2 ($0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la resistencia del límite de grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) mediante la difusión de Cr (concentración en el límite de grano $\sim 5\% \pm 0,5\%$), y la dureza aumenta aproximadamente un $30\% \pm 5\%$ ($> HV 1300 \pm 30$). El recubrimiento de TiN (dureza $> HV 2000 \pm 50$, punto de fusión $2950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) mantiene una dureza superficial $> HV 1500 \pm 30$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ con alta estabilidad térmica y bajo coeficiente de expansión térmica ($\sim 9 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), lo que reduce el efecto de ablandamiento de la matriz. El tamaño de grano está optimizado a $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, lo que reduce aún más el área de exposición al Co ($< 10\% \pm 1\%$), reduce la pérdida de dureza en aproximadamente un $20\% \pm 5\%$ y mejora la resistencia al desgaste a alta temperatura.

Las grietas por choque térmico son causadas por la tensión térmica, y su magnitud está estrechamente relacionada con las propiedades físicas térmicas del material. La tensión térmica se puede estimar mediante la fórmula:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Donde E es el módulo de Young ($\sim 600 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$), α es el coeficiente de expansión térmica ($\sim 5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), ΔT es la diferencia de temperatura ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y el resultado calculado es de aproximadamente $300\text{-}500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$. La propagación de grietas sigue la ley de Paris ($da/dN = C \cdot \Delta K^m$), los granos finos ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) reducen la velocidad de propagación ($< 10^{-7} \text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8} \text{ mm/ciclo}$) y el recubrimiento de TiN inhibe aún más el crecimiento de grietas (longitud $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). Las observaciones de microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mostraron que las grietas eran principalmente fracturas intergranulares (ancho $\sim 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y las grietas en las muestras de recubrimiento de TiN se redujeron significativamente. La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS) detectó el pico de Ti 2p ($\sim 455 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), lo que confirma la estabilidad termoquímica de TiN y proporciona evidencia microscópica para garantizar el rendimiento en entornos de alta temperatura.

8.4.2.3 Análisis de factores que afectan la dureza a alta temperatura y la prueba de choque térmico del carburo cementado

La dureza a altas temperaturas y la resistencia al choque térmico se ven afectadas por muchos factores y deben optimizarse integralmente:

(1) Cantidad añadida de Cr_3C_2

Al $0,5\% \pm 0,01\%$, dureza $> \text{HV } 1500 \pm 30$, grieta por choque térmico $< 0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$; al $> 1\% \pm 0,01\%$, la formación de la fase η hace que la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) disminuya en un $10\% \pm 2\%$ (a $\sim 11 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y la grieta por choque térmico aumenta ligeramente a $0,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(2) Espesor del recubrimiento

El TiN es de $5\text{-}10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, hay pocas grietas y la tasa de desconchado es $< 5\% \pm 1\%$; si es $> 20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, la tensión interna aumenta ($> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), la tasa de desconchado aumenta en un $10\% \pm 2\%$ y la dureza disminuye en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (hasta $\text{HV } 1425 \pm 30$).

(3) Tamaño del grano

de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la dureza es alta y la tasa de agrietamiento por choque térmico es baja. Si el tamaño de grano es $> 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, la tasa de agrietamiento por choque térmico aumenta un $20\% \pm 5\%$ (hasta $0,06 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y la dureza desciende a un valor de HV de 1100 ± 30 .

(4) Diferencia de temperatura

Cuando $\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la tensión térmica aumenta y la longitud de la grieta aumenta en un $50\% \pm 5\%$ (a $0,075 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$); si $\Delta T < 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, la longitud de la grieta es $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

(5) Conductividad térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$> 80 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (como WC10Ni-TiN), la tensión térmica se dispersa y las grietas son escasas. Si la tensión térmica es $< 50 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (como WC10Co sin recubrimiento), las grietas aumentan un $15 \% \pm 3 \%$ (hasta $0,055 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Por ejemplo, la dureza de un cierto WC12Co (sin recubrimiento) cae a $\text{HV } 800 \pm 30$ a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, y la grieta alcanza $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ después de 500 ± 50 choques térmicos; mientras que la dureza de WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5 \% \pm 0,01 \%$) permanece $> \text{HV } 1500 \pm 30$, y la grieta es de solo $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, con una mejora significativa del rendimiento.

8.4.2.4 Métodos de ensayo para dureza a alta temperatura y ensayo de choque térmico de carburo cementado

Para garantizar la precisión de las pruebas y la consistencia de los datos, se recomiendan los siguientes métodos estandarizados:

(1) Prueba de dureza a alta temperatura

Utilice un comprobador de dureza Vickers, carga $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, temperatura de prueba $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, mantenga $15 \text{ minutos} \pm 1 \text{ minuto}$, precisión de dureza ± 30 , puntos de medición ≥ 5 puntos ± 1 punto.

(2) Prueba de choque térmico

Se utilizó un horno de choque térmico con una temperatura de ciclo de 1000°C a $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, un número de ciclos > 500 veces ± 50 veces, una velocidad de calentamiento y enfriamiento de $10^\circ\text{C/s} \pm 1^\circ\text{C/s}$ y una precisión de control de temperatura de $\pm 1^\circ\text{C}$.

(3) Medición de grietas

utilizando SEM (resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el área estadística fue > 10 áreas ± 1 área.

(4) Preparación de la muestra

Pulir hasta una rugosidad superficial $R_a < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, tamaño de muestra $20 \times 20 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, repetir la prueba ≥ 3 veces.

(5) Análisis de datos

Se calcula el valor medio de dureza (precisión ± 30) y las estadísticas de longitud de grieta (desviación estándar $< 0,01 \text{ mm}$) garantizando una repetibilidad de $> 95\% \pm 2\%$.

choques térmicos, la longitud de grieta de WC10Co (TiN $5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) fue de $0,03 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y la dureza fue $> \text{HV } 1500 \pm 30$. Los resultados de la prueba fueron estables, verificando la confiabilidad del método.

8.4.2.5 Aplicación de ingeniería de la dureza a alta temperatura y la prueba de choque térmico del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las pruebas de dureza a alta temperatura y choque térmico proporcionan datos de rendimiento clave para aplicaciones de ingeniería de carburo cementado:

(1) Herramientas de aviación de carburo

WC10Co (TiN $5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) tiene una dureza $> \text{HV } 1500 \pm 30$ a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, una grieta por choque térmico de $0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y una vida útil de corte > 5000 horas ± 500 horas, que es aproximadamente un $66\% \pm 5\%$ más alta que el WC10Co sin recubrimiento (vida útil ~ 3000 horas ± 300 horas), lo que satisface las necesidades de procesamiento de aviación de alta resistencia y reduce la tasa de fallas causadas por grietas térmicas en aproximadamente un $40\% \pm 5\%$.

(2) Molde de aleación dura de alta temperatura

WC8Co (Cr_3C_2 $0,5\% \pm 0,01\%$) tiene una dureza de $> \text{HV } 1300 \pm 30$ a $900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, grieta por choque térmico $< 0,04\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y vida útil $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces , que es aproximadamente un $60\% \pm 5\%$ más alta que el WC8Co no optimizado (vida útil $\sim 6 \times 10^4$ veces $\pm 5 \times 10^3$ veces), mejorando así la durabilidad y la eficiencia de producción del molde.

(3) Componentes de turbinas de gas de carburo cementado

WC10Co (Al_2O_3 $10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) tiene una dureza de $> \text{HV } 1400 \pm 30$ a $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, grieta por choque térmico $< 0,03\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y una vida útil de $> 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas, que es mejor que la muestra sin recubrimiento (vida útil ~ 7000 horas ± 700 horas), un aumento de aproximadamente $43\% \pm 5\%$, lo que garantiza la estabilidad a largo plazo de la turbina de gas en un entorno de alta temperatura.

Estos casos muestran que la dureza a alta temperatura y las pruebas de choque térmico proporcionan una base científica para el diseño de materiales y la optimización de la aplicación del carburo cementado, mejorando significativamente el rendimiento de la ingeniería.

8.4.2.6 Extensión de la aplicación y limitaciones de la prueba de dureza a alta temperatura y choque térmico del carburo cementado

Las pruebas de dureza a alta temperatura y choque térmico amplían el potencial de aplicación del carburo cementado en entornos de temperatura ultraalta ($> 1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y ciclos térmicos, como toberas de turbinas de gas (vida útil $> 1,5 \times 10^4$ horas $\pm 10^3$ horas) y álabes de motores aeroespaciales (choque térmico $> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces). La muestra recubierta de WC10Ni- Al_2O_3 presenta una dureza $> \text{HV } 1400 \pm 30$ y grietas $< 0,02\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ a $1100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, mostrando una excelente estabilidad térmica. Sin embargo, a $\Delta T > 600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ o en una atmósfera con SO_2 , el recubrimiento puede desprenderse u oxidarse, y la grieta aumenta a $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, lo que requiere la combinación de recubrimientos multicapa (como TiN / Al_2O_3) para su optimización. El coste de los equipos de prueba es relativamente elevado (aproximadamente 150 000-250 000 RMB $\pm 10\text{ }000$ RMB), lo que puede suponer un reto para las pequeñas y medianas empresas. Es necesario reducir los costes mediante el uso compartido de equipos y la estandarización de los procesos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.4.2.7 Dirección de optimización y perspectivas futuras de la dureza a alta temperatura y la prueba de choque térmico del carburo cementado

Para mejorar el rendimiento, se puede aplicar un recubrimiento por pulverización de plasma (temperatura de $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, espesor de $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para aumentar la dureza a $> \text{HV } 1600 \pm 30$ y reducir las grietas por choque térmico a $< 0,01\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$. A temperaturas ultraaltas ($> 1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), optimizar el contenido de Cr_3C_2 al $0,7\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$ y añadir ZrO_2 ($5\text{ \%} \pm 0,5\text{ \%}$) permite mantener la dureza $> \text{HV } 1500 \pm 30$ y la longitud de grieta a $< 0,015\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$. En el futuro, la combinación del análisis de simulación de elementos finitos del estrés térmico y la tecnología de nanogranos (tamaño de grano $< 0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) puede mejorar la precisión de la predicción y la resistencia al choque térmico y expandirse a aplicaciones de equipos de aviación y energía extremos.

La dureza a alta temperatura ($> \text{HV } 1200 \pm 30$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la resistencia al choque térmico (grieta $< 0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) se cuantifican mediante pruebas ASTM E92 y E1876, lo que refleja la estabilidad del carburo cementado en entornos de alta temperatura. El recubrimiento de Cr_3C_2 ($0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) y TiN ($5\text{-}10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) aumenta la dureza en aproximadamente un $30\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$ ($> \text{HV } 1500 \pm 30$) y la resistencia del límite de grano ($> 200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$), y el tamaño de grano de $0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ reduce la propagación de grietas ($< 10^{-7}\text{ mm/ciclo} \pm 10^{-8}\text{ mm/ciclo}$). La prueba utiliza un durómetro de alta temperatura (precisión ± 30) y un horno de choque térmico (control de temperatura $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) para proporcionar datos de respaldo para la aviación (vida útil $> 5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$), moldes ($> 10^5\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$) y turbinas de gas ($> 10^4\text{ horas} \pm 10^3\text{ horas}$). Factores como el contenido de Cr_3C_2 , el espesor del recubrimiento, el tamaño del grano, la diferencia de temperatura y la conductividad térmica deben controlarse exhaustivamente. En el futuro, el recubrimiento por plasma y la nanotecnología podrán optimizar aún más el rendimiento.

Referencias

- ASTM E9217. (2017). Métodos de ensayo estándar para la dureza Vickers de materiales metálicos. ASTM International.
- ASTM E187615. (2015). Método de ensayo estándar para el módulo de Young dinámico, el módulo de corte y el coeficiente de Poisson mediante excitación de impulso de vibración. ASTM International.
- ASTM G5997 (2014). Método de ensayo estándar para mediciones de resistencia a la polarización potenciodinámica. ASTM International.
- ISO 9227:2017. (2017). Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales: Ensayos de niebla salina. Organización Internacional de Normalización.
- Chen, L. y Wang, Z. (2022). Efecto de la fase aglutinante de Ni en la resistencia a la corrosión de carburos cementados a base de WC. *Química y Física de Materiales*, 280, 125789.
- Li, X. y Zhang, Q. (2023). Estudio de la resistencia a la oxidación de carburos cementados a altas temperaturas. *Ciencia y Tecnología de Materiales*, 41 (4), 567-575.

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

Un apéndice:

Análisis comparativo de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de tungsteno de alta densidad

Los moldes de alta temperatura se utilizan en procesos como forja en caliente, extrusión en caliente, fundición a presión y moldeo de vidrio. Deben mantener una alta dureza, resistencia al desgaste y estabilidad dimensional a altas temperaturas (800–1600 °C), altas presiones (50–200 MPa) y entornos corrosivos. Los moldes de alta temperatura de carburo cementado utilizan carburo de tungsteno (WC) como matriz y se utilizan ampliamente en el moldeo de precisión debido a su alta dureza y resistencia a la corrosión. Los moldes de aleación de tungsteno de alta densidad están hechos principalmente de tungsteno (W), con níquel, hierro o cobre como fase aglutinante. Presentan alta densidad, alta resistencia mecánica y excelente resistencia a la deformación a alta temperatura, lo que los hace adecuados para aplicaciones de alta temperatura y carga pesada. Ambos comparten tecnologías de materiales en los campos de toberas de aviación (resistencia a la erosión a alta temperatura), electrodos de celdas electrolíticas (resistencia a la corrosión) y componentes de turbinas de gas (resistencia al desgaste), pero su rendimiento y escenarios de aplicación tienen enfoques diferentes.

La siguiente tabla compara las propiedades del material, el proceso de fabricación, el rendimiento, las aplicaciones y las limitaciones de ambos, proporcionando una referencia clara para la selección del material del molde de alta temperatura, destacando especialmente las ventajas y aplicaciones únicas de los moldes de aleación de tungsteno de alta densidad.

proyecto	Molde de carburo de alta temperatura (WC-Co)	Molde de aleación de tungsteno de alta densidad
Material composición	WC 85–95 % p/ p, Co 5–15 % p/ p, aditivos opcionales TiC , Cr ₃ C ₂	W 90–97 % en peso, Ni/Fe/Cu 3–10 % (W-Ni-Fe o W-Ni-Cu)
Propiedades del material	Dureza: HV1000–1800 Densidad: 14–15 g/cm ³ Punto de fusión: WC 2870°C, Co limita la resistencia a la temperatura a ~1400°C Resistencia a la flexión: 2000–2500 MPa Tenacidad a la fractura: K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2} Conductividad térmica: 80–100 W/ m·K Coeficiente de expansión térmica: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Dureza: HV300–600 Densidad: 17–19 g/cm ³ Punto de fusión: W 3422°C, resistencia a la temperatura >1600°C Resistencia a la flexión: 800–1500 MPa Tenacidad a la fractura: K _{IC} 20–30 MPa·m ^{1/2} Conductividad térmica: 100–150 W/ m·K Coeficiente de expansión térmica: 4,5–6×10 ⁻⁶ /°C
Proceso de fabricación	de WC/Co (0,2–2 μm) → prensado isostático en frío (CIP) → sinterización al vacío (1350–1450 °C) → mecanizado de precisión (rectificado de diamante) Recubrimiento PVD/CVD (TiN , Al ₂ O ₃ , 2–20 μm) , pulverización térmica APS/DGS (WC-Co , 50–500 μm) Ingeniería de interfaz: recubrimiento de gradiente, implantación de iones	Metalurgia de polvos: polvo W/Ni/Fe → prensado o moldeo por inyección → sinterización en fase líquida (1450–1550 °C) → mecanizado Modificación de la superficie: carburación, nitruración o recubrimiento de Cr/ CrN (5–50 μm) , pulverización térmica (por ejemplo, WC-Co, 50–200 μm) Tratamiento térmico: Recocido (800–1000 °C) para aumentar la tenacidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas de rendimiento	Alta resistencia al desgaste: Dureza HV1000-1800. El recubrimiento (como TiAlN o Al₂O₃) reduce el desgaste entre un 50 % y un 70 %, lo que lo hace adecuado para condiciones de alta fricción. En la forja en caliente de aleaciones de titanio para aviación, la tasa de desgaste se reduce en un 60 %. Excelente resistencia a la corrosión: Resiste la corrosión ácida, alcalina, oxidada y por metales fundidos, reduciendo la tasa de corrosión en un 70 %. En moldes de conformado de vidrio, resiste la corrosión del vidrio fundido y aumenta su vida útil en un 50 %. Retención de dureza a alta temperatura: la dureza disminuye entre un 10 y un 15 % a 1400 °C, lo que resulta adecuado para el moldeo de precisión. Estabilidad dimensional: bajo coeficiente de expansión térmica ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), desviación dimensional <0,01 mm y la precisión de las forjas de aviación se mejora en un 20%. Rendimiento antifatiga: el revestimiento degradado alivia el estrés térmico y aumenta la vida útil por fatiga en un 30%.	Resistencia a temperaturas extremadamente altas: la resistencia a la flexión se mantiene entre 800 y 1200 MPa a 1600 °C, con una excelente resistencia a la fluencia, adecuada para la extrusión de cargas pesadas. Alta tenacidad: tenacidad a la fractura K_{IC} 20–30 MPa·m^{1/2}, fuerte resistencia al impacto, tasa de agrietamiento por impacto reducida en un 60%. Excelente resistencia a la fatiga térmica: alta conductividad térmica (100–150 W/m·K), las grietas térmicas se reducen en un 50% y la vida útil por fatiga aumenta en un 30%. Alta densidad y resistencia a la deformación: densidad 17-19 g/cm³, tasa de deformación <0,1%, adecuado para moldeo a alta presión. Buena maquinabilidad: se pueden mecanizar formas complejas y el ciclo de fabricación se acorta entre un 15 y un 20%.
limitación	Baja tenacidad (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}), propenso al agrietamiento Alta densidad (14–15 g/cm³) y pesado Alto costo de fabricación (equipo 10-30 millones de RMB, molde 50-500.000 RMB) La resistencia a la temperatura está limitada por la fase Co (<1400 °C)	Baja dureza (HV 300-600), resistencia al desgaste insuficiente, se requiere refuerzo de la superficie. Densidad muy alta (17–19 g/cm³), lo que añade peso. El costo del recurso tungsteno es alto (500.000-800.000 RMB por tonelada) Resistencia débil a la corrosión, requiere revestimiento protector.
Aplicaciones y usos	Aeroespacial: matrices de forja en caliente (aleaciones de titanio, forjados de aleaciones a base de níquel, 800–1200 °C), matrices de extrusión en caliente (piezas estructurales aeroespaciales, 1000–1300 °C) Fabricación de automóviles: matrices de fundición a presión (aleación de aluminio, piezas de aleación de magnesio, 600–800 °C), matrices de estampación en caliente (placas de acero de alta resistencia, 700–900 °C) Industria energética: matrices de forja en caliente para engranajes de turbinas eólicas (piezas brutas de engranajes de 42CrMo, 800–1100 °C), matrices de extrusión en caliente para componentes de energía nuclear (1000–1200 °C) Industria electrónica: moldes para moldeo de vidrio (vidrio	Aeroespacial: matrices de extrusión de alta temperatura (aleaciones de alta temperatura, aleaciones de titanio, 1200–1600 °C), matrices de forja en caliente (grandes componentes de aviación, 1000–1400 °C) Industria energética: matrices de extrusión en caliente para componentes de energía nuclear (tubos de aleación de circonio, 1000–1400 °C), matrices de forjado en caliente de alta resistencia para piezas brutas de engranajes de turbinas eólicas (800–1200 °C) Fabricación de automóviles: Matrices de estampación en caliente de alta resistencia (acero de ultraalta resistencia, 900–1100 °C) Industria metalúrgica: matrices de extrusión en caliente de alta resistencia para metales no ferrosos (cobre, aleaciones de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	óptico, pantallas de teléfonos móviles, 1000–1300 °C), moldes para empaquetado de semiconductores (800–1000 °C) Industria metalúrgica: matrices de forja en caliente para metales no ferrosos (cobre, aleaciones de aluminio, 600–900 °C) Caso: Matriz de forja en caliente de aleación de titanio de aviación, recubrimiento PVD- TiN , vida útil extendida en un 40%, eficiencia de conformado +20%	aluminio, 800–1200 °C) Industria de defensa: Matrices de formación de núcleos perforantes (1000–1300 °C), matrices de forjado en caliente para componentes de alta densidad Caso: matriz de extrusión en caliente de tubo de aleación de circonio para energía nuclear, revestimiento de CrN , resistencia a temperaturas de 1400 °C, vida útil prolongada en un 30 %
Efecto de molde de alta temperatura	Resistencia al desgaste: Recubrimientos (como Al₂O₃ , El TiAlN reduce el desgaste entre un 50 % y un 70 % y prolonga la vida útil entre 5000 y 8000 veces. En la forja en caliente de aleaciones de titanio para aviación (1000 °C, 100 MPa), la tasa de retracción se reduce un 60 % y la vida útil se multiplica por hasta 8000, lo que supera a los moldes tradicionales. Resistencia a la corrosión: Resistente a la oxidación, la corrosión por ácidos, álcalis y metales fundidos, reduce la tasa de corrosión en un 70 % y prolonga el ciclo de mantenimiento en un 30 %. En el moldeado de vidrio (1200 °C), es resistente a la corrosión por vidrio fundido, aumenta su vida útil en un 50 % y no presenta picaduras visibles en la superficie. Resistencia a altas temperaturas: La dureza se mantiene de entre HV900 y 1500 a 1400 °C, con una tasa de deformación <0,1 %. En moldes de empaquetado de semiconductores (1000 °C), la estabilidad a altas temperaturas garantiza un funcionamiento continuo de 5000 veces. Resistencia a la fatiga: El recubrimiento en gradiente alivia la tensión térmica, aumenta la resistencia a la fatiga en un 30 % y reduce las grietas térmicas en un 50 %. En la fundición a presión de aleaciones de aluminio para automóviles (700 °C), la vida útil se incrementa de 4000 a 6000 veces. Precisión dimensional: desviación dimensional <0,01 mm, deformación por expansión térmica <0,05% y la tasa calificada de productos terminados aumentó en un 25% (90% → 95%). Eficiencia de moldeo: La alta dureza y la resistencia al desgaste reducen el mantenimiento y aumentan la eficiencia	Resistencia a altas temperaturas: tasa de deformación <0,1 % a 1600 °C, resistencia a la flexión mantenida entre 800 y 1200 MPa, vida útil de 4000 a 6000 veces. En la extrusión de tubos de aleación de circonio para energía nuclear (1400 °C, 150 MPa), la vida útil es 6000 veces mayor, superior a la de los moldes de acero convencionales (2000 veces mayor). Resistencia a la fatiga térmica: La alta conductividad térmica (100–150 W/ m· K) reduce el agrietamiento térmico en un 50 % y aumenta la resistencia a la fatiga en un 30 %. En el estampado en caliente de alta resistencia (1100 °C), la tasa de incidencia de grietas se reduce del 12 % al 5 %. Resistencia al impacto: Tenacidad K_{IC} 20–30 MPa·m^{1/2}, índice de agrietamiento por impacto reducido en un 60%. En el forjado en caliente de aleaciones de alta temperatura para aviación (1200 °C, 200 MPa), la matriz no se agrieta y la vida útil alcanza 5000 veces. Precisión dimensional: desviación dimensional <0,015 mm, deformación por expansión térmica <0,08% y la tasa calificada de productos terminados aumentó en un 20% (85% → 90%). Eficiencia de conformado: La alta densidad y la resistencia a la deformación reducen el tiempo de inactividad y aumentan la eficiencia entre un 15 y un 20 %. Resistencia al desgaste (requiere recubrimiento): El recubrimiento de CrN o WC-Co reduce el desgaste entre un 40 y un 50 % y aumenta la vida útil en un 20 %. En el moldeo de núcleos perforantes (1300 °C), la vida útil del molde con recubrimiento aumenta de 3000 a 4000 veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entre un 20 y un 25 %.

ilustrar:

Composición del material: descripción general de la composición química del carburo cementado y la aleación de tungsteno de alta densidad.

Propiedades del material: Compare parámetros clave como dureza, densidad, punto de fusión, resistencia, etc.

Proceso de fabricación: resume los procesos de moldeo, sinterización, modificación de superficies, etc.

Rendimiento y limitaciones: Analizar las ventajas y desventajas de la resistencia al desgaste, resistencia a la temperatura, costo, etc.

Escenarios de aplicación: Enumere los usos y casos en los campos aeroespacial, energético, automotriz, metalúrgico, de defensa y otros.

Efecto del molde de alta temperatura: cuantifica los efectos de la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión, la resistencia a altas temperaturas, la resistencia a la fatiga, la precisión dimensional, la eficiencia del moldeo, etc.

Análisis comparativo y resumen de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de tungsteno de alta densidad

Los moldes de alta temperatura de carburo cementado y los moldes de aleación de tungsteno de alta densidad presentan ventajas en el campo del moldeo a alta temperatura y son adecuados para diversas condiciones de trabajo y aplicaciones. Los moldes de WC-Co ofrecen un excelente rendimiento en forja en caliente de precisión, fundición a presión y moldeo de vidrio gracias a su alta dureza (HV1000-1800) y excelente resistencia al desgaste (reducción del 50-70% en la tasa de desgaste). Son especialmente adecuados para entornos con temperaturas inferiores a 1400 °C, alta precisión (desviación dimensional <0,01 mm) y resistencia a la corrosión. Su tecnología de recubrimiento PVD/CVD (como TiN , Al₂O₃) y pulverización térmica de alta energía (como APS/DGS) mejora significativamente el rendimiento de los moldes de alta temperatura. Por ejemplo, la vida útil de los moldes de forja en caliente de aleación de titanio para aviación se multiplica por 8000 y la eficiencia aumenta un 25%. Su excelente resistencia a la corrosión (reducción del 70% en la tasa de corrosión) lo hace resistente a la erosión por materiales fundidos en el moldeo de vidrio y el encapsulado de semiconductores, y su ciclo de mantenimiento se extiende un 30%. Sin embargo, los moldes de WC-Co presentan baja tenacidad (K_{IC} 10-15 MPa·m^{1/2}), son propensos a agrietarse bajo fuertes impactos y tienen un alto costo de fabricación (50 000-500 000 yuanes), lo que limita su aplicación en moldes de gran tamaño.

Las matrices de aleación de tungsteno de alta densidad son conocidas por su resistencia a temperaturas extremadamente altas (tasa de deformación <0,1 % a 1600 °C) y alta tenacidad (K_{IC} 20–30 MPa·m^{1/2}), y son adecuadas para escenarios de extrusión y forjado en caliente de alta temperatura y carga pesada. Su alta densidad (17–19 g/cm³) y propiedades antideformación garantizan que la matriz pueda operar de forma estable a alta presión (150–200 MPa). Por ejemplo,

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

la vida útil de la matriz de extrusión de tubos de aleación de circonio nuclear es de hasta 6000 veces y la eficiencia aumenta en un 20 %. La alta conductividad térmica ($100\text{--}150\text{ W/m}\cdot\text{K}$) reduce el agrietamiento térmico en un 50 % y es adecuada para condiciones de carga cíclica, como el estampado en caliente de automóviles con carga pesada.

Sin embargo, las aleaciones de tungsteno de alta densidad presentan baja dureza (HV300-600), poca resistencia al desgaste y requieren recubrimientos de CrN o WC-Co para mejorar su rendimiento. Además, presentan una baja resistencia a la corrosión (se requieren recubrimientos protectores). Los recursos de tungsteno son escasos (500.000-800.000 RMB por tonelada) y una densidad extremadamente alta aumenta el peso y el coste, lo que limita su aplicación en moldes ligeros.

Sugerencias de selección de materiales para moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de tungsteno de alta densidad

Moldes de precisión pequeños (como piezas forjadas para aviación, moldes de vidrio, fundición a presión de automóviles)

Las matrices de carburo son superiores, con alta resistencia al desgaste, precisión y larga vida útil (5000 a 8000 veces).

Moldes de alta temperatura y carga pesada (como extrusión de alta temperatura, componentes de energía nuclear, moldeo de núcleos perforantes)

Los moldes de aleación de tungsteno de alta densidad son más adecuados, con una excelente resistencia a la deformación y alta tenacidad.

Equilibrio entre costos y vida

Los moldes WC-Co tienen bajos costos de mantenimiento y son adecuados para uso de alta frecuencia; los moldes de aleación de tungsteno de alta densidad tienen buena procesabilidad y son adecuados para cargas pesadas pero requieren fortalecimiento de la superficie.

De manera similar a los requisitos técnicos de las boquillas de aviación (recubrimientos resistentes a la erosión de alta temperatura), los electrodos de electrolizadores (recubrimientos resistentes a la corrosión) y los componentes de turbinas de gas (recubrimientos resistentes al desgaste), ambos dependen de la modificación de la superficie y la ingeniería de interfaz (como recubrimientos de gradiente, implantación de iones) para optimizar el rendimiento.

En el futuro, mediante el desarrollo de WC-Co de grano nanométrico, recubrimientos compuestos multicapa, procesos de sinterización de baja temperatura, recubrimientos resistentes al desgaste de aleaciones de tungsteno de alta densidad y tecnologías de fabricación aditiva, los moldes de alta temperatura mejorarán aún más su rendimiento y economía en los campos de la aviación, la energía, los automóviles, la metalurgia, la defensa nacional, etc., proporcionando un fuerte apoyo para una fabricación industrial eficiente y sostenible.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

Un apéndice:

Análisis comparativo de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)

Los moldes de alta temperatura están sujetos a temperaturas extremadamente altas (800–1800 °C), altas presiones (50–200 MPa) y entornos corrosivos en procesos como forja en caliente, extrusión en caliente, fundición a presión y moldeo de vidrio, lo que requiere materiales que tengan excelente dureza, resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas y estabilidad dimensional. Los moldes de carburo de alta temperatura (WC-Co) son ampliamente utilizados en el campo del moldeo de precisión debido a su alta dureza y resistencia a la corrosión; los moldes de aleación de titanio circonio-molibdeno (TZM) son adecuados para temperaturas ultra altas y aplicaciones de moldes grandes debido a su excelente resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fluencia. Los dos tienen tecnologías de materiales comunes en los campos de boquillas de aviación (resistencia a la erosión de alta temperatura), electrodos de celdas electrolíticas (resistencia a la corrosión), cortadores de engranajes de energía eólica (resistencia al desgaste), etc.

Este artículo ofrece una referencia completa para la selección de materiales mediante la comparación de sus propiedades, procesos de fabricación, ventajas de rendimiento, áreas de aplicación, limitaciones y efectos del moldeo a alta temperatura. El contenido sobre los efectos del moldeo a alta temperatura se ha ampliado para incluir datos cuantitativos detallados y casos prácticos en términos de resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fatiga, precisión dimensional y eficiencia de moldeo. Las áreas de aplicación abarcan la industria aeroespacial, energética, automotriz, electrónica, metalúrgica y otras.

Tabla de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)

proyecto	Molde de carburo de alta temperatura (WC-Co)	Molde de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)
Material composición	WC 85–95 % p/ p, Co 5–15 % p/ p, aditivos opcionales TiC , Cr ₃ C ₂	Mo 99–99,5 % en peso, Ti 0,4–0,55 %, Zr 0,06–0,12 %, traza C
Propiedades del material	Dureza: HV1000–1800 Densidad: 14–15 g/cm ³ Punto de fusión: WC 2870°C, Co limita la resistencia a la temperatura a ~1400°C Resistencia a la flexión: 2000–2500 MPa Tenacidad a la fractura: K _{IC} 10–15 MPa·m ^{1/2} Conductividad térmica: 80–100 W/ m·K Coeficiente de expansión térmica: 5–7×10 ⁻⁶ /°C	Dureza: HV250–350 Densidad: 10,2 g/cm ³ Punto de fusión: ~2620 °C, resistencia a la temperatura >1600 °C Resistencia a la flexión: 800–1200 MPa Tenacidad a la fractura: K _{IC} 15–20 MPa·m ^{1/2} Conductividad térmica: 110–140 W/ m·K Coeficiente de expansión térmica: 5,3–5,5×10 ⁻⁶ / °C
Proceso de fabricación	de WC/Co (0,2–2 μm) → prensado isostático en frío (CIP) → sinterización al vacío (1350–1450 °C) → mecanizado de precisión (rectificado de diamante) Recubrimiento PVD/CVD (TiN , Al ₂ O ₃ , 2–20 μm) , pulverización térmica APS/DGS (WC-Co , 50–500 μm)	Metalurgia de polvos: polvo de Mo/Ti/Zr → prensado isostático en caliente (HIP, 1700–2000 °C) → forjado/laminado → mecanizado CNC Modificación de la superficie: recubrimiento de óxido (por ejemplo, MoSi ₂ , 10–50 μm) o nitruración

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

	Ingeniería de interfaz: recubrimiento de gradiente, implantación de iones	Tratamiento térmico: Recocido (1000–1200 °C) para aumentar la tenacidad.
Ventajas de rendimiento	Alta resistencia al desgaste: Dureza HV1000-1800. El recubrimiento (como TiAlN , Al₂O₃) reduce el desgaste entre un 50 % y un 70 %, lo que lo hace adecuado para condiciones de alta fricción (como forja en caliente y fundición a presión). En la forja en caliente de aleaciones de titanio para aviación, la tasa de desgaste se reduce en un 60 % y la vida útil de la matriz se multiplica por 8000. Excelente resistencia a la corrosión: Resiste la corrosión ácida, alcalina, oxidativa y por metales fundidos, con una reducción del 70 % en la tasa de corrosión y una prolongación del 30 % en el ciclo de mantenimiento. En moldes de conformado de vidrio, es resistente a la corrosión por vidrio fundido y su vida útil aumenta un 50 %. Retención de dureza a altas temperaturas: La tecnología de recubrimiento mejora la resistencia a la temperatura a 1400 °C, y la dureza solo disminuye entre un 10 y un 15 %, lo que la hace adecuada para el moldeo de precisión (como vidrio óptico, 1000 a 1300 °C). Estabilidad dimensional: bajo coeficiente de expansión térmica (5–7×10⁻⁶ /°C), desviación dimensional <0,01 mm, lo que garantiza un conformado de alta precisión y mejora la precisión de las forjas de aviación en un 20%. Resistencia a la fatiga: la ingeniería de interfaz (como el recubrimiento de gradiente) alivia el estrés térmico y aumenta la vida útil por fatiga en un 30%, lo que la hace adecuada para condiciones de carga cíclica (como la fundición a presión de automóviles).	Resistencia a temperaturas extremadamente altas: La resistencia a la flexión se mantiene entre 800 y 1000 MPa a 1600-1800 °C, sin fluencia, lo que la hace ideal para la extrusión a temperaturas ultraaltas. La matriz de aleación de alta temperatura opera a 1600 °C con una vida útil de 6000 veces. Excelente resistencia a la fatiga térmica: Su alta conductividad térmica (110–140 W/ m· K) permite una rápida disipación del calor, lo que reduce las grietas térmicas en un 60 % y aumenta la resistencia a la fatiga en un 25 %. En matrices de prensado isostático en caliente, presenta una excelente resistencia al choque térmico. Alta tenacidad: tenacidad a la fractura K_{IC} 15–20 MPa·m^{1/2}, fuerte resistencia al impacto, adecuado para condiciones de alta tensión (como estampado a alta temperatura), tasa de agrietamiento por impacto reducida en un 50%. Buena procesabilidad: es posible el procesamiento CNC de formas complejas y el ciclo de fabricación del molde se acorta en un 20%, lo que es adecuado para moldes grandes (como moldes de extrusión de energía nuclear). Estabilidad dimensional: coeficiente de expansión térmica 5,3–5,5×10⁻⁶ /°C, desviación dimensional <0,02 mm, adecuado para moldeo a alta temperatura de gran tamaño (como moldes de cerámica).
limitación	Baja tenacidad (K_{IC} 10–15 MPa·m^{1/2}) , propenso al agrietamiento Alta densidad (14–15 g/cm³) y pesado Alto costo de fabricación (equipo 10-30 millones de RMB, molde 50-500.000 RMB) La resistencia a la temperatura está limitada por la fase Co (<1400 °C)	Baja dureza (HV250–350), resistencia al desgaste insuficiente Fácil de oxidar (>600 °C), requiere revestimiento protector. Alto costo de los recursos de molibdeno (200.000-300.000 RMB por tonelada) Fragilidad a baja temperatura, se requiere operación a alta temperatura
Aplicaciones y usos	Aeroespacial: matrices de forja en caliente (aleaciones de titanio, forjados de aleaciones a base de níquel, 800–1200 °C), matrices de extrusión en caliente (piezas estructurales aeroespaciales, 1000–1300 °C)	Aeroespacial: matrices de extrusión de alta temperatura (aleaciones de alta temperatura, aleaciones de titanio, 1200–1600 °C), matrices de prensado isostático en caliente (discos de turbinas de aviones, 1400–1800 °C)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Fabricación de automóviles: matrices de fundición a presión (aleación de aluminio, piezas de aleación de magnesio, 600–800 °C), matrices de estampación en caliente (placas de acero de alta resistencia, 700–900 °C) Industria energética: matrices de forja en caliente para engranajes de turbinas eólicas (piezas brutas de engranajes de 42CrMo, 800–1100 °C), matrices de extrusión en caliente para componentes de energía nuclear (1000–1200 °C) Industria electrónica: moldes para moldeo de vidrio (vidrio óptico, pantallas de teléfonos móviles, 1000–1300 °C), moldes para empaquetado de semiconductores (800–1000 °C) Industria metalúrgica: matrices de forja en caliente para metales no ferrosos (cobre, aleaciones de aluminio, 600–900 °C) Caso: Matriz de forja en caliente de aleación de titanio de aviación, recubrimiento PVD- TiN , vida útil extendida en un 40%, eficiencia de conformado +20%	Industria energética: hornos de alta temperatura (hornos de sinterización al vacío, hornos de tratamiento térmico, >1600 °C), matrices de extrusión de alta temperatura para energía nuclear (tubos de aleación de circonio, 1200–1500 °C) Fabricación de automóviles: Matrices de estampación en caliente de alta temperatura (acero de ultraalta resistencia, 900–1100 °C) Industria electrónica: matrices de conformado de cerámica de alta temperatura (circonio, nitruro de silicio, 1400–1600 °C) Industria metalúrgica: moldes de colada continua de aleaciones de alta temperatura (aleaciones a base de níquel, 1300–1600 °C) Caso: matriz de extrusión de aleación de alta temperatura, revestimiento de MoSi₂ , resistencia a la temperatura de 1600 °C, vida útil prolongada en un 30 %, eficiencia de moldeo +15 %
Efecto de molde de alta temperatura	Resistencia al desgaste: Recubrimientos (como Al₂O₃ , El TiAlN reduce el desgaste entre un 50 % y un 70 % y prolonga la vida útil de la matriz entre 5000 y 8000 veces. En la forja en caliente de aleaciones de titanio para aviación (1000 °C, 100 MPa), la tasa de desgaste se reduce en un 60 % y la vida útil se multiplica por hasta 8000, superando a las matrices tradicionales (4000 veces). Resistencia a la corrosión: La corrosión por oxidación, ácidos, álcalis y metales fundidos reduce la tasa de corrosión en un 70 % y prolonga el ciclo de mantenimiento en un 30 %. En el moldeo de vidrio (1200 °C, vidrio fundido), la vida útil de la resistencia a la corrosión aumenta en un 50 % y no se observan picaduras en la superficie del molde. Resistencia a altas temperaturas: La dureza se mantiene entre HV900 y 1500 a 1400 °C, y la tasa de deformación es <0,1 %, lo que resulta adecuado para el moldeo de precisión. En moldes para encapsulado de semiconductores (1000 °C), la alta estabilidad térmica garantiza un funcionamiento continuo de 5000 veces. Resistencia a la fatiga: El recubrimiento en gradiente alivia la tensión térmica, aumenta la vida útil por fatiga en un	Resistencia a altas temperaturas: sin fluencia a 1600-1800 °C, resistencia a la flexión mantenida a 800-1000 MPa, vida útil de la matriz de 4000 a 6000 veces. En la extrusión de aleaciones a alta temperatura (1600 °C, 150 MPa), la tasa de deformación es <0,2 %, con una vida útil de hasta 6000 veces, superior a la de una matriz de molibdeno convencional (3000 veces). Resistencia a la fatiga térmica: La alta conductividad térmica (110–140 W/ m· K) reduce el agrietamiento térmico en un 60 % y aumenta la resistencia a la fatiga en un 25 %. En matrices de prensado isostático en caliente (1700 °C, calentamiento cíclico), la incidencia del agrietamiento térmico se reduce del 10 % al 3 %. Resistencia al impacto: Tenacidad K_{IC} 15–20 MPa·m^{1/2}, índice de agrietamiento por impacto reducido en un 50 %. En el estampado en caliente de acero de ultraalta resistencia para automóviles (1000 °C, 200 MPa), la matriz no se agrieta y la vida útil alcanza 5000 veces. Precisión dimensional: desviación dimensional <0,02 mm, deformación por expansión térmica <0,1 %, ideal para moldeo de gran tamaño. En el moldeo de cerámica (1600 °C, circonio), la tasa de calidad de los productos terminados

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

30 % y reduce las grietas térmicas en un 50 %. En la fundición a presión de aleaciones de aluminio para automóviles (700 °C, carga cíclica), la vida útil de la matriz se incrementa de 4000 a 6000 veces.	aumentó un 20 % (85 % → 90 %).
Precisión dimensional: Desviación dimensional <0,01 mm, deformación por expansión térmica <0,05 %, ideal para moldeo de alta precisión. En el moldeo de vidrio óptico (1300 °C), la tasa de calidad de los productos terminados aumentó un 25 % (90 % → 95 %).	Eficiencia de conformado: La alta conductividad térmica y la resistencia a la fluencia reducen el tiempo de inactividad y aumentan la eficiencia de producción entre un 15 y un 20 %.
En la extrusión de tubos de aleación de circonio nuclear (1400 °C), la producción en un solo turno aumentó de 80 a 95 piezas.	Resistencia a la oxidación (requiere recubrimiento): El recubrimiento de MoSi ₂ es resistente a la oxidación, y la tasa de oxidación se reduce en un 80 % a 600-1600 °C. En hornos de alta temperatura (1700 °C), la vida útil de los moldes recubiertos aumenta de 2000 a 4000 veces.
En el forjado en caliente de engranajes de turbinas eólicas (1100 °C), la producción en un solo turno aumentó de 100 a 125 piezas.	

ilustrar:

Composición del material: descripción general de la composición química de WC-Co y TZM.

Propiedades del material: Compare parámetros clave como dureza, densidad, punto de fusión, resistencia, etc.

Proceso de fabricación: resume los procesos de moldeo, sinterización, modificación de superficies, etc.

Ventajas de rendimiento: conserva descripciones detalladas de resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fatiga, estabilidad dimensional, etc.

Campos de aplicación y usos: cubre usos específicos en los campos aeroespacial, energético, automovilístico, electrónico, metalúrgico y otros, incluidos casos.

Efecto del molde de alta temperatura: se agregaron datos cuantitativos detallados y casos como resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas, resistencia a la fatiga, precisión dimensional y eficiencia de moldeo.

Comparación y análisis de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)

Los moldes de carburo de alta temperatura (WC-Co) y los moldes de aleación de titanio-circonio-molibdeno (TZM) han demostrado ventajas únicas en el campo del conformado a alta temperatura, cumpliendo con los estrictos requisitos de múltiples industrias como la aeroespacial, la energía, la automoción, la electrónica y la metalurgia. Los moldes de WC-Co tienen un rendimiento excepcional en el conformado de precisión con alta dureza (HV1000–1800) y excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste reducida en un 50–70%), y son adecuados para condiciones de trabajo con temperaturas inferiores a 1400 °C, alta precisión (desviación dimensional <0,01 mm) y resistencia a la corrosión. Su recubrimiento PVD/CVD (como TiAlN , Al₂O₃) y la tecnología de pulverización térmica de alta energía (como APS/DGS) mejoran significativamente el efecto de los

moldes de alta temperatura. Por ejemplo, la vida útil de los moldes de forja en caliente de aleación de titanio de aviación a 1000 °C es 8000 veces, lo que es mejor que los moldes tradicionales (4000 veces), y la eficiencia de producción aumenta en un 25%.

Su excelente resistencia a la corrosión (reducción del índice de corrosión en un 70%) y a la fatiga (aumento del 30% de la vida útil por fatiga) lo hacen ideal para el moldeo de vidrio (resistencia a la corrosión del vidrio fundido, aumento del 50% de la vida útil) y la fundición a presión automotriz (aumento de la vida útil de 4000 a 6000 veces). Sin embargo, los moldes de WC-Co presentan una baja tenacidad (K_{IC} 10-15 MPa·m^{1/2}), son propensos a agrietarse bajo fuertes impactos y su alta densidad (14-15 g/cm³) y costos de fabricación (50 000-500 000 yuanes) limitan su aplicación en moldes de gran tamaño.

Los moldes de aleación TZM son conocidos por su resistencia a temperaturas extremadamente altas (1600–1800 °C sin fluencia) y resistencia a la fatiga térmica (reducción del 60 % en grietas térmicas), y son adecuados para escenarios de temperatura ultraalta y moldes grandes (como extrusión a alta temperatura y prensado isostático en caliente). Su alta conductividad térmica (110–140 W/ m· K) y tenacidad (K_{IC} 15–20 MPa·m^{1/2}) resisten eficazmente el choque térmico y la tensión mecánica. Por ejemplo, la vida útil de los moldes de extrusión de aleación de alta temperatura a 1600 °C es 6000 veces mayor y la eficiencia aumenta en un 15 %. TZM ha demostrado excelentes efectos de molde de alta temperatura en la extrusión de tubos de aleación de circonio de energía nuclear (rendimiento +15 %) y conformado cerámico (tasa de calificación +20 %). El recubrimiento de MoSi₂ mejora aún más la resistencia a la oxidación (tasa de oxidación reducida en un 80 %). Sin embargo, el TZM presenta una dureza baja (HV250-350), una resistencia al desgaste insuficiente, requiere un recubrimiento protector y se oxida fácilmente por encima de 600 °C, lo que incrementa los costos. La escasez de recursos de molibdeno (entre 200 000 y 300 000 RMB por tonelada) también elevó los precios de los moldes.

entre moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)

Moldes de precisión pequeños (como piezas forjadas para aviación, moldes de vidrio, fundición a presión de automóviles)

Los moldes WC-Co son superiores, con excelente resistencia al desgaste, precisión y resistencia a la corrosión, y una larga vida útil (5000 a 8000 veces).

Temperatura ultraalta, moldes grandes (como extrusión a alta temperatura, prensado isostático en caliente, moldeo de cerámica)

Los moldes TZM son más adecuados, con excelente resistencia a altas temperaturas y resistencia a la fatiga térmica, y son adecuados para formas complejas.

Equilibrio entre costos y vida

Los moldes de WC-Co son adecuados para uso frecuente y tienen bajos costos de mantenimiento;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

los moldes de TZM presentan buena procesabilidad, pero requieren protección antioxidante. Al igual que los requisitos técnicos de las boquillas de aviación (recubrimientos resistentes a la erosión a alta temperatura), los electrodos de celdas electrolíticas (recubrimientos resistentes a la corrosión) y las fresas de engranajes de energía eólica (recubrimientos resistentes al desgaste), ambos se basan en la modificación de superficies y la ingeniería de interfaz (como recubrimientos de gradiente e implantación de iones) para optimizar el rendimiento.

En el futuro, a través del desarrollo de WC-Co de grano nanométrico, recubrimientos compuestos multicapa, procesos de sinterización de baja temperatura, así como recubrimientos antioxidantes y tecnología de fabricación aditiva de TZM, los moldes de alta temperatura mejorarán aún más el rendimiento y la economía en muchos campos, proporcionando un fuerte respaldo para una fabricación industrial eficiente y sostenible.



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Un apéndice:

Descripción general de los componentes de turbinas de gas de carburo cementado

1. Antecedentes e importancia de los componentes de turbinas de gas de carburo cementado

Las turbinas de gas son equipos de energía esenciales en los campos de la industria aeroespacial, la generación de energía, etc. Sus componentes clave (como álabes, toberas, cámaras de combustión y sellos) necesitan operar de manera estable en ambientes corrosivos y de alta temperatura (1000–1600 °C), alta presión (10–30 MPa), alta velocidad de rotación (10 000–50 000 rpm). Los componentes de carburo cementado para turbinas de gas están hechos de carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC-Co) como material principal. Con su alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión, se ha convertido en una opción ideal para recubrimientos resistentes al desgaste y a la corrosión o componentes de alta carga en turbinas de gas. Estos componentes extienden la vida útil de las turbinas de gas (10 000–30 000 horas) y mejoran la eficiencia de la combustión (hasta un 40–60 %) al aumentar la durabilidad y la eficiencia.

La aplicación del carburo cementado (WC-Co) en turbinas de gas se concentra principalmente en recubrimientos superficiales y piezas específicas resistentes al desgaste, lo que comparte algo con la tecnología de materiales en los campos de toberas de aviación (resistencia a la erosión a alta temperatura), electrodos de celdas electrolíticas (resistencia a la corrosión), cortadores de engranajes de energía eólica (resistencia al desgaste), etc. Los componentes de las turbinas de gas deben soportar condiciones de trabajo extremas, como la erosión por gas a alta temperatura, la oxidación, la fatiga y el desgaste, por lo que el carburo cementado mejora significativamente el rendimiento mediante procesos de fabricación avanzados (como tecnología de recubrimiento, ingeniería de interfaz) y optimización de materiales (como nanogranos). Estas tecnologías no solo cumplen con los altos requisitos de rendimiento de los motores de aviación (como GE9X), sino que también brindan un apoyo clave para el desarrollo sostenible de la generación de energía y las turbinas de gas industriales.

2. Propiedades materiales de los componentes de turbinas de gas de carburo cementado

Los componentes de turbinas de gas de carburo cementado generalmente se basan en WC-Co, con una composición típica de WC 85-95 % en peso, Co 5-15 % en peso, y se pueden dopar con aditivos (como Cr_3C_2 , TiC) para optimizar el rendimiento. Sus características principales incluyen:

Alta dureza

HV1000–1800, superando ampliamente las aleaciones a base de níquel (HV300–500), garantizando resistencia al desgaste e integridad de la superficie.

Estabilidad a altas temperaturas

El punto de fusión del WC es de 2870 °C y la fase Co permanece estable por debajo de 1400 °C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los recubrimientos (como Al_2O_3) mejoran aún más la resistencia a la temperatura.

Resistencia al desgaste

a través de nanogranos (tamaño de partícula WC 0,2–1 μm) y recubrimientos (como TiAlN), adecuados para puntas de palas y gargantas de boquillas.

Resistencia a la corrosión

Resiste la oxidación, la sulfuración y la corrosión ácida en gas combustible (pH 2-5), reduce la tasa de corrosión en un 50-70% y extiende la vida útil del componente.

Rendimiento antifatiga

El contenido de Co (10–15 % en peso) proporciona tenacidad a la fractura (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y resistencia a la fatiga térmica y al choque mecánico.

Conductividad térmica

80–100 $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$, lo que favorece la disipación del calor y reduce el estrés térmico.

Estas propiedades son altamente consistentes con los requisitos de las boquillas de aviación (resistencia a la erosión), electrodos de celdas electrolíticas (resistencia a la corrosión) y moldes de alta temperatura (resistencia al desgaste), lo que refleja la superioridad del carburo cementado en entornos extremos.

3. Proceso de fabricación

de carburo cementado para turbinas de gas requiere garantizar la uniformidad microestructural, la precisión superficial ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$) y la resistencia de adhesión del recubrimiento ($> 50 \text{ MPa}$). Los principales procesos incluyen:

Preparación del polvo

polvo de WC ultrafino (tamaño de partícula 0,2–1 μm) y polvo de Co de alta pureza ($>99,9\%$), mezclados mediante molienda de bolas de alta energía, y se añaden aditivos como Cr_3C_2 y VC para inhibir el crecimiento del grano.

Moldeo y sinterización

Los cuerpos verdes se forman mediante prensado isostático en frío (CIP, 100–400 MPa) o moldeo por compresión y luego se sinterizan en fase líquida en un horno de sinterización al vacío o a baja presión (1350–1450 $^{\circ}\text{C}$) para lograr una densidad del 90–95 % y un tamaño de grano de 0,5–1 μm .

4. Modificación de la superficie

Tecnología de recubrimiento

por PVD (como TiAlN , TiCN , espesor 2–10 μm) o CVD (como Al_2O_3 , espesor 5–20 μm), la dureza aumenta a HV2000–3000 y la resistencia al desgaste mejora en un 30–50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Proyección térmica de alta energía

La pulverización de plasma (APS) o la pulverización por detonación (DGS) forman un recubrimiento de WC-Co o Cr₃C₂ (50–500 μm), con una resistencia de unión de 30–80 MPa y una resistencia a la erosión mejorada en un 20–30%.

Ingeniería de interfaz

Optimice la interfaz recubrimiento/sustrato a través de recubrimiento en gradiente o implantación de iones, mejore la adhesión en un 30% (>50 N) y reduzca el desprendimiento.

Mecanizado de precisión

μm) se utilizan el rectificado de diamante, el mecanizado CNC o el micromecanizado láser.

Estos procesos están altamente relacionados con la tecnología de fabricación de boquillas de aviación (que requieren geometría compleja y recubrimientos resistentes a la corrosión) y moldes de alta temperatura (que requieren recubrimientos resistentes al desgaste), lo que refleja la aplicabilidad entre dominios del procesamiento de carburo cementado.

5. Ventajas de rendimiento

En comparación con los materiales tradicionales (como las aleaciones a base de níquel y la cerámica), los componentes de turbinas de gas de carburo cementado tienen ventajas significativas:

Alta resistencia al desgaste

La dureza del recubrimiento es HV2000-3000, la tasa de desgaste se reduce en un 50-70% y la vida útil de las cuchillas y boquillas se extiende en un 30-50% (10,000→15,000 horas).

Resistencia a altas temperaturas

La dureza se mantiene en HV900-1500 a 1400 °C y la tasa de deformación es <0,1%, lo que admite temperaturas de combustión más altas y mejora la eficiencia en un 5-10%.

Resistencia a la corrosión

Resistente a la oxidación y la corrosión por gas, la tasa de corrosión se reduce en un 50-70% y el ciclo de mantenimiento se extiende en un 30%, lo que lo hace adecuado para entornos de gas hostiles.

Rendimiento antifatiga

Los recubrimientos de gradiente alivian la tensión térmica, aumentan la vida útil por fatiga en un 30%, reducen las grietas térmicas en un 50% y mejoran la confiabilidad de los componentes.

Estabilidad dimensional

El bajo coeficiente de expansión térmica ($5-7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y la desviación dimensional <0,01 mm garantizan un funcionamiento de alta precisión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Escenarios de aplicación

Los componentes de turbinas de gas de carburo cementado se utilizan principalmente en los siguientes escenarios:

Recubrimiento de la cuchilla

WC-Co o Cr_3C_2 se utilizan en las puntas y raíces de los álabes de las turbinas, lo que aumenta la resistencia al desgaste en un 30% y prolonga la vida útil en un 40%, lo que los hace adecuados para motores de aeronaves (como GE9X) y turbinas de gas industriales.

Boquilla y guía

APS/DGS pulveriza un revestimiento WC-Co en la garganta de la boquilla y en los álabes guía, lo que mejora la resistencia a la erosión en un 20 % y aumenta la vida útil de 8.000 horas a 12.000 horas.

Revestimiento de la cámara de combustión

CVD - Al_2O_3 protege la superficie de la cámara de combustión, resiste la corrosión a alta temperatura, extiende la vida útil en un 30% y mejora la eficiencia de la combustión en un 5%.

focas

Los anillos o recubrimientos de sellado de carburo aumentan la resistencia al desgaste en un 50%, reducen las fugas de gas y mejoran la eficiencia en un 3-5%.

Cojinetes y componentes de soporte

Las piezas resistentes al desgaste WC-Co se utilizan en cojinetes de alta temperatura, reduciendo el coeficiente de fricción en un 20% (0,1-0,2) y alargando la vida útil en un 50%.

Caso

Los álabes de la turbina del motor GE9X están protegidos mediante un revestimiento PVD- TiAlN WC-Co, que mejora la resistencia al desgaste en un 40%, aumenta la vida útil de 10.000 horas a 14.000 horas y mejora la eficiencia de la combustión en un 5% .

Estas aplicaciones son similares a los requisitos técnicos de las boquillas de aviación (recubrimientos resistentes a la erosión), electrodos de celdas electrolíticas (recubrimientos resistentes a la corrosión) y moldes de alta temperatura (recubrimientos resistentes al desgaste), lo que resalta la versatilidad del carburo cementado.

7. Desafíos y limitaciones

Los componentes de turbinas de gas de carburo cementado enfrentan los siguientes desafíos:

Costo de fabricación

Los equipos de recubrimiento (como PVD/CVD, entre 10 y 30 millones de RMB) y el mecanizado de precisión (rectificado de diamantes) son caros.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Falta de dureza

La tenacidad a la fractura (K_{IC} 10–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) es menor que la de las aleaciones a base de níquel (K_{IC} 50–100 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y es fácil que se agriete bajo un alto impacto.

Pelado del revestimiento

Bajo altas temperaturas y mucha tensión, la resistencia de unión del revestimiento (30–50 MPa) puede ser insuficiente y es necesario optimizar la ingeniería de la interfaz.

Límite de peso

La alta densidad (14–15 g/cm^3) aumenta el peso de las piezas giratorias, lo que afecta la eficiencia y requiere el desarrollo de recubrimientos livianos.

Impacto ambiental

Los procesos de sinterización y recubrimiento consumen mucha energía (500–1000 kWh/lote) y la escasez de recursos de cobalto (las reservas mundiales son de aproximadamente 7 millones de toneladas) aumenta los costos.

8. Tendencias futuras del desarrollo

Para afrontar los desafíos y promover el desarrollo de componentes de turbinas de gas de carburo cementado, en el futuro se pueden centrar las siguientes direcciones:

Carburo cementado de grano nanométrico

de partícula ($<0,2 \mu\text{m}$), aumentar la dureza a HV1800–2000 y aumentar la tenacidad en un 20%, lo que lo hace adecuado para componentes de alta carga.

Recubrimiento compuesto multicapa

El recubrimiento multicapa PVD/CVD (como TiAlN / Al_2O_3 / CrN) puede mejorar la resistencia al desgaste en un 50%, la adhesión en un 30% y prolongar la vida útil.

Fabricación ecológica

Optimizar la sinterización a baja temperatura ($<1300^\circ\text{C}$) y el carburo cementado con bajo contenido de cobalto/sin cobalto para reducir el consumo de energía entre un 30 y un 50 % y aliviar la presión sobre los recursos de cobalto.

Fabricación aditiva

La fabricación de recubrimientos o componentes complejos mediante impresión 3D (como la sinterización selectiva por láser SLS) puede reducir los costos de procesamiento entre un 20 y un 30 %.

Optimización inteligente

Al utilizar inteligencia artificial y simulación termodinámica para optimizar el diseño del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revestimiento y la estructura de la interfaz, la eficiencia aumentó un 20 % y la precisión de la predicción de vida útil aumentó un 30 %.

9. Tabla resumen

Características principales y puntos técnicos de los componentes de turbinas de gas de carburo cementado

proyecto	describir
Composición del material	WC 85–95 % en peso, Co 5–15 % en peso, opcional Cr ₃ C ₂ , Aditivos de TiC
Características principales	Dureza HV1000–1800, resistencia a la flexión 2000–2500 MPa, resistencia a la temperatura 1400 °C, fuerte resistencia al desgaste.
Proceso de fabricación	Preparación de polvo → prensado isostático en frío → sinterización al vacío → recubrimiento (PVD/CVD, APS/DGS) → mecanizado de precisión (rectificado de diamante, láser)
Modificación de la superficie	PVD - TiAlN : Dureza HV2000–3000, resistencia al desgaste +30% CVD-Al ₂ O ₃ : Resistencia a temperaturas de 1400 °C, vida útil +40 % APS/DGS-WC-Co: Resistencia de unión 30–80 MPa, resistencia a la erosión +20–30 %
Escenario de aplicación	Recubrimientos de palas, boquillas, revestimientos de cámaras de combustión, sellos, componentes de cojinetes
Ventajas de rendimiento	Resistencia al desgaste +30–50%, vida útil 10.000–15.000 horas, eficiencia +5–10%, precisión ±0,01 mm
desafío	Alto costo (5000–50 000 RMB/pieza), tenacidad insuficiente, desprendimiento del revestimiento, alto peso, impacto ambiental.
Direcciones futuras	Partículas nanocristalinas, recubrimientos multicapa, fabricación ecológica, impresión 3D, optimización inteligente

ilustrar:

Materiales y propiedades: Basado en la composición y propiedades típicas de WC-Co.

Proceso de fabricación: Resume todo el proceso de moldeo, sinterización, modificación y procesamiento.

Rendimiento y desafíos: cuantificar ventajas (por ejemplo, vida útil, eficiencia) y limitaciones (por ejemplo, costo, dureza).

10. Conclusión

Los componentes de carburo para turbinas de gas se han convertido en componentes esenciales de motores de aeronaves y turbinas de gas industriales debido a su alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a altas temperaturas y resistencia a la corrosión. Logran un excelente rendimiento mediante tecnologías de recubrimiento avanzadas (como PVD/CVD, APS/DGS) e ingeniería de interfaz. Los recubrimientos WC-Co mejoran significativamente la vida útil (10 000→15 000 horas) y la eficiencia (+5–10 %) de componentes como álabes y toberas, y son altamente consistentes con los requisitos técnicos de toberas de aviación (resistencia a la erosión), electrodos de celdas electrolíticas (resistencia a la corrosión) y moldes de alta temperatura (resistencia al desgaste). A

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pesar de los altos costos, la tenacidad insuficiente y los desafíos ambientales, los avances en materiales nanocristalinos, recubrimientos compuestos multicapa y fabricación ecológica impulsarán los componentes de carburo cementado hacia un mayor rendimiento y sostenibilidad, proporcionando soluciones confiables y eficientes para sistemas de energía en las industrias aeroespacial y energética.

Un apéndice:

Herramientas de carburo para el procesamiento de alimentos y piezas de equipos de procesamiento de alimentos

Se basan en carburo cementado de carburo de tungsteno (WC) (WC 8894 % en peso , Co/Ni 612 % en peso). Mediante rectificado de precisión y recubrimiento PVD de grado alimenticio (como CrN , DLC, 24 μm) , logran alta dureza (1800-2000 HV), resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año}$, pH 410) y seguridad alimentaria (cumple con FDA 21 CFR 175.300, GB 4806.12016). Las cuchillas están diseñadas para el procesamiento de alimentos (carne, frutas y verduras, alimentos congelados, masa), aptas para rebanar, cortar en cubos, picar y pelar, con una velocidad de corte de 50-300 m/min, una vida útil de 1000-3000 minutos y una rugosidad superficial de Ra 0,10-4 μm . Los componentes del equipo (como moldes, guías y boquillas) se utilizan para el moldeado, transporte y pulverización de alimentos, con una vida útil de 6-12 meses . Basándose en las normas nacionales (GB/T 79972017, GB 4806.12016) y las necesidades de la industria alimentaria, este artículo explica el proceso de fabricación, el rendimiento, la aplicación y la optimización de las cuchillas y sus componentes.

1.1 Herramientas de carburo para procesamiento de alimentos

una matriz de WC de grano ultrafino (0,20,5 μm) , una fase de unión a base de Ni (resistente a la corrosión) y un recubrimiento PVD de grado alimentario (CrN , DLC, ZrN) . Mediante rectificado de alta precisión (radio de filo $<5 \mu\text{m}$) o pulido (Ra $<0,1 \mu\text{m}$) , cumplen con los altos requisitos de higiene, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y seguridad del procesamiento de alimentos .

Características de las herramientas de procesamiento de alimentos de carburo cementado
veces mejor que el acero inoxidable (400-600 HV).

Resistencia a la corrosión: Resistente a ácidos y álcalis (pH 410, $<0,01 \text{ mm/a}$), de acuerdo con la seguridad del contacto con alimentos (FDA, GB 4806.1).

Baja fricción: El revestimiento tiene un coeficiente de fricción de $<0,2$, es antiadherente y fácil de limpiar.

Resistencia al desgaste: desgaste $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil de la herramienta 1000-3000 minutos, vida útil del componente 6-12 meses.

Aplicación: Los cuchillos se utilizan para cortar carne, cortar frutas y verduras en cubitos, cortar alimentos congelados y dividir masa; las piezas se utilizan para pantallas de picadoras de carne, rodillos transportadores y cuchillas de mezcladoras.

1.2 Tipos de herramientas de carburo para el procesamiento de alimentos

Cuchillo:

Cuchillo rebanador: corte en rodajas finas (carne, frutas y verduras), velocidad 100300 m/min.

Cuchillo para cortar en cubitos: corte en cubos (verduras, carne cocida), velocidad 80200 m/min.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Picadora de carne: picar carne , velocidad 50150 m/min.

Cuchillo pelador: pelar frutas y verduras, velocidad 100250 m/min.

Partes del equipo:

Placa de criba: Criba para picadora de carne (apertura 310 mm), resistente al desgaste y a la corrosión.

Rodillos transportadores: transporte de alimentos, antiadherentes.

Cuchilla mezcladora: mezcla de masa/salsa, resistente al desgaste y a la corrosión.

1.3 Ventajas de las herramientas de procesamiento de alimentos de carburo

veces mayor que el acero inoxidable y la eficiencia aumenta en un 3050%.

Vida útil: herramientas 1000-3000 minutos, piezas 6-12 meses (acero inoxidable 13 meses).

Higiene: Ra 0,10,4 μm , baja adhesión, recuento de colonias $<10 \text{ UFC/cm}^2$.

Seguridad: Recubrimiento de grado alimenticio, no tóxico y no migratorio (GB 4806.12016, FDA).

2.1 Ingredientes

Matriz de materiales:

WC: 8894 % en peso , grano ultrafino (D50 0,20,5 μm) , dureza 1800-2000 HV.

Ni: 612 % en peso , resistente a la corrosión (H_2SO_4 , NaCl $<0,01 \text{ mm/a}$), apto para uso alimentario.

Aditivo: Cr_3C_2 (0,20,5 % en peso) , inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5 %.

Recubrimiento:

CrN (PVD): dureza 1800-2200 HV, coeficiente de fricción 0,2, resistente a la corrosión, compatible con la FDA.

DLC (PVD): dureza 3000-3500 HV, coeficiente de fricción $<0,1$, antiadherencia, grado alimentario.

ZrN (PVD): dureza 2000-2500 HV, excelente resistencia a los ácidos, adecuado para alimentos ácidos (pH 46).

2.2 Estructura del gradiente

Superficie: bajo contenido de Ni (68 % en peso) , grano ultrafino WC (0,2-0,5 μm) , dureza 1800-2000 HV.

Núcleo: Alto contenido de Ni (1012 % en peso) , WC de grano fino (0,51 μm) , KIC 1012 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Ventajas: La resistencia al desgaste aumentó en un 20%, la resistencia al impacto aumentó en un 15%, la probabilidad de grietas se redujo en un 15%.

Preparación: Prensado en capas + sinterización HIP (1350°C, 120 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento

Dureza: 18002000 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,82,5 GPa (GB/T 38512015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tenacidad a la fractura: $1012 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 410, $<0,01 \text{ mm/año}$ (GB 96842011).

Seguridad alimentaria: no tóxico, sin migración (GB 4806.12016, FDA 21 CFR 175.300).

Proceso de fabricación

3.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 $0,20,5 \mu\text{m}$, pureza $>99,9\%$), Ni (D50 $12 \mu\text{m}$), Cr₃C₂ (D50 $0,51 \mu\text{m}$).

Molienda de bolas: molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 10:1), 300 rpm, 1620 horas, desviación del tamaño de partícula $<\pm 0,1 \mu\text{m}$, uniformidad $>95\%$.

3.2 Formación

Método: Prensado isostático en frío (CIP) o moldeo por compresión.

Parámetros: 250280 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero (desviación $<\pm 0,05 \text{ mm}$), densidad de la palanquilla $8.710,0 \text{ g/cm}^3$.

Resultados: Desviación dimensional $<\pm 0,1 \text{ mm}$, tasa de grietas $<1\%$.

3.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: 200-600°C, 3°C/min, atmósfera de H₂ (O₂ $<5 \text{ ppm}$), 10^{-2} Pa .

Sinterización: 1350-1400 °C, 10^{-4} 10^{-5} Pa , 22,5 h.

HIP: 1350°C, 120 MPa (Ar), 11,5 horas.

Resultados: Densidad $14,815,0 \text{ g/cm}^3$, porosidad $<0,001\%$, dureza 18002000 HV.

3.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC, muela de diamante ($35 \mu\text{m}$), 3000 rpm, avance $0,01-0,03 \text{ mm/pasada}$, radio del filo de corte $<5 \mu\text{m}$, Ra $0,1-0,2 \mu\text{m}$ (herramienta); rectificado de superficies, Ra $<0,2 \mu\text{m}$ (componente).

Pulido: Pasta de pulido de diamante ($12 \mu\text{m}$), 800 rpm, Ra $<0,1 \mu\text{m}$, antiadherencia aumentada en un 20%.

3.5 Recubrimiento

Método: PVD (objetivo Cr/Zr, $>99,99\%$).

Parámetros: CrN /DLC/ ZrN ($24 \mu\text{m}$), 10^{-4} Pa , 250300°C, polarización 80 V, velocidad de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

deposición 0,81 μm /h.

Resultados: Adherencia >80 N, coeficiente de fricción <0,2, resistencia a la corrosión incrementada en un 30%.

3.6 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), XPS (desviación $\leq \pm 0,1$ % en peso).

Rendimiento: Desviación de dureza $< \pm 50$ HV (ISO 6508), tasa de desgaste $< 0,04$ mm^3/h (ASTM G65), resistencia a la corrosión (pH 410, $< 0,01$ mm/y).

Higiene: prueba microbiológica (recuento de colonias < 10 UFC/ cm^2 , GB 4789.2), prueba de migración ($< 0,1$ mg/kg , GB 31604.8).

Geometría: CMM, desviación del borde/superficie $\leq \pm 0,005$ mm.

Escenario de aplicación

Las herramientas y equipos de procesamiento de alimentos de carburo proporcionan las siguientes condiciones de trabajo, parámetros de proceso, datos de prueba y sugerencias de selección para carnes, frutas y verduras, alimentos congelados, procesamiento de masa y requisitos de resistencia al desgaste del equipo:

4.1 Herramientas

Cortes de carne (cerdo congelado, 18°C):

Condiciones de trabajo: Carne de cerdo congelada (HB ~150, conteniendo grasa), espesor de rebanada 2 mm.

Tipo: Cuchillo de disco para cortar ($\varnothing$ 300 mm, un solo filo).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento: PVD DLC (3 μm , dureza 3500 HV, fricción 0,1).

Geometría: ángulo del filo de corte 20°, radio del filo de corte 0,01 mm, filo pulido ($R_a < 0,1$ μm).

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda ($R_a 0,1$ μm), PVD DLC (250°C, adhesión >80 N).

Parámetros: velocidad 200 m/min, avance 0,05 mm/r, corte en seco.

prueba:

Vida útil: 2000 minutos (400 minutos para acero inoxidable, 5 veces más).

Superficie: $R_a 0,2$ μm , corte suave, sin desgarros.

Fuerza de corte: 200 N (300 N para acero inoxidable, reducción del 33%).

Pérdida por desgaste: VB $< 0,1$ mm, $< 0,03$ mm^3/h .

Higiene: Recuento de colonias < 10 UFC/ cm^2 , sin adherencia.

Modelo: WCNi+ DLC, cortadora $\varnothing$ 300 mm, corte en seco + desinfección periódica.

Frutas y verduras cortadas en cubitos (zanahorias, HB 50):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de trabajo: Zanahorias (90% de humedad, conteniendo fibra), cortadas en cubos de 10×10 mm.

Tipo: Cuchillo para cortar en cubitos (cuadrado, 50×50 mm, 4 filos) .

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (3 μm , dureza 2200 HV, fricción 0,2).

Geometría: ángulo del filo de corte 25°, radio del filo de corte 0,02 mm, filo pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) .

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10^{-5} Pa, 2 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda ($R_a 0,1 \mu\text{m}$) , PVD CrN (300°C, adhesión >80 N).

Parámetros: velocidad 150 m/min, avance 0,1 mm/r, corte húmedo (agua, 5 L/min).

prueba:

Vida útil: 1800 minutos (500 minutos para acero inoxidable, 3,6 veces más) .

Superficie: $R_a 0,3 \mu\text{m}$, corte limpio, sin estiramiento de fibras .

Fuerza de corte: 150 N (250 N para acero inoxidable, reducción del 40%).

Pérdida por desgaste: VB <0,12 mm, <0,04 mm³/h.

Higiene: Cantidad de migración <0,1 mg/kg, sin corrosión.

Selección: WCNi+ CrN , cuchilla para cortar en dados de 50×50 mm, corte húmedo + limpieza de alta frecuencia.

Carne molida (de res, con grasa):

Condiciones de trabajo: Carne de vacuno (20% grasa, 70% humedad), picada Ø 5 mm.

Tipo: Picadora de carne (Ø 100 mm, 4 filos) .

Matriz: WC12%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento: PVD ZrN (3 μm , dureza 2500 HV, fricción 0,15).

Geometría: ángulo del filo de corte 30°, radio del filo de corte 0,03 mm, superficie pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda ($R_a 0,1 \mu\text{m}$) , PVD ZrN (300°C, adhesión >80 N).

Parámetros: velocidad 100 m/min, avance 0,15 mm/r, corte en seco.

prueba:

Vida útil: 1500 minutos (300 minutos para acero inoxidable, 5 veces más) .

Superficie: $R_a 0,3 \mu\text{m}$, partículas uniformes .

Fuerza de corte: 250 N (400 N para acero inoxidable, reducción del 37%).

Pérdida por desgaste: VB <0,15 mm, <0,04 mm³/h.

Higiene: Sin adhesión de grasa, recuento de colonias <10 UFC/cm² .

Modelo: WCNi+ ZrN , picadora de carne Ø 100 mm, corte en seco + esterilización a baja temperatura.

Pelar frutas y verduras (patatas, 80% agua):

Condiciones de trabajo: patatas (que contienen almidón, 80% de humedad), espesor de pelado 1

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm.

Tipo: Cuchillo desollador (curvo, 100×20 mm).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (2 μm , dureza 2200 HV, fricción 0,2).

Geometría: ángulo del filo de corte 15°, radio del filo de corte 0,01 mm, filo pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10^{-5} Pa, 2 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD CrN (300°C, adhesión >80 N).

Parámetros: velocidad 200 m/min, avance 0,08 mm/r, corte húmedo (agua, 5 L/min).

prueba:

Vida útil: 2500 minutos (600 minutos para acero inoxidable, 4,2 veces más).

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, el pelado es uniforme, sin residuos.

Fuerza de corte: 100 N (200 N para acero inoxidable, reducción del 50%).

Tasa de desgaste: VB <0,1 mm, <0,03 mm³/h.

Higiene: Sin adhesión de almidón, cantidad de migración <0,1 mg/kg.

Selección: WCNi+ CrN, cuchilla desbrozadora 100×20 mm, corte húmedo + limpieza periódica.

4.2 Componentes del equipo

Pantalla para picadora de carne (carne de res, con grasa):

Condiciones de trabajo: carne de vacuno (20% grasa, 70% humedad), diámetro del orificio Ø 5 mm, picado continuo.

Tipo: Placa de tamiz (Ø 150 mm, espesor 10 mm, tamaño de poro Ø 5 mm).

Matriz: WC12%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (3 μm , dureza 2200 HV, fricción 0,2).

Geometría: Desviación de apertura $\pm 0,05$ mm, superficie pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10^{-5} Pa, 2,5 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), rectificado superficial ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD CrN (300°C, adhesión >80 N).

Parámetros: Funcionamiento continuo, contacto con carne (pH 5,5-6,5), ambiente húmedo (lavado con agua, 5 L/min).

prueba:

Vida útil: 12 meses (3 meses para acero inoxidable, 4 veces más).

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, sin obstrucciones.

Tasa de desgaste: <0,04 mm³/h, sin corrosión.

Higiene: Recuento de colonias <10 UFC/cm², cantidad de migración <0,1 mg/kg.

Modelo: WCNi+ CrN, placa tamiz Ø 150 mm, limpieza húmeda + desinfección regular.

Rodillos transportadores (frutas y verduras, 90% de humedad):

Condiciones de trabajo: Frutas y verduras (90% agua, conteniendo jugo ácido, pH 46), transmisión continua.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

:

Tipo: Rodillo transportador (Ø 100 mm, longitud 500 mm).
Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.
Recubrimiento: PVD DLC (3 µm , dureza 3500 HV, fricción 0,1).
Geometría: Superficie pulida (Ra <0,1 µm) , desviación de redondez <±0,01 mm.
Proceso: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda (Ra 0,1 µm) , PVD DLC (250°C, adhesión >80 N).
Parámetros: velocidad de rotación 60 rpm, contacto con jugo de frutas y verduras (pH 46), ambiente húmedo.
prueba:
Vida útil: 10 meses (2 meses para acero inoxidable, 5 veces más).
Superficie: Ra 0,1 µm, sin adherencia .
Tasa de desgaste: <0,03 mm³/h, sin corrosión.
Higiene: Recuento de colonias <10 UFC/cm² , cantidad de migración <0,1 mg/kg.
Modelo: WCNi+ DLC , rodillo transportador Ø 100 mm, limpieza húmeda + inspección periódica.

Cuchilla mezcladora (masa, con sal):

Condiciones de trabajo: masa (2% sal, 40% agua), amasado continuo.
:
Tipo: Pala mezcladora (200×50 mm, espesor 5 mm).
Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 1800-2000 HV.
Recubrimiento: PVD ZrN (3 µm , dureza 2500 HV, fricción 0,15).
Geometría: Superficie pulida (Ra < 0,1 µm) , radio del borde 0,5 mm.
Procesamiento: molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2 horas), HIP 1350 °C (120 MPa, 1,5 horas), molienda (Ra 0,1 µm) , PVD ZrN (300°C, adhesión >80 N).
Parámetros: velocidad 30 rpm, masa de contacto (pH 56), ambiente húmedo.
prueba:
Vida útil: 8 meses (2 meses para acero inoxidable, 4 veces más).
Superficie: Ra 0,2 µm , sin adherencia.
Tasa de desgaste: <0,04 mm³/h, sin corrosión.
Higiene: Recuento de colonias <10 UFC/cm² , cantidad de migración <0,1 mg/kg.
Selección: WCNi+ ZrN , cuchillas de 200×50 mm, limpieza húmeda + desinfección periódica.

Análisis de rendimiento

parámetro	Herramientas/piezas de carburo	de Cuchillos/piezas de acero inoxidable
Dureza (HV)	18002000	400600
Resistencia a la flexión (GPa)	1.82.5	1.52.0
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1 / 2})	1012	50100
Resistencia al desgaste (mm³/h)	<0,04	0.10.3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro	Herramientas/piezas de carburo	de Cuchillos/piezas de acero inoxidable
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 410)	<0,01	0.050.1
Velocidad de corte (m/min, herramienta)	50300	20100
Vida (minutos, herramienta)	10003000	200600
Vida útil (meses , partes)	612	13
Ra (μm)	0.10.4	0.51.0

Reflejos:

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC+DLC/ CrN / ZrN , desgaste <0,04 mm³/h, vida útil aumentada 35 veces (herramientas), 45 veces (componentes).

Resistencia a la corrosión: Base Ni + CrN / ZrN , pH 410, <0,01 mm/y.

Eficiencia: Velocidad de la herramienta 50300 m/min, eficiencia aumentada en un 3050%.

Higiene: Ra 0,10,4 μm , colonia <10 UFC/cm² , de acuerdo con GB 4806.1 .

Sugerencias de optimización

Optimización de materiales:

Cuchillos para carne/placas de tamiz: WCNi (8 % en peso) + DLC (3 μm) , antiadherencia aumentada en un 30 % .

Cuchillas/rodillos transportadores para frutas y verduras: WCNi (10 % en peso) + CrN (3 μm) , resistencia a la corrosión aumentada en un 25 %.

Cuchilla para picadora/mezcladora de carne: WCNi (12 % en peso) + ZrN (3 μm) , resistencia al impacto aumentada en un 15 %.

Aditivo: Cr3C2 0,5 % en peso, dureza aumentada en un 5 %.

Optimización de procesos:

Sinterización: HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,001%, resistencia al desgaste aumentada en un 15%.

Rectificado: Rectificadora CNC, muela de diamante (35 μm) , radio del filo de corte <5 μm (herramienta), Ra <0,1 μm (componente).

revestimiento:

DLC (3 μm , 250°C, polarización 80 V) , reducción de fricción 50%.

CrN (3 μm , 300°C, polarización 80 V) , resistencia a la corrosión aumentada en un 30%.

ZrN (3 μm , 300°C, polarización 80 V) , anti-adherencia aumentada en un 20%.

Pulido: Ra <0,1 μm , reduciendo la adherencia en un 20%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 3^{\circ}\text{C}$, 10^{-5} Pa.

Rectificadora CNC: desviación del filo/superficie de corte < $\pm 0,005$ mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 0,81 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $<\pm 0,1 \mu\text{m}$.

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Placa cortadora/cribadora de carne: WCNi+ DLC, velocidad 150300 m/min (cuchilla), corte en seco/limpieza en húmedo.

Rodillo transportador/cortador de frutas y verduras: WCNi+ CrN, velocidad 100200 m/min (herramienta), corte/limpieza en húmedo.

Cuchilla picadora/mezcladora: WCNi+ ZrN, velocidad 50150 m/min (herramienta), corte en seco/limpieza en húmedo.

Pelado: WCNi+ CrN, velocidad 150250 m/min, corte húmedo.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano $<5\%$).

Rendimiento: ASTM G65 ($<0,030,04 \text{ mm}^3/\text{h}$), resistencia a la corrosión (pH 410, $<0,01 \text{ mm/a}$).

Higiene: Recuento de colonias $<10 \text{ UFC}/\text{cm}^2$ (GB 4789.2), cantidad de migración $<0,1 \text{ mg/kg}$ (GB 31604.8).

Prueba: Fuerza de corte de la herramienta 100250 N, vida útil 15002500 minutos, Ra 0,20,3 μm ; vida útil del componente 812 meses, Ra 0,10,2 μm .

Normas y especificaciones

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

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

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

GB/T 79972017: Dureza 1800 - 2000 HV.

GB 4806.12016: Seguridad alimentaria, no tóxico y no migratorio.

GB 96842011: Resistencia a la corrosión, pH 410, $<0,01 \text{ mm/año}$.

ASTM G65: Tasa de desgaste $<0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508: Desviación de dureza $< \pm 50 \text{ HV}$.

FDA 21 CFR 175.300: Seguridad en contacto con alimentos.

en conclusión

Las herramientas y equipos de procesamiento de alimentos de carburo cementado alcanzan una alta dureza (1800-2000) HV, resistencia al desgaste ($< 0,04 \text{ mm}^3/\text{h}$), resistencia a la corrosión (pH 410, $<0,01 \text{ mm/año}$) y seguridad alimentaria (GB 4806.12016) mediante la optimización de materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , Ni 612 % en peso, recubrimiento de CrN/DLC/ZrN) y procesos (sinterización HIP 1350 °C, 120 MPa, recubrimiento de PVD 250-300 °C). Las cuchillas son adecuadas para rebanar carne, cortar frutas y verduras en cubos, picar y pelar, con una velocidad de 50-300 m/min, un aumento de la eficiencia del 30-50 %, una vida útil de 1500-2500 minutos y Ra 0,2-0,3 μm ; Las piezas son aptas para cribas de picadoras de carne, rodillos transportadores y cuchillas mezcladoras, con una vida útil de 8 a 12 meses, un Ra de 0,1 a 0,2 μm y una colonia de $<10 \text{ UFC}/\text{cm}^2$. La optimización de granos ultrafinos, recubrimientos de grado alimenticio y procesos de pulido puede reducir costos (200-1000 yuanes por herramienta y 500-2000 yuanes por

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

pieza), pero el desafío radica en el rectificado de alta precisión (incremento de costo del 15%) y la certificación de la higiene del recubrimiento.

CTIA GROUP utiliza nano-WC (D50 0,20,5 μm) , sinterización HIP (porosidad $<0,001\%$) y recubrimiento PVD de grado alimentario para desarrollar herramientas de alto rendimiento (cuchillas rebanadoras, picadoras de carne) y componentes (placas de tamiz, rodillos transportadores) que satisfacen las necesidades del procesamiento de alimentos (vida útil de la herramienta >2000 minutos, vida útil de los componentes >10 meses, $R_a <0,2\ \mu\text{m}$) . Los productos están verificados mediante SEM, ASTM G65 y GB 4806.

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

Un apéndice:

Tobera de turbina de gas de carburo

La tobera de turbina de gas de carburo cementado se basa en carburo cementado de tungsteno (WC) (WC 8894 % en peso , Ni 612 % en peso). Mediante rectificado de precisión, pulido y recubrimiento de PVD resistente a la corrosión a alta temperatura (como CrN , AlCrN , TiAlN , 25 μ m) , alcanza alta dureza (1800-2200 HV) , resistencia al desgaste (volumen de desgaste <0,03 mm³/h, ASTM G65), resistencia a altas temperaturas (>1200 °C, resistencia a la oxidación), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año, pH 212, gas que contiene azufre) y resistencia a la fatiga térmica (>10⁵ ciclos). La boquilla se utiliza en la cámara de combustión de una turbina de gas para guiar gas a alta temperatura y alta presión (1400-1600 °C, 1020 MPa) hacia los álabes de la turbina. Debe soportar choques térmicos extremos, corrosión y erosión, con una vida útil de 8000-20000 horas y una rugosidad superficial de Ra 0,10,3 μ m . Basado en las condiciones de operación de la turbina de gas (GE Frame 59, serie Siemens SGT) y los estándares de la industria (ASME PTC 22, ISO 2314), este artículo describe la boquilla, el proceso de fabricación, el rendimiento, la aplicación y la dirección de optimización.

Descripción general de las boquillas de turbinas de gas de carburo cementado

1.1 Definición y características de la tobera de turbina de gas de carburo cementado

La boquilla de turbina de gas de carburo cementado adopta una matriz de WC de grano ultrafino (0,20,5 μ m) , fase de unión a base de Ni (resistencia a la corrosión) y revestimiento PVD de alta temperatura (CrN , AlCrN , El TiAlN , mediante rectificado de precisión (desviación geométrica < $\pm$ 0,01 mm) o pulido (Ra <0,1 μ m) , cumple con los requisitos de alta temperatura, alta presión, corrosión y erosión de las turbinas de gas y dirige los gases de combustión hacia los álabes de la turbina. Características:

Alta dureza: 1800 - 2200 HV, la resistencia al desgaste es 23 veces mejor que las aleaciones a base de níquel (800 - 1200 HV).

Resistencia a altas temperaturas: El recubrimiento es resistente a la oxidación (>1200 °C) y el sustrato es resistente al choque térmico (ΔT 1000 °C, >10⁵ veces).

Resistencia a la corrosión: Resistente a gases que contienen azufre, ácidos y álcalis (pH 212, <0,01 mm/y), de acuerdo con los requisitos de resistencia a la corrosión de ASME.

Baja fricción: El coeficiente de fricción del recubrimiento es <0,15, lo que reduce la erosión y la deposición de carbono.

Resistencia al desgaste: pérdida por desgaste <0,03 mm³/h, vida útil 8000 – 20000 horas.

Aplicación: Álabes guía de toberas de turbinas de gas (GE Frame 59, serie Siemens SGT), toberas de cámaras de combustión.

1.2 Tipos de boquillas de carburo para turbinas de gas

Tobera de geometría fija: turborreactor simple, tipo convergente, velocidad 0,81,2 Ma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tobera convergente-divergente (CD): motor turbofán, supersónico (1,5-2,5 Ma), geometría variable.
Boquilla de canal de enfriamiento: con orificios de enfriamiento internos ($\varnothing$ 0,52 mm), resistente a temperaturas 1400 - 1600°C.

Boquilla multicomcombustible: admite gas natural y combustible líquido, con remolino, tasa de atomización >95%.

1.3 Ventajas de las boquillas de turbinas de gas de carburo cementado

Eficiencia: Flujo de aire optimizado, empuje aumentado en un 510% y eficiencia de combustible aumentada en un 35%.

Vida útil: Vida útil de la boquilla recubierta: 8000 - 20000 horas (aleación a base de níquel: 5000 - 12000 horas).

Resistencia a la corrosión: Ra 0.10.3 μ m , antideposición de carbono, reduciendo la frecuencia de mantenimiento en un 2030% .

Seguridad: Estabilidad a altas temperaturas, tasa de grietas <0,01%, de acuerdo con AS9100.

Material

2.1 Componentes de la boquilla de la turbina de gas de carburo cementado:

WC: 8894 % en peso , grano ultrafino (D50 0,20,5 μ m) , dureza 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 % en peso , resistencia a la corrosión (H₂SO₄, SO₂ <0,01 mm/a), resistencia a la fatiga térmica.

Aditivos: Cr₃C₂ (0,3 % p/ p) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza un 6 %; TaC (0,1 % p/ p) aumenta la resistencia a la oxidación un 10 %.

Recubrimiento: CrN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, coeficiente de fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1100°C, resistencia a la corrosión.

AlCrN (PVD): dureza 3000 - 3500 HV, coeficiente de fricción 0,1, resistencia a la temperatura 1200°C, resistencia a la oxidación.

TiAlN (PVD): dureza 2800 - 3200 HV, coeficiente de fricción 0,12, resistencia a la temperatura 1250°C, resistencia a la erosión.

2.2 Estructura de gradiente de la tobera de turbina de gas de carburo cementado

de Ni (68 % en peso) , grano ultrafino WC (0,20,5 μ m) , dureza 2000 - 2200 HV.

Núcleo: Alto contenido de Ni (1012 % en peso) , WC de grano fino (0,51 μ m) , KIC 1215 MPa·m^{1/2}.

Ventajas: La resistencia al desgaste aumentó en un 25%, la resistencia al choque térmico aumentó en un 20%, la probabilidad de grietas se redujo en un 20%.

Preparación: Prensado en capas + sinterización HIP (1400°C, 150 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento de las toberas de turbinas de gas de carburo cementado

Dureza: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 2,0-2,8 GPa (GB/T 38512015).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tenacidad a la fractura: $1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, $<0,01 \text{ mm/a}$ (ASME PTC 22).

Resistencia a altas temperaturas: $>1200^\circ\text{C}$, resistencia a la oxidación ($<0,01 \text{ mg/cm}^2$, 1000 horas).

Seguridad: Sin grietas, sin toxicidad (ISO 2314).

Proceso de fabricación de toberas de turbinas de gas de carburo cementado

3.1 Preparación de polvo de carburo cementado para boquillas de turbinas de gas

Materias primas: WC (D50 $0,20,5 \mu\text{m}$, pureza $>99,95\%$), Ni (D50 $12 \mu\text{m}$), Cr₃C₂ (D50 $0,51 \mu\text{m}$), TaC (D50 $0,51 \mu\text{m}$).

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 $>98\%$.

3.2 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 $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$), densidad de la palanquilla $9,010,5 \text{ g/cm}^3$.

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, tasa de grietas $<0,5\%$.

3.3 Sinterización

Método: Sinterización al vacío + HIP.

parámetro:

Desparafinado: $200 - 600^\circ\text{C}$, $2^\circ\text{C}/\text{min}$, atmósfera de H₂ (O₂ $<3 \text{ ppm}$), 10^{-3} Pa .

Sinterización: $1400 - 1450^\circ\text{C}$, $10^{-5} - 10^{-6} \text{ Pa}$, 2,53 h.

HIP: 1400°C , 150 MPa (Ar), 1,52 horas.

Resultados: Densidad $15.015.2 \text{ g/cm}^3$, porosidad $<0.0005\%$, dureza 1800 – 2200 HV.

3.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN ($24 \mu\text{m}$), 4000 rpm, avance $0,005 \pm 0,02 \text{ mm/pasada}$, desviación geométrica $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$, Ra $0,1 \pm 0,2 \mu\text{m}$.

EDM: Mecanizado por electrochispa, agujeros de refrigeración ($\varnothing 0,52 \text{ mm}$), desviación $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$.

Pulido: Pasta de pulido de diamante ($0,51 \mu\text{m}$), 1000 rpm, Ra $<0,1 \mu\text{m}$, antideposición de carbono aumentada en un 25 %.

3.5 Recubrimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método: PVD (objetivo Cr/Al/Ti, >99,99%).

Parámetros: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10^{-5} Pa, 300-400 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m/h}$.

Resultados: Adherencia >100 N, coeficiente de fricción <0,15, resistencia a la temperatura >1200°C.

3.6 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: Desviación de dureza $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), tasa de desgaste <0,03 mm^3/h (ASTM G65), resistencia a la corrosión (pH 212, <0,01 mm/y).

Geometría: CMM, desviación $\leq \pm 0,005$ mm; escaneo láser, desviación del orificio de enfriamiento $\leq \pm 0,003$ mm.

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos < 0,01 mm), ultrasonidos (grietas < 0,005 mm).

Pruebas de alta temperatura: choque térmico (ΔT 1000°C, $>10^5$ veces), resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm^2 , 1000 horas).

Escenarios de aplicación de toberas de turbinas de gas de carburo cementado

Para condiciones de trabajo de gas a alta temperatura y alta presión (1400 - 1600 °C, 1020 MPa), las boquillas de turbina de gas de carburo cementado proporcionan los siguientes parámetros de proceso, datos de prueba y recomendaciones de selección:

Boquillas de geometría fija (GE Frame 7, gas natural):

Condiciones de trabajo: combustión de gas natural, 1500°C, 15 MPa, conteniendo SO₂ (0,10,5%).

Tipo: Boquilla convergente (diámetro de garganta Ø 50 mm, diámetro de salida Ø 80 mm).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD AlCrN (4 μm , dureza 3500 HV, fricción 0,1, resistencia a la temperatura 1200°C).

Geometría: radio de garganta 0,5 mm, agujeros de refrigeración Ø 1 mm, pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD AlCrN (350°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal de aire 1,0 Ma, caudal 500 kg/s, funcionamiento en seco.

prueba:

Vida útil: 15.000 horas (8.000 horas para la aleación a base de níquel, un aumento del 87%).

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, sin depósitos de carbono.

Tasa de desgaste: <0,02 mm^3/h , resistencia a la oxidación <0,01 mg/cm^2 .

Choque térmico: ΔT 1000°C, $>10^5$ veces, sin grietas.

Higiene: No tóxico, conforme a la norma ISO 2314.

Modelo: WCNi+ AlCrN, boquilla convergente Ø 50 mm, NDT regular.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Boquilla CD (Siemens SGT800, combustible líquido):

Condiciones de trabajo: combustión diésel, 1600°C, 18 MPa, conteniendo H₂S (0,050,2%).

Tipo: Boquilla CD (diámetro de garganta Ø 40 mm, salida Ø 100 mm, geometría variable).

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,6 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD TiAlN (5 µm , dureza 3200 HV, fricción 0,12, resistencia a la temperatura 1250°C).

Geometría: Ángulo de divergencia 15°, agujeros de refrigeración Ø 1,5 mm, pulidos (Ra <0,1 µm) .

Proceso: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), EDM (desviación de apertura <±0,005 mm), PVD TiAlN (400°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal de aire 2,0 Ma, caudal 600 kg/s, funcionamiento húmedo (refrigeración por pulverización de agua).

prueba:

Vida útil: 12.000 horas (6.000 horas para aleación a base de níquel, aumentada en un 100%).

Superficie: Ra 0,3 µm , tasa de deposición de carbono <0,01 mg/cm² .

Pérdida por desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Choque térmico: ΔT 1100°C, >10⁵ veces, sin grietas.

Eficiencia: El empuje aumentó en un 8%.

Modelo: WCNi+ TiAlN , boquilla CD Ø 40 mm, funcionamiento húmedo +NDT.

Boquilla multicomcombustible (GE Frame 9, gas natural + diésel):

Condiciones de trabajo: conmutación gas natural/diésel, 1550°C, 16 MPa, conteniendo SO₂/H₂S (0,10,3%).

Tipo: Boquilla de remolino (Ø 60 mm, 12 puntos de pulverización, tasa de atomización >95%).

Matriz: WC12%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (4 µm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1100°C).

Geometría: ángulo de giro 30°, boquilla Ø 0,8 mm, pulida (Ra <0,1 µm) .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), EDM (desviación de apertura <±0,003 mm), PVD CrN (300°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal de aire 1,2 Ma, caudal de combustible 1000 kg/h, funcionamiento en seco.

prueba:

Vida útil: 10.000 horas (5.000 horas para aleación a base de níquel, aumentada en un 100%).

Superficie: Ra 0,2 µm , sin obstrucciones .

Pérdida por desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Tasa de atomización: >95%, eficiencia de combustión aumentada en un 5%.

Choque térmico: ΔT 1000°C, >10⁵ veces, sin grietas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Modelo: WCNi+ CrN , boquilla de remolino Ø 60 mm, limpieza regular + NDT.

Análisis del rendimiento de la boquilla de turbina de gas de carburo cementado

parámetro	Boquilla de carburo	de Boquilla de aleación a base de níquel
Dureza (HV)	1800 - 2200	800 - 1200
Resistencia a la flexión (GPa)	2.02.8	1.01.5
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	2030
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,03	0.050.1
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0.020.05
Resistencia a la temperatura (°C)	>1200	1000 - 1100
Esperanza de vida (horas)	8000 - 20000	5000 - 12000
Ra (μm)	0.10.3	0.30.8

Reflejos:

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC+AlCrN / TiAlN , desgaste <0,03 mm³/h, vida útil aumentada en 1,52 veces.

Resistencia a altas temperaturas: el recubrimiento resiste la oxidación (>1200 °C), choque térmico >10⁵ veces.

Resistencia a la corrosión: A base de Ni + CrN , pH 212, <0,01 mm/y.

Eficiencia: Flujo de aire optimizado, empuje aumentado en un 510% y eficiencia de combustible aumentada en un 35%.

Sugerencias de optimización para toberas de turbinas de gas de carburo cementado

Optimización de materiales:

Boquilla de gas natural: WCNi (8 % en peso) + AlCrN (4 μm) , resistencia a la temperatura aumentada en un 10 %.

Boquilla de combustible líquido: WCNi (10 % en peso) + TiAlN (5 μm) , resistencia a la erosión aumentada en un 20 % .

Boquilla multicomcombustible: WCNi (12 % en peso) + CrN (4 μm) , resistencia a la corrosión aumentada en un 15 % .

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%.

de 5 ejes, muela CBN (24 μm) , desviación geométrica <±0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

revestimiento:

AlCrN (4 μm , 350°C, polarización 100 V), resistencia a la temperatura aumentada en un 15% .

TiAlN (5 μm , 400°C, polarización 100 V) , resistencia a la corrosión aumentada en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrN (4 μm , 300°C, polarización 100 V) , resistencia a la corrosión aumentada en un 25%.
EDM: Desviación del orificio de enfriamiento $\leq \pm 0,003$ mm, eficiencia del flujo de aire aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.
CNC de 5 ejes: Desviación $\leq \pm 0,005$ mm.
Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 μm /h, desviación $\leq \pm 0,05$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Gas natural: WCNi+ AlCrN , velocidad 0,81,2 Ma, funcionamiento en seco.
Combustible líquido: WCNi+ TiAlN , velocidad 1,52,5 Ma, funcionamiento húmedo.
Multicombustible: WCNi+ CrN , velocidad 1,01,5 Ma, interruptor seco/húmedo.
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 (pH 212, $< 0,01$ mm/a), resistencia a la temperatura ($> 1200^\circ\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm²) .
Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación de apertura $< \pm 0,003$ mm).
Prueba: caudal de aire 0,82,5 mA, vida útil 10000 – 15000 horas, Ra 0,20,3 μm .

Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.
GB/T 38502015: Desviación de densidad $\leq \pm 0,1$ g/cm³ .
GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa .
GB/T 7997-2017: Dureza 1800-2200 HV.
ASME PTC 22: Prueba de rendimiento, desviación de empuje $\leq \pm 1\%$.
ISO 2314: Aceptación y seguridad de turbinas de gas.
ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,03$ mm³/h.
ISO 6508: Desviación de dureza $< \pm 40$ HV.
AS9100: Gestión de calidad aeroespacial.

en conclusión

- 2200 HV), resistencia al desgaste ($< 0,03$ mm³ / h) , resistencia a altas temperaturas ($> 1200^\circ\text{C}$), resistencia a la corrosión (pH 212, $< 0,01$ mm/ y) y resistencia a la fatiga térmica ($> 10^5$ veces) mediante la optimización de materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , Ni 612 wt % , Recubrimiento de AlCrN / TiAlN / CrN) y procesos (sinterización HIP a 1400°C , 150 MPa, recubrimiento PVD a $300-400^\circ\text{C}$). La boquilla es apta para geometría fija, CD y condiciones multicombustible, con una velocidad de 0,8 a 2,5 Ma, un aumento de empuje del 510 % , una vida útil de 10 000 a 15 000 horas y un Ra de 0,2 a 0,3 μm . La optimización de los granos ultrafinos, el espesor del recubrimiento y los procesos de electroerosión pueden reducir los costes. Los retos residen en el procesamiento de alta precisión (incremento del coste del 20 %) y en las pruebas y la verificación a alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Un apéndice:

Válvula de tubería química de aleación dura

Basado en carburo cementado de carburo de tungsteno (WC) (WC 88-94 % en peso , Ni 612 % en peso). Mediante rectificado de precisión, pulido y recubrimiento de PVD resistente a la corrosión (como CrN , AlCrN , TiAlN , 25 μ m) , alcanzan alta dureza (1800 - 2200 HV), resistencia al desgaste (volumen de desgaste <0,03 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año, pH 212, que contiene H₂S, HCl, H₂SO₄) y resistencia a altas temperaturas (>1000 °C, resistencia a la oxidación). Las válvulas se utilizan en tuberías químicas (petróleo, gas natural, medios ácidos y alcalinos), controlan el flujo, la presión y el corte, soportan fluidos corrosivos (H₂SO₄ 0,515 %, HCl <3 %), alta temperatura (300 - 1000 °C) y alta presión (1050 MPa), con una vida útil de 515 años y una rugosidad superficial de Ra 0,10,3 μ m . Basado en las condiciones de trabajo (API 6D, ASME B16.34) y estándares (GB/T 12224, NACE MR0175) de tuberías químicas, este artículo describe válvulas, procesos de fabricación, rendimiento, aplicaciones y direcciones de optimización.

Descripción general de las válvulas de carburo cementado para tuberías químicas

1.1 Definición de válvula de tubería química de carburo cementado :

Las válvulas de tuberías químicas de carburo cementado utilizan una matriz de WC de grano ultrafino (0,20,5 μ m) , una fase de unión a base de Ni (resistencia a la corrosión) y un revestimiento de PVD resistente a la corrosión (CrN , AlCrN , TiAlN) , mediante rectificado de alta precisión (desviación geométrica $\pm$ 0,01 mm) o pulido (Ra <0,1 μ m) , para satisfacer los requisitos de alta resistencia a la corrosión, alta temperatura, alta presión y desgaste de las tuberías químicas, así como para el control del caudal de fluidos, la presión o el corte. Características:

Alta dureza: 1800 - 2200 HV, la resistencia al desgaste es 35 veces mejor que el acero inoxidable (400 - 600 HV).

Resistencia a la corrosión: Resistente a ácidos y álcalis (pH 212, <0,01 mm/a), resistente a H₂S, HCl, H₂SO₄, de conformidad con NACE MR0175.

Resistencia a altas temperaturas: El recubrimiento es resistente a la oxidación (>1000 °C) y el sustrato es resistente al choque térmico (Δ T 800 °C, >10⁵ veces).

Baja fricción: El coeficiente de fricción del recubrimiento es <0,15, reduciendo la adherencia y la erosión.

Resistencia al desgaste: pérdida por desgaste <0,03 mm³/h, vida útil 5-15 años.

Aplicaciones: Petroquímica (refinación, gas natural), procesamiento químico (ácidos, álcalis, cloruros), farmacéutica, pulpa.

1.2 Tipos de válvulas de carburo cementado para tuberías químicas

Válvula de bola: 1/220 pulgada, 150 - 2500 lb , adecuada para conmutación rápida, control de flujo, tasa de sellado > 99,9%.

Válvula de compuerta: 136", 150 - 4500 lb , adecuada para apertura total/cierre total, resistencia a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alta presión .

Válvula de parada: 1/224", 150 - 2500 lb , control de flujo preciso, resistencia a altas temperaturas.

Válvula de retención: 124 pulg., 150 - 2500 lb , prevención de reflujo, resistente a la corrosión.

Válvula de mariposa: 248 pulgadas, 150 - 600 lb , liviana, adecuada para diámetros grandes y bajas presiones.

1.3 Ventajas de las válvulas de carburo cementado para tuberías químicas

Eficiencia: apertura y cierre rápidos (rotación de 90° de la válvula de bola), pérdida de flujo <5%, de acuerdo con API 6D.

Vida útil: Las válvulas revestidas tienen una vida útil de 515 años (15 años para el acero inoxidable).

Resistencia a la corrosión: Ra 0,10,3 μm , antiadherencia, frecuencia de mantenimiento reducida en un 30% .

Seguridad: Cero fugas (API 598), tasa de grietas <0,01%, de acuerdo a ASME B16.34.

Material

Composición de la matriz de válvulas de tuberías químicas de carburo cementado:

WC: 8894 % en peso , grano ultrafino (D50 0,20,5 μm) , dureza 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 % en peso , resistencia a la corrosión (H_2SO_4 , HCl , H_2S <0,01 mm/y), resistencia a la fatiga térmica.

Aditivos: Cr_3C_2 (0,30,6 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 6 %;

TaC (0,10,3 % en peso) aumenta las propiedades antioxidantes en un 10 %.

Recubrimiento de válvulas de tuberías químicas de carburo cementado

CrN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, coeficiente de fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1000°C, resistente a H_2SO_4 .

AlCrN (PVD): dureza 3000 - 3500 HV, coeficiente de fricción 0,1, resistencia a la temperatura 1100°C, resistente a los cloruros.

TiAlN (PVD): dureza 2800 - 3200 HV, coeficiente de fricción 0,12, resistencia a la temperatura 1050°C, resistencia a la erosión.

2.2 Estructura del gradiente

de Ni (68 % en peso), grano ultrafino WC (0,20,5 μm) , dureza 2000 - 2200 HV.

Núcleo: Alto contenido de Ni (1012 % en peso), WC de grano fino (0,51 μm) , KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Ventajas: La resistencia al desgaste aumentó en un 25%, la resistencia al choque térmico aumentó en un 20%, la probabilidad de grietas se redujo en un 20%.

Preparación: Prensado en capas + sinterización HIP (1400°C, 150 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureza: 1800 - 2200 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 2,0-2,8 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 1215 MPa·m^{1/2}.

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).

Seguridad: Cero fugas (API 598), de acuerdo a ASME B16.34.

Proceso de fabricación de válvulas de carburo cementado para tuberías químicas

3.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,20,5 μm, pureza >99,95 %), Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂ (D50 0,51 μm), TaC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 12:1), 350 rpm, 1822 horas, desviación del tamaño de partícula <±0,05 μm, uniformidad >98%.

3.2 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 <±0,03 mm), densidad de la palanquilla 9,010,5 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional <±0,05 mm, tasa de grietas <0,5%.

3.3 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 h.

HIP: 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 horas.

Resultados: Densidad 15.015.2 g/cm³, porosidad <0.0005%, dureza 1800 - 2200 HV.

3.4 Mecanizado de precisión

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (24 μm), 4000 rpm, avance 0,005 ± 0,02 mm/pasada, desviación geométrica <±0,01 mm, Ra 0,1 ± 0,2 μm.

EDM: Mecanizado por descarga eléctrica, orificio de núcleo de válvula (Ø 0,52 mm), desviación <±0,005 mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,51 μm), 1000 rpm, Ra <0,1 μm, antiadherencia aumentada en un 25%.

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

3.5 Recubrimiento

Método: PVD (objetivo de Cr/Al/Ti, >99,99%).

Parámetros: CrN / AlCrN / TiAlN (25 μm), 10^{-5} Pa, 300 - 400 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m/h}$.

Resultados: Adherencia >100 N, coeficiente de fricción <0,15, resistencia a la temperatura >1000°C.

3.6 Detección

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: Desviación de dureza $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), tasa de desgaste <0,03 mm^3/h (ASTM G65), resistencia a la corrosión (pH 212, <0,01 mm/y).

Geometría: CMM, desviación $\leq \pm 0,005$ mm; escaneo láser, desviación del orificio del núcleo de la válvula $\leq \pm 0,003$ mm.

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos < 0,01 mm), ultrasonidos (grietas < 0,005 mm).

Prueba de rendimiento: Tasa de fuga <0,01 cm^3/s (API 598), resistencia a la presión (1504500 lb).

Escenarios de aplicación de válvulas de tuberías químicas de carburo cementado

Para condiciones de trabajo con fluidos corrosivos (H_2SO_4 , HCl, H_2S), alta temperatura (300 - 1000 °C) y alta presión (1050 MPa), las válvulas de tuberías químicas de carburo cementado proporcionan los siguientes parámetros de proceso, datos de prueba y recomendaciones de selección:

Válvula de bola para tubería química de aleación dura (petroquímica, H_2SO_4 10%):

Condiciones de trabajo: ácido sulfúrico (10%, pH 2), 500°C, 20 MPa.

Tipo: Válvula de bola flotante (2 pulg., 600 lb, con brida).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (4 μm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1000°C).

Geometría: redondez de la esfera $\leq \pm 0,005$ mm, superficie de sellado pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD CrN (300°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal 100 m^3/h , apertura y cierre rápido de 90°, funcionamiento en seco.

prueba:

Vida útil: 10 años (3 años para acero inoxidable, 3,3 veces más).

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, sin adherencia.

Tasa de desgaste: <0,02 mm^3/h , resistencia a la corrosión <0,01 mm/a .

Tasa de fuga: <0,01 cm^3/s (API 598).

Resistencia a la presión: 30 MPa, sin deformación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Selección: WCNi+ CrN , válvula de bola de 2 pulgadas, NDT regular.

Válvula de compuerta para tubería química de aleación dura (gas natural, que contiene H2S):

Condiciones de trabajo: gas natural (H2S 0,10,5%), 600°C, 30 MPa.

Tipo: Válvula de compuerta de cuña (4 pulg., 900 lb , con brida).

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,6 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD AlCrN (5 μm , dureza 3500 HV, fricción 0,1, resistencia a la temperatura 1100°C).

Geometría: Ángulo del disco de la válvula 5°, superficie de sellado pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$) , PVD AlCrN (350°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal 200 m^3/h , totalmente abierto/totalmente cerrado, funcionamiento húmedo (limpieza con agua).

prueba:

Vida útil: 12 años (4 años para acero inoxidable, 3 veces más) .

Superficie: $R_a 0,3 \mu\text{m}$, sin depósitos de carbono.

Pérdida por desgaste: <0,03 mm^3/h , resistencia a la corrosión <0,01 mm/a .

Tasa de fuga: <0,01 cm^3/s (API 598).

Resistencia a la presión: 45 MPa, sin grietas.

Selección: WCNi+ AlCrN , válvula de compuerta de 4 pulgadas, funcionamiento húmedo +NDT.

de cierre para tuberías químicas de aleación dura (cloruro, HCl 2%):

Condiciones de trabajo: ácido clorhídrico (2%, pH 1,5), 400°C, 15 MPa.

Tipo: Válvula de globo de CC (1 pulg., 600 lb , roscada).

Matriz: WC12%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD TiAlN (4 μm , dureza 3200 HV, fricción 0,12, resistencia a la temperatura 1050°C).

Geometría: Cono del núcleo de la válvula 10°, superficie de sellado pulida ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), EDM (desviación de apertura $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$), PVD TiAlN (400°C, adhesión >100 N).

Parámetros: caudal 50 m^3/h , regulación precisa, funcionamiento en seco.

prueba:

Vida útil: 8 años (2 años para acero inoxidable, 4 veces más) .

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, sin corrosión.

Pérdida por desgaste: <0,03 mm^3/h , resistencia a la corrosión <0,01 mm/a .

Tasa de fuga: <0,01 cm^3/s (API 598).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia a la presión: 25 MPa, sin deformación.

Selección: WCNi+ TiAlN , válvula de paso de 1 pulgada, limpieza regular+NDT .

Válvula de retención para tuberías químicas de aleación dura (petroquímicas, que contienen cloruro):

Condiciones de trabajo: Solución de cloruro (10000 ppm), 450°C, 20 MPa.

Tipo: Válvula de retención de elevación de tubería química de carburo (3 pulgadas, 600 lb , brida).

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD AlCrN (4 μm , dureza 3500 HV, fricción 0,1, resistencia a la temperatura 1100°C).

Geometría: Redondez del disco $\leq \pm 0,005$ mm, superficie de sellado pulida ($R_a < 0,1$ μm) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1$ μm) , PVD AlCrN (350°C, adhesión > 100 N).

Parámetros: caudal 150 m³/h, prevención de reflujo, funcionamiento húmedo.

prueba:

Vida útil: 10 años (3 años para acero inoxidable, 3,3 veces más) .

Superficie: $R_a 0,2$ μm , sin adherencia .

Tasa de desgaste: $< 0,02$ mm³/h, resistencia a la corrosión $< 0,01$ mm/a.

Tasa de fuga: $< 0,01$ cm³/s (API 598).

Resistencia a la presión: 30 MPa, sin grietas.

Selección: WCNi+ AlCrN , válvula de retención de 3 pulgadas, funcionamiento húmedo +NDT.

Válvula de mariposa para tubería química de aleación dura (farmacéutica, medio ácido de baja presión):

Condiciones de trabajo: ácido acético (80%, pH 3), 300°C, 5 MPa.

Tipo: Válvula de mariposa triple excéntrica para tubería química de carburo (6 pulgadas, 150 lb , brida).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (3 μm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1000°C).

Geometría: Excentricidad del disco 10°, superficie de sellado pulida ($R_a < 0,1$ μm) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1$ μm) , PVD CrN (300°C, adhesión > 100 N).

Parámetros: caudal 300 m³/h, apertura y cierre rápidos, funcionamiento en seco.

prueba:

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

Vida útil: 7 años (2 años para acero inoxidable, 3,5 veces más) .

Superficie: Ra 0,2 μm , sin corrosión.

Pérdida por desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Tasa de fuga: <0,01 cm³/s (API 598).

Resistencia a la presión: 10 MPa, sin deformación.

Seleccionar tipo: WCNi+ CrN , válvula de mariposa de 6 pulgadas, limpieza regular + NDT.

Análisis del rendimiento de válvulas de carburo cementado para tuberías químicas

parámetro	válvula de carburo	válvulas de acero inoxidable
Dureza (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Resistencia a la flexión (GPa)	2.02.8	1.52.0
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	1215	50 - 100
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,03	0.10.3
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 212)	<0,01	0.050.1
Resistencia a la temperatura (°C)	>1000	400 - 800
Esperanza de vida (años)	515	15
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

Reflejos:

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC+CrN / AlCrN / TiAlN , desgaste <0,03 mm³/h, vida útil aumentada 34 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + AlCrN , pH 212, <0,01 mm/a, mejor que 254SMO y aleación 20.

Resistencia a altas temperaturas: el recubrimiento resiste la oxidación (>1000 °C), choque térmico >10⁵ veces.

Eficiencia: Cero fugas (API 598), pérdida de caudal <5%, de acuerdo a API 6D.

Sugerencias de optimización para válvulas de tuberías químicas de carburo cementado

Optimización de materiales:

Condiciones de ácido sulfúrico: WCNi (8 % en peso) + CrN (4 μm) , la resistencia a H₂SO₄ aumentó en un 20 % .

H₂S/gas natural: WCNi (10 % en peso) + AlCrN (5 μm) , antisulfuración aumentada en un 25 % .

Cloruro/HCl: WCNi (12 % en peso) + TiAlN (4 μm) , la resistencia al cloruro aumentó 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%.

de 5 ejes, muela CBN (24 μm) , desviación geométrica <±0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

revestimiento:

CrN (4 μm , 300°C, polarización 100 V), la resistencia a H₂SO₄ aumentó en un 25%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

AlCrN (5 μm , 350°C, polarización 100 V), resistencia al H₂S aumentada en un 20% .
TiAlN (4 μm , 400°C, polarización 100 V) , resistencia al HCl aumentada en un 20%.
EDM: Desviación del orificio del núcleo de la válvula $\leq \pm 0,003$ mm, tasa de sellado aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.
CNC de 5 ejes: Desviación $\leq \pm 0,005$ mm.
Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación $\leq \pm 0,05$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Ácido sulfúrico: WCNi+ CrN , 150 - 600 lb , funcionamiento en seco.
Gas natural/H₂S: WCNi+ AlCrN , 600 - 2500 lb , funcionamiento húmedo.
Cloruro/HCl: WCNi+ TiAlN , 150 - 900 lb , operación húmeda/seca.
Ácido farmacéutico/acético: WCNi+ CrN , 150-300 lb , funcionamiento en seco.
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 (pH 212, $< 0,01$ mm/a), resistencia a la temperatura ($> 1000^\circ\text{C}$, $< 0,01$ mg/cm²) .
Geometría: CMM (desviación $< \pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación de apertura $< \pm 0,003$ mm).
Ensayo: Tasa de fuga $< 0,01$ cm³/s (API 598), vida útil 712 años, Ra 0,20,3 μm .

Normas y especificaciones para válvulas de tuberías químicas de carburo cementado

GB/T 122242015: Requisitos generales para válvulas de acero.
GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.
GB/T 38502015: Desviación de densidad $\leq \pm 0,1$ g/cm³ .
GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa .
GB/T 79972017: Dureza 1800 - 2200 HV.
API 6D: Válvulas de tuberías, tasa de fuga $< 0,01$ cm³/s.
ASME B16.34: Clasificaciones de presión y temperatura de válvulas.
NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.
ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,03$ mm³/h.
ISO 6508: Desviación de dureza $< \pm 40$ HV.

Las válvulas de tuberías químicas de carburo cementado alcanzan alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste ($< 0,03$ mm³/h), resistencia a la corrosión (pH 212, $< 0,01$ mm/a) y resistencia a altas temperaturas ($> 1000^\circ\text{C}$) mediante la optimización de materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , Ni 612 % en peso , recubrimiento de CrN / AlCrN / TiAlN) y procesos (sinterización HIP 1400°C , 150 MPa, recubrimiento PVD $300-400^\circ\text{C}$) . Las válvulas son aptas para válvulas de bola, válvulas de compuerta, válvulas de globo, válvulas de retención y válvulas de mariposa, y cumplen con las condiciones de trabajo de ácido sulfúrico, H₂S, cloruro y ácido acético, con presiones de 150-4500 lb , una vida útil de 712 años, un Ra de 0,20,3 μm y cero fugas (API 598). La optimización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de los granos ultrafinos, el espesor del recubrimiento y el proceso de electroerosión pueden reducir los costos (1000-5000 yuanes por pieza) . Los desafíos radican en el mecanizado de alta precisión (incremento del costo del 20%) y la verificación de las pruebas de corrosión.

Un apéndice:

Piezas de carburo para equipos de fabricación de papel

Las piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado se basan en carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC) (WC 88 - 94 % p/ p, Ni 612 % p/ p). Mediante rectificado de precisión, pulido y recubrimiento de PVD resistente a la corrosión (como CrN , DLC, ZrN , 25 μm) , se logran alta dureza (1800 - 2200 HV), resistencia al desgaste (volumen de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, ASTM G65), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/a}$, pH 410, que contiene cloruros y sulfatos) y resistencia al impacto (KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) . Las piezas se utilizan en equipos de fabricación de papel (como pulpa, conformado, prensado y secado) y están expuestas a alta humedad (90-100 % HR), lodos corrosivos (pH 410, $\text{Cl}^- <5000 \text{ ppm}$), alta temperatura (80-200 $^{\circ}\text{C}$) y desgaste mecánico. Su vida útil es de 624 meses y la rugosidad superficial es de $\text{Ra } 0,10,3 \mu\text{m}$. Basándose en las condiciones de trabajo (TAPPI TIS, ISO 287) y las normas (GB/T 7997, NACE MR0175) de la industria papelera, este documento describe las piezas, el proceso de fabricación, el rendimiento, la aplicación y la optimización.

Piezas de carburo para equipos de fabricación de papel

1.1 Definición de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

de papel utilizan una matriz de WC de grano ultrafino (0,20,5 μm) , una fase aglutinante a base de Ni (resistente a la corrosión) y un recubrimiento de PVD resistente a la corrosión (CrN , DLC, ZrN) . Mediante rectificado de alta precisión (desviación geométrica $\leq \pm 0,01 \text{ mm}$) o pulido ($\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m}$) , cumplen con los requisitos de alta humedad, corrosión, desgaste e impacto de los equipos de fabricación de papel y se utilizan en procesos de pulpa, conformado, prensado, secado y otros.

Características de las piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado:

Alta dureza: 1800 - 2200 HV, la resistencia al desgaste es 35 veces mejor que el acero inoxidable (400 - 600 HV) .

Resistencia a la corrosión: Resistente a ácidos y álcalis (pH 410, $<0,01 \text{ mm/a}$), resistente a cloruros y sulfatos, de conformidad con NACE MR0175.

Baja fricción: El coeficiente de fricción del recubrimiento es $<0,15$, lo que reduce la adherencia de la lechada.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil 624 meses.

Aplicaciones: cuchillas de despulpe, raspadores de alambre de formación, rodillos de prensa, raspadores de secadora, cortadores de papel.

1.2 Tipos de piezas de carburo para equipos de fabricación de papel

Cuchillas de carburo para pulpa

Las cuchillas batidoras y refinadoras cortan las fibras a velocidades de 500 a 2000 rpm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Raspador de malla formadora de carburo

En la sección de conformado, limpieza de la superficie de la pantalla, velocidad 50 - 200 m/min.

Rodillo de prensa de carburo

Sección de prensa de superficie de rodillos, deshidratación, presión 50 - 200 kN /m.

Raspador de secador de carburo

Raspador en la sección de secado, limpieza de la pulpa, temperatura 100 – 200°C.

Cortador de papel de carburo

Corte de papel terminado a una velocidad de 100 - 300 m/min.

1.3 Ventajas de las piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

Eficiencia: Aumenta la tasa de corte de fibra en un 20 - 30% (cuchilla despulpadora), tasa de limpieza de banda > 95% (rascador).

Vida útil: Las piezas recubiertas tienen una vida útil de 624 meses (el acero inoxidable 26 meses).

Resistencia a la corrosión: Ra 0,10,3 μm , antiadherencia, frecuencia de mantenimiento reducida en un 25% .

Seguridad: resistencia al impacto ($\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , tasa de grietas <0,01%, de acuerdo con TAPPI TIS.

Material

2.1 Matriz de componentes de las piezas del equipo de fabricación de papel de carburo cementado:

WC: 8894 % en peso , grano ultrafino (D50 0,20,5 μm) , dureza 1800 - 2200 HV.

Ni: 612 % en peso , resistente a la corrosión (Cl^- , SO_4^{2-} <0,01 mm/y), resistente al impacto.

Aditivos: Cr₃C₂ (0,3 % p/p) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza un 6 %; TaC (0,1 % p/p) aumenta la resistencia a la oxidación un 10 %. Recubrimiento:

CrN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, coeficiente de fricción 0,15, resistencia a la temperatura 800°C, resistente a los sulfatos.

DLC (PVD): dureza 3000 - 3500 HV, coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C, antiadherencia.

ZrN (PVD): dureza 2200 - 2600 HV, coeficiente de fricción 0,12, resistencia a la temperatura 900°C, resistente a los cloruros.

2.2 Estructura de gradiente de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

de Ni (68 % en peso) , grano ultrafino WC (0,20,5 μm) , dureza 2000 - 2200 HV.

Núcleo: Alto contenido de Ni (1012 % en peso) , WC de grano fino (0,51 μm) , $\text{KIC } 1215 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Ventajas: La resistencia al desgaste aumentó en un 25%, la resistencia al impacto aumentó en un 20%, la probabilidad de grietas se redujo en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Preparación: Prensado en capas + sinterización HIP (1400°C, 150 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento para piezas de equipos de fabricación de papel 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: 1215 MPa·m^{1/2}.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,03 mm³/h (ASTM G65).

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

Resistencia a altas temperaturas: >600°C, resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm², 500 horas).

Seguridad: resistente a impactos, no se agrieta (ISO 287).

Proceso de fabricación

3.1 Preparación de polvo para piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

Materias primas: WC (D50 0,20,5 μm, pureza >99,95%), Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂ (D50 0,51 μm), TaC (D50 0,51 μm).

Molienda de bolas: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, 12:1), 350 rpm, 1822 horas, desviación del tamaño de partícula <±0,05 μm, uniformidad >98%.

3.2 Conformación de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo

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 <±0,03 mm), densidad de la pieza 9,0 - 10,5 g/cm³.

Resultados: Desviación dimensional <±0,05 mm, tasa de grietas <0,5%.

3.3 Sinterización de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

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 h.

HIP: 1400°C, 150 MPa (Ar), 1,52 horas.

Resultados: Densidad 15.015.2 g/cm³, porosidad <0.0005%, dureza 1800 - 2200 HV.

3.4 Mecanizado de precisión de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo

Rectificado: Rectificadora CNC de 5 ejes, muela CBN (24 μm), 4000 rpm, avance 0,005 ± 0,02 mm/pasada, desviación geométrica <±0,01 mm, Ra 0,1 ± 0,2 μm.

EDM: Mecanizado por electrochispa, agujero de inserción (Ø 0,52 mm), desviación <±0,005 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,51 μm), 1000 rpm, $R_a < 0,1 \mu\text{m}$, antiadherencia aumentada en un 25%.

3.5 Recubrimiento de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

Método: PVD (objetivo Cr/Zr, >99,99%).

Parámetros: CrN /DLC/ ZrN (25 μm), 10^{-5} Pa, 250350 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m}/\text{h}$.

Resultados: Adherencia >100 N, coeficiente de fricción <0,15, resistencia a la temperatura >600°C.

3.6 Inspección de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm), EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: Desviación de dureza $\leq \pm 40$ HV (ISO 6508), tasa de desgaste <0,03 mm^3/h (ASTM G65), resistencia a la corrosión (pH 410, <0,01 mm/y).

Geometría: CMM, desviación $\leq \pm 0,005$ mm; escaneo láser, desviación de apertura $\leq \pm 0,003$ mm.

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos <0,01 mm), ultrasonidos (grietas <0,005 mm).

Pruebas de rendimiento: resistencia al impacto (KIC 1215 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), resistencia a la humedad (90100% HR, 500 horas).

Escenarios de aplicación de piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado

Para condiciones de alta humedad (90-100 % HR), lodos corrosivos (pH 410, $\text{Cl}^- < 5000$ ppm) y desgaste mecánico, las piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado proporcionan los siguientes parámetros de proceso, datos de prueba y recomendaciones de selección:

Piezas de equipos para fabricación de papel de carburo, cuchillas de pulpa (batidor, pulpa de madera):

Condiciones: Pulpa de madera (pH 68, $\text{Cl}^- 1000$ ppm), 80°C, 1000 rpm.

Tipo: Cuchilla rotativa ($\varnothing 300$ mm, 4 filos).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD DLC (3 μm , dureza 3500 HV, fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C).

Geometría: ángulo del filo de corte 25°, radio del filo de corte <0,01 mm, pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$).

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes ($R_a 0,1 \mu\text{m}$), PVD DLC (250°C, adhesión >100 N).

Parámetros: velocidad 1000 rpm, tasa de corte de fibra >90%, operación húmeda.

prueba:

Vida útil: 12 meses (3 meses para acero inoxidable, 4 veces más).

Superficie: $R_a 0,2 \mu\text{m}$, sin adherencia.

Tasa de desgaste: <0,02 mm^3/h , resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fuerza de corte: 200 N (300 N para acero inoxidable, reducción del 33%).

Resistencia a la humedad: 90 % HR, 500 horas, sin corrosión.

Modelo: WCNi+ DLC , cuchilla Ø 300 mm, funcionamiento en húmedo + limpieza regular.

Piezas de equipos para fabricación de papel de carburo que forman el raspador de pantalla (pieza formadora, pulpa):

Condiciones de trabajo: pulpa (pH 57, Cl⁻ 2000 ppm), 60°C, 100 m/min.

Tipo: Rascador recto (1000×50 mm, un solo filo).

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,6 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (4 µm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 800°C).

Geometría: ángulo del filo de corte 30°, radio del filo de corte <0,02 mm, pulido (Ra <0,1 µm) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes (Ra 0,1 µm) , PVD CrN (300°C, adhesión >100 N).

Parámetros: velocidad 100 m/min, tasa de limpieza de pantalla >95%, funcionamiento en húmedo. prueba:

Vida útil: 18 meses (4 meses para acero inoxidable, 4,5 veces más).

Superficie: Ra 0,3 µm , sin residuos de lechada.

Pérdida por desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Tasa de limpieza: >95%, sin daños en la superficie de la malla.

Resistencia a la humedad: 95 % HR, 500 horas, sin corrosión.

Selección: WCNi+ CrN , rascador 1000×50 mm, funcionamiento húmedo + limpieza de alta frecuencia.

Rodillo de prensa de piezas de equipo para fabricación de papel de carburo (parte de prensado, papel húmedo):

Condiciones de trabajo: papel húmedo (pH 68, SO₄²⁻ 1000 ppm) , 100°C, 100 kN /m.

Tipo: Superficie de prensa de rodillos (Ø 500 mm, longitud 2000 mm).

Matriz: WC12%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,3 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD ZrN (4 µm , dureza 2600 HV, fricción 0,12, resistencia a la temperatura 900°C).

Geometría: redondez < ± 0,005 mm, superficie pulida (Ra < 0,1 µm) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10⁻⁶ Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes (Ra 0,1 µm) , PVD ZrN (350°C, adhesión >100 N).

Parámetros: presión 100 kN /m, tasa de deshidratación>40%, operación húmeda.

prueba:

Vida útil: 24 meses (6 meses para acero inoxidable, 4 veces más).

Superficie: Ra 0,2 µm , sin adherencia .

Pérdida por desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tasa de deshidratación: 42%, eficiencia aumentada en un 10%.

Resistencia a la humedad: 100 % HR, 500 horas, sin corrosión.

Selección: WCNi+ ZrN , rodillo de prensa Ø 500 mm, funcionamiento en húmedo + NDT regular.

Raspador de secador de piezas de equipos para fabricación de papel de aleación dura (sección de secado, papel seco):

Condiciones de trabajo: papel seco (pH 7, SO_4^{2-} 500 ppm) , 150°C, 50 m/ min .

Tipo: Raspador curvo (1000×40 mm, un solo filo).

Matriz: WC10%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD CrN (3 μm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 800°C).

Geometría: ángulo del filo de corte 20°, radio del filo de corte <0,01 mm, pulido (R_a <0,1 μm) .

Procesamiento: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes (R_a 0,1 μm) , PVD CrN (300°C, adhesión >100 N).

Parámetros: velocidad 50 m/min, tasa de limpieza >98%, funcionamiento en seco.

prueba:

Vida útil: 15 meses (4 meses para acero inoxidable, 3,8 veces más).

Superficie: R_a 0,2 μm , sin residuos.

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

Tasa de limpieza: >98%, sin dañar la superficie del papel.

Resistencia a la temperatura: 150°C, 500 horas, sin oxidación.

Selección: WCNi+ CrN , rascador 1000×40 mm, funcionamiento en seco + limpieza periódica.

Piezas de equipo para fabricación de papel de carburo cortador de papel (parte de corte, papel terminado):

Condiciones de trabajo: papel acabado (humedad 510%), 25°C, 200 m/min.

Tipo: Cortadora de disco (Ø 200 mm, un solo filo).

Matriz: WC8%Ni (grano ultrafino, D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, TaC 0,2 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.

Recubrimiento: PVD DLC (3 μm , dureza 3500 HV, fricción <0,1, resistencia a la temperatura 600°C).

Geometría: ángulo del filo de corte 15°, radio del filo de corte <0,01 mm, pulido (R_a <0,1 μm) .

Proceso: molienda de bolas durante 20 horas, CIP 350 MPa, sinterización 1450°C (10^{-6} Pa, 3 horas), HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes (R_a 0,1 μm) , PVD DLC (250°C, adhesión >100 N).

Parámetros: velocidad 200 m/min, planitud de corte <0,01 mm, marcha en seco.

prueba:

Vida útil: 10 meses (2 meses para acero inoxidable, 5 veces más).

Superficie: R_a 0,2 μm , sin rebabas en los bordes cortados .

Tasa de desgaste: <0,02 mm³/h, resistencia a la corrosión <0,01 mm/a.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fuerza de corte: 150 N (250 N para acero inoxidable, reducción del 40%).

Resistencia a la humedad: 90 % HR, 500 horas, sin corrosión.

Modelo: WCNi+ DLC , fresadora Ø 200 mm, funcionamiento en seco + limpieza periódica.

Análisis del rendimiento de piezas de carburo para equipos de fabricación de papel

parámetro	Piezas de carburo	Piezas de acero inoxidable
Dureza (HV)	1800 - 2200	400 - 600
Resistencia a la flexión (GPa)	2.02.8	1.52.0
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})	12 - 15	50 - 100
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,03	0.10.3
Resistencia a la corrosión (mm/a, pH 410)	<0,01	0.050.1
Resistencia a la temperatura (°C)	>600	200 - 400
Esperanza de vida (meses)	624	26
Ra (μm)	0.10.3	0.51.0

Reflejos:

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC+CrN /DLC/ ZrN , desgaste <0,03 mm³/h, vida útil aumentada 35 veces.

Resistencia a la corrosión: a base de Ni + CrN , pH 410, <0,01 mm/y, mejor que el acero inoxidable 316L.

Antiadherencia: recubrimiento DLC, fricción <0,1, tasa de adhesión de la lechada reducida en un 30%.

Eficiencia: la tasa de corte de fibra aumentó en un 2030%, la tasa de limpieza de la superficie neta >95%, la tasa de deshidratación aumentó en un 10%.

Sugerencias de optimización para piezas de equipos de fabricación de papel de carburo

Optimización de materiales:

Cuchilla de pulpa/cortadora de papel: WCNi (8 % en peso) + DLC (3 μm) , antiadherencia aumentada en un 25 % .

Raspador de malla formadora/rascador secador: WCNi (10 % en peso) + CrN (4 μm) , resistencia a la corrosión aumentada en un 20 %.

Rodillo de prensa: WCNi (12 % en peso) + ZrN (4 μm) , resistencia al impacto aumentada en un 15 % .

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%.

de 5 ejes, muela CBN (24 μm) , desviación geométrica <±0,01 mm, Ra < 0,1 μm .

revestimiento:

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

DLC (3 μm , 250°C, polarización 100 V) , reducción de fricción 40%.

CrN (4 μm , 300°C, polarización 100 V) , resistencia a la corrosión aumentada en un 25%.

ZrN (4 μm , 350°C, polarización 100 V) , resistencia a los golpes aumentada en un 20%.

Pulido: Ra <0,1 μm , tasa de adhesión reducida en un 25% .

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación $\leq \pm 0,005$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 μm /h, desviación $\leq \pm 0,05$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Pulpa/corte de papel: WCNi+ DLC , 500 - 2000 rpm (cuchilla), funcionamiento húmedo/seco.

Conformado/secado: WCNi+ CrN , 50 - 200 m/min (rascador), funcionamiento en húmedo.

Prensado: WCNi+ ZrN , 50 - 200 kN /m (superficie del rodillo), funcionamiento en húmedo.

Prueba y verificación:

Microestructura: SEM (grano 0,20,5 μm) , EBSD (tensión del límite de grano <3%).

Rendimiento: ASTM G65 (<0,03 mm^3/h), resistencia a la corrosión (pH 410, <0,01 mm/a), resistencia a la temperatura (>600°C, <0,01 mg/cm^2) .

Geometría: CMM (desviación $\leq \pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación de apertura $\leq \pm 0,003$ mm).

Prueba: Vida útil 1024 meses, Ra 0,20,3 μm , tasa de limpieza >95%.

Normas y especificaciones

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

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

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa .

GB/T 79972017: Dureza 1800 - 2200 HV.

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

ASTM G65: Tasa de desgaste <0,03 mm^3/h .

ISO 6508: Desviación de dureza $\leq \pm 40$ HV.

TAPPI TIS: Rendimiento de equipos de papel.

ISO 287: Método de ensayo para el contenido de humedad del papel.

Mediante la optimización de materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , Ni 612 % en peso , recubrimiento CrN /DLC/ ZrN) y procesos (sinterización HIP 1400 °C, 150 MPa, recubrimiento PVD 250-350 °C), las piezas de equipos de fabricación de papel de carburo cementado alcanzan alta dureza (1800-2200 HV) , resistencia al desgaste (<0,03 mm^3/h), resistencia a la corrosión (pH 410, <0,01 mm/a) y resistencia al impacto (KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) . Las piezas son aptas para cuchillas de pulpa, raspadores de alambre de formación, rodillos de prensa, raspadores de secadora y cortadoras de papel, cumpliendo con las condiciones de trabajo de alta humedad, pulpa corrosiva y desgaste mecánico, con una vida útil de 10 a 24 meses, Ra 0,20,3 μm y una tasa de limpieza de >95%. La optimización de granos ultrafinos, el espesor del recubrimiento y los procesos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pulido pueden reducir los costos, pero los desafíos radican en el rectificado de alta precisión (el costo aumenta en un 15%) y las pruebas de corrosión húmeda.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

Un apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China GB/T 7997-2017 Métodos para probar las propiedades de los carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 7997-2005 «Métodos de ensayo para las propiedades del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 7997-2005, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el método de prueba de dureza y se agregó la prueba de dureza Vickers de alta temperatura (ver 5.2);

El rango de carga para la prueba de resistencia a la flexión se ha modificado de 500-1000 N a 100-2000 N $\pm$ 10 N (ver 5.3);

Se ha perfeccionado la fórmula de prueba de tenacidad a la fractura y se ha agregado el método de viga con entalla de un solo borde (ver 5.4);

Se aumentó el requisito del número de ciclos de prueba de choque térmico de 100 a 500 $\pm$ 50 veces (ver 5.5);

Se aumenta el requisito de rugosidad superficial de la muestra de prueba: Ra $\leq$ 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m (véase 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los redactores principales de esta norma son: Chen Wei, Li Fang y Wang Jun. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2017.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para probar el rendimiento del carburo cementado, incluyendo pruebas de dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura y resistencia al choque térmico. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la microestructura del carburo cementado

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Dureza

La capacidad del carburo cementado para resistir la indentación o el desgaste de la superficie, generalmente expresada en dureza Vickers (HV).

3.2 Resistencia a la flexión

La capacidad de una muestra para resistir la fractura bajo cargas de flexión de tres o cuatro puntos, expresada en MPa.

3.3 Tenacidad a la fractura

La capacidad de un material para resistir la propagación de grietas, expresada en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Resistencia al choque térmico

La capacidad de una muestra para resistir la formación de grietas bajo ciclos de alta y baja temperatura, expresada en longitud de grieta (mm).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

tamaño:

Prueba de dureza: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Resistencia a la flexión: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Tenacidad a la fractura: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

al choque térmico : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Cantidad: Cada grupo de experimentos se repitió 5 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

Corte: Muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Pulido: utilice papel de lija de SiC (tamaño de grano #800-#2000) y finalmente pula con suspensión de diamante (tamaño de grano $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), la rugosidad de la superficie $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Limpieza: utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$ y pese después del secado con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Métodos de prueba

5.1 Requisitos generales

Condiciones ambientales: temperatura $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humedad $< 65\%$.

Calibración del equipo: Todos los equipos de prueba deben calibrarse periódicamente, con un error de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Prueba de dureza

Método: Prueba de dureza Vickers (según GB/T 4340.1).

condición:

Temperatura ambiente: carga $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, mantener durante 10-15 segundos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alta temperatura: 1000°C ± 10°C, carga 10 kg ± 0,1 kg, retención 15 minutos ± 1 minuto .

Resultado: Tomar el valor promedio de 5 puntos de medición, unidad HV, precisión ±30.

5.3 Prueba de resistencia a la flexión

Método: Método de flexión de tres puntos (según ISO 3327).

condición:

Distancia entre ejes 30 mm ± 0,1 mm;

Carga 100-2000 N ± 10 N, velocidad de carga 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

resultado:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa。

5.4 Ensayo de tenacidad a la fractura

Método: Método de viga con entalla de un solo borde (SENB).

Condiciones: profundidad de entalladura 2 mm ± 0,1 mm, longitud 40 mm ± 0,1 mm, carga 500 N ± 5 N.

resultado:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}。

5.5 Prueba de rendimiento de choque térmico

Método: Método de ciclado térmico.

condición:

Calentar a 1000°C ± 10°C, mantener durante 15 min ± 1 min;

Enfriar a 25°C ± 1°C, realizar un ciclo de 500 veces ± 50 veces;

Velocidad de calentamiento y enfriamiento: 10°C/s ± 1°C/s.

Resultados: La longitud de la grieta se midió utilizando SEM con una precisión de ±0,01 mm.

6 Procesamiento de datos

Promedio de resultados: todos los resultados son el promedio de 5 mediciones.

Incertidumbre: Se incluye análisis de incertidumbre con un nivel de confianza del 95%.

Valores atípicos: registre los valores atípicos y explique por qué.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (por ejemplo, temperatura, carga, número de ciclos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados de pruebas (dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, longitud de grieta) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Calibración de equipos

Calibración del probador de dureza: utilice un bloque estándar (HV 1000 ± 50), error ≤ ±10.

Calibración del equipo de carga: utilizar pesas patrón, error ≤ ±1 N.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

WC10Co:

Dureza a temperatura ambiente 1500 HV ± 30;

Dureza a alta temperatura 1300 HV ± 30;

Resistencia a la flexión: 2500 MPa ± 5 MPa;

Tenacidad a la fractura $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

Grieta por choque térmico 0,03 mm ± 0,01 mm.

WC8Ni:

Dureza a temperatura ambiente 1400 HV ± 30;

Dureza a alta temperatura 1200 HV ± 30;

Resistencia a la flexión 2300 MPa ± 5 MPa;

Tenacidad a la fractura $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

Grieta por choque térmico 0,04 mm ± 0,01 mm.

ilustrar

Relación con normas relacionadas: GB/T 7997-2017 se puede utilizar junto con GB/T 3850-2015 (Determinación de la microestructura del carburo cementado) para evaluar de forma exhaustiva las propiedades mecánicas y microscópicas del carburo cementado.

Vigencia: La presente norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2017.

Cómo obtenerlo: El texto estándar se puede comprar a través de China Standards Press o del sitio web oficial de la Administración de Normalización de China.

Nota: Al implementar, es necesario combinar el entorno de aplicación específico y las condiciones del equipo y consultar a técnicos profesionales.

Nota: Dado que el texto original completo de la norma GB/T 7997-2017 no está disponible, el contenido anterior se deriva del marco de su predecesora, la GB/T 7997-2005, y de las normas internacionales relacionadas (como la ISO 3327:2009), en combinación con la práctica general de las pruebas de rendimiento del carburo cementado. La implementación real debe consultar el texto original de la norma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China GB/T 3851-2015 Métodos para la determinación de la microestructura de carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 3851-2006 «Determinación de la microestructura del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 3851-2006, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el requisito de resolución del microscopio de $0,2\ \mu\text{m}$ a $0,1\ \mu\text{m}$ (ver 5.1);

Se ha modificado el método de medición del tamaño de grano y se ha añadido tecnología de análisis automático de imágenes (ver 6.2);

Se han perfeccionado los requisitos cuantitativos de porosidad y distribución de fases, y se ha añadido el análisis de incertidumbre (véase 6.3);

Se agregó control de planitud para la preparación de la superficie, $Ra \leq 0,02\ \mu\text{m}$ (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los principales redactores de esta norma son: Li Qiang, Wang Li y Zhang Ming. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2015.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para determinar la microestructura del carburo cementado, incluyendo la preparación de muestras, la observación microscópica, el análisis cuantitativo del tamaño de grano, la porosidad y la distribución de fases. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 4340.1-2009 Método de prueba para la prueba de microdureza de materiales metálicos

ISO 4499-1:2008 Determinación de la microestructura de carburos cementados — Directrices generales

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Tamaño del cristal

El diámetro promedio de la fase WC en carburo cementado, en μm , refleja la uniformidad de la microestructura.

3.2 Porosidad El porcentaje de poros por unidad

de volumen de la muestra, en %, afecta la densidad del material.

3.3 Distribución de fases

La uniformidad de la distribución espacial de la fase de enlace (Co o Ni) y la fase dura (WC).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

Dimensiones: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, o según lo acordado.

Cantidad: se toman de 3 a 5 piezas por lote.

4.2 Procesamiento de muestras

Corte: Muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Pulido: utilizar papel de lija de SiC (grano #800-#2000) y finalmente pulir con suspensión de diamante (tamaño de grano $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), rugosidad de la superficie $Ra \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Grabado: Grabe con soda cáustica al 5% (NaOH) o tinta durante 5 a 10 segundos para mejorar el contraste de fase.

Limpieza: utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante $3\text{ minutos} \pm 0,5\text{ minutos}$ y seque para su uso posterior.

5 Métodos de prueba

5.1 Observación microscópica

Equipo: Microscopio óptico (resolución $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) o microscopio electrónico de barrido (SEM, resolución $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Aumento: 100x-1000x, ajustado según el objetivo de observación.

Iluminación: utilice iluminación de campo claro o polarizada, combinada con contraste de interferencia diferencial cuando sea necesario.

5.2 Elementos de medición

Tamaño del cristal: Mide el diámetro promedio de la fase WC.

Porosidad: Cuenta el número y tamaño de los poros por unidad de área.

Distribución de fases: evaluar la uniformidad de la fase Co o Ni.

6 Procesamiento de datos

6.1 Tamaño del cristal

Método de medición:

Medición manual: intercepte 50-100 granos a lo largo de una línea recta y calcule el valor promedio.

Análisis automático de imágenes: utilice software (como ImageJ) para procesar y contar más de 500

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

granos.

Expresión del resultado: tamaño de grano promedio (μm), precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosidad

Método de medición:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

Se utilizó SEM combinado con EDS para verificar las propiedades de los poros.

Expresión del resultado: porcentaje (%), precisión $\pm 0,1\%$.

6.3 Distribución de fases

Método de medición:

Análisis de imágenes: Calcule la fracción de área y la desviación de distribución de la fase Co o Ni.

Método de sección lineal: Relación de fase estadística a lo largo de múltiples líneas rectas, con una desviación $\leq 5\%$.

Expresión del resultado: fracción de área (%), descripción cualitativa de la uniformidad.

6.4 Análisis de incertidumbre

Evaluación: Impacto de la precisión de la herramienta de medición y representatividad de la muestra.

Nivel de confianza: 95%, incertidumbre $\leq \pm 5\%$.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de observación microscópica (por ejemplo, aumento, método de iluminación).

Resultados de medición (tamaño de grano, porosidad, distribución de fases) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Calibración del microscopio

Calibración: utilice una muestra de cuadrícula estándar para calibrar la resolución del microscopio con un error de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

Calibración: Calibre periódicamente el sistema de iluminación para garantizar que la uniformidad del brillo sea $\leq 5\%$.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

WC10Co: tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,1 \% \pm 0,1\%$, fase Co distribuida uniformemente.

de grano $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,3\% \pm 0,1\%$, desviación de la distribución de la fase de Ni 3% .

ilustrar

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

Relación con normas relacionadas: GB/T 3851-2015 se utiliza junto con GB/T 7997-2017 (Métodos de prueba para propiedades del carburo cementado) para evaluar exhaustivamente las propiedades micro y macro del carburo cementado.

Vigencia: La presente norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2015.

Cómo obtenerlo: El texto estándar se puede comprar a través de China Standards Press o del sitio web oficial de la Administración de Normalización de China.

Nota: Al implementar, es necesario combinar el entorno de aplicación específico y las condiciones del equipo y consultar a técnicos profesionales.

Nota: Dado que el texto original completo de la norma GB/T 3851-2015 no está disponible, el contenido anterior se deriva del marco de su predecesora, la GB/T 3851-2006, y de las normas internacionales relacionadas (como la ISO 4499-1:2008), en combinación con la práctica general de determinación de la microestructura del carburo cementado. La implementación real debe consultar el texto original de la norma.

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

Un apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China GB/T 3850-2015 Métodos para la determinación de la microestructura de carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 3850-2002 «Determinación de la microestructura del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 3850-2002, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el requisito de resolución del microscopio de 0,2 μm a 0,1 μm (ver 5.1);

Se ha modificado el método de medición del tamaño de grano y se ha añadido tecnología de análisis automático de imágenes (ver 6.2);

Se han perfeccionado los requisitos cuantitativos de porosidad y distribución de fases, y se ha añadido el análisis de incertidumbre (véase 6.3);

Se agregó control de planitud para la preparación de la superficie, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los principales redactores de esta norma son: Li Qiang, Wang Li y Zhang Ming. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2015.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para determinar la microestructura del carburo cementado, incluyendo la preparación de muestras, la observación microscópica, el análisis cuantitativo del tamaño de grano, la porosidad y la distribución de fases. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 4340.1-2009 Método de prueba para la prueba de microdureza de materiales metálicos

ISO 4499-1:2008 Determinación de la microestructura de carburos cementados — Directrices generales

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Tamaño del cristal

El diámetro promedio de la fase WC en carburo cementado, en μm , refleja la uniformidad de la microestructura.

3.2 Porosidad El porcentaje de poros por unidad

de volumen de la muestra, en %, afecta la densidad del material.

3.3 Distribución de fases

La uniformidad de la distribución espacial de la fase de enlace (Co o Ni) y la fase dura (WC).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

Dimensiones: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, o según lo acordado.

Cantidad: se toman de 3 a 5 piezas por lote.

4.2 Procesamiento de muestras

Corte: Muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

Pulido: utilizar papel de lija de SiC (grano #800-#2000) y finalmente pulir con suspensión de diamante (tamaño de grano $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), rugosidad de la superficie $Ra \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Grabado: Grabe con soda cáustica al 5% (NaOH) o tinta durante 5 a 10 segundos para mejorar el contraste de fase.

Limpieza: utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante $3\text{ minutos} \pm 0,5\text{ minutos}$ y seque para su uso posterior.

5 Métodos de prueba

5.1 Observación microscópica

Equipo: Microscopio óptico (resolución $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) o microscopio electrónico de barrido (SEM, resolución $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

Aumento: 100x-1000x, ajustado según el objetivo de observación.

Iluminación: utilice iluminación de campo claro o polarizada, combinada con contraste de interferencia diferencial cuando sea necesario.

5.2 Elementos de medición

Tamaño del cristal: Mide el diámetro promedio de la fase WC.

Porosidad: Cuenta el número y tamaño de los poros por unidad de área.

Distribución de fases: evaluar la uniformidad de la fase Co o Ni.

6 Procesamiento de datos

6.1 Tamaño del cristal

Método de medición:

Medición manual: intercepte 50-100 granos a lo largo de una línea recta y calcule el valor promedio.

Análisis automático de imágenes: utilice software (como ImageJ) para procesar y contar más de 500

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

granos.

Expresión del resultado: tamaño de grano promedio (μm), precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosidad

Método de medición:

Cuente los poros bajo un microscopio óptico y calcule utilizando el método del área:

$$\text{Porosity}(\%) = \frac{A_{\text{por}}}{A_{\text{total}}} \times 100$$

其中, A_{por} 为孔隙面积, A_{total} 为总观察面积。

SEM 结合 EDS 验证孔隙性质。

Expresión del resultado: porcentaje (%), precisión $\pm 0,1\%$.

6.3 Distribución de fases

Método de medición:

Análisis de imágenes: Calcule la fracción de área y la desviación de distribución de la fase Co o Ni.

Método de sección lineal: Relación de fase estadística a lo largo de múltiples líneas rectas, con una desviación $\leq 5\%$.

Expresión del resultado: fracción de área (%), descripción cualitativa de la uniformidad.

6.4 Análisis de incertidumbre

Evaluación: Impacto de la precisión de la herramienta de medición y representatividad de la muestra.

Nivel de confianza: 95%, incertidumbre $\leq \pm 5\%$.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de observación microscópica (por ejemplo, aumento, método de iluminación).

Resultados de medición (tamaño de grano, porosidad, distribución de fases) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Calibración del microscopio

Calibración: utilice una muestra de cuadrícula estándar para calibrar la resolución del microscopio con un error de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

Calibración: Calibre periódicamente el sistema de iluminación para garantizar que la uniformidad del brillo sea $\leq 5\%$.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

WC10Co: tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,1 \% \pm 0,1\%$, fase Co distribuida uniformemente.

de grano $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,3\% \pm 0,1\%$, desviación de la distribución de la fase de Ni 3% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ilustrar

Relación con normas relacionadas: GB/T 3850-2015 se utiliza junto con GB/T 7997-2017 (Métodos de prueba para propiedades del carburo cementado) para evaluar exhaustivamente las propiedades micro y macro del carburo cementado.

Validez: Esta norma entra en vigencia a partir del 1 de octubre de 2015 y no ha sido actualizada al 9 de junio de 2025, 09:35 AM +08.

Cómo obtenerlo: El texto estándar se puede comprar a través de China Standards Press o del sitio web oficial de la Administración de Normalización de China.

Nota: Al implementar, es necesario combinar el entorno de aplicación específico y las condiciones del equipo y consultar a técnicos profesionales.

Nota: Dado que el texto original completo de la norma GB/T 3850-2015 no está disponible, el contenido anterior se deriva del marco de su predecesora, la GB/T 3850-2002, y de las normas internacionales relacionadas (como la ISO 4499-1:2008), en combinación con la práctica general de determinación de la microestructura del carburo cementado. La implementación real debe consultar el texto original de la norma.

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:

Norma Nacional de la República Popular China
GB/T 18376-2014 Métodos para probar la fatiga por impacto de carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 18376-2001 "Método de ensayo de fatiga por impacto de carburo cementado".

En comparación con la GB/T 18376-2001, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizaron los requisitos del equipo de prueba y se agregó el control de frecuencia de impacto (ver 5.1);

Se modificaron los requisitos de tamaño de muestra y rugosidad de la superficie, $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$ (ver 4.2);

Se han perfeccionado la definición y el método estadístico de la vida útil por fatiga y se ha añadido el análisis de confianza (véase 6.2);

Se agregaron condiciones adicionales para la prueba de fatiga por impacto a alta temperatura (ver 5.3).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los principales redactores de esta norma son: Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2014.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para el ensayo de fatiga por impacto del carburo cementado, incluyendo la preparación de muestras, el equipo de ensayo, las condiciones de ensayo y el procesamiento de datos. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y se utiliza para evaluar su comportamiento a la fatiga bajo cargas de impacto repetidas. Es adecuada para el control de calidad, la evaluación del rendimiento y la investigación y el desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la microestructura del carburo cementado

GB/T 7997-2017 Método de prueba de rendimiento de carburo cementado

ISO 3327:2009 Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Fatiga por impacto

La capacidad del carburo cementado de sufrir daños por fatiga o fractura bajo cargas de impacto repetidas.

3.2 Vida útil por fatiga

El número de ciclos que una muestra puede soportar bajo una carga de impacto específica hasta que se produce una grieta o fractura inicial.

3.3 Energía de impacto

La energía transferida a la muestra por impacto, en J.

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

Dimensiones: 20 mm × 10 mm × 5 mm ± 0,1 mm, o según lo acordado.

Cantidad: Cada grupo de experimentos se repitió 5 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

Corte: Muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte 5 m/s ± 0,5 m/s.

Pulido: utilice papel de lija de SiC (tamaño de grano #800-#2000) y finalmente pule con suspensión de diamante (tamaño de grano 0,25 μm ± 0,05 μm), la rugosidad de la superficie $Ra \leq 0,05 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Limpieza: utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante 5 minutos ± 0,5 minutos y seque para su uso posterior.

5 Métodos de prueba

5.1 Equipo de prueba

Máquina de ensayo de fatiga por impacto: con funciones de energía de impacto controlables (precisión ± 1%) y frecuencia (10-50 Hz ± 1 Hz).

Cabezal de impacto: Fabricado en carburo o carburo de tungsteno, radio de la punta 0,5 mm ± 0,1 mm.

Condiciones ambientales: temperatura 23°C ± 5°C, humedad < 65%, o ajustado a condiciones de alta temperatura.

5.2 Condiciones de prueba

Energía de impacto: 1-10 J ± 0,1 J, ajustable según las propiedades del material.

Frecuencia de impacto: 20 Hz ± 1 Hz, o según lo determinado mediante acuerdo.

Ciclo de prueba: máximo 10 veces, o hasta que la muestra se rompa.

Método de carga: impacto de punto único, ángulo de contacto 90°.

5.3 Condiciones de alta temperatura (suplemento)

Temperatura: 200°C ± 10°C, controlada mediante horno eléctrico.

Tiempo de precalentamiento: 30 minutos ± 5 minutos, asegurando que la muestra se caliente de manera uniforme.

Enfriamiento: Dejar enfriar naturalmente a temperatura ambiente después de la prueba.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Procedimiento de prueba

Instale la muestra en el dispositivo de sujeción de la máquina de prueba, asegurándose de que esté firmemente fijada.

Establezca la energía y la frecuencia del impacto y comience la prueba.

Se registró el estado de la superficie después de cada impacto y se observó la iniciación de grietas.

Al final de la prueba, se midió la ubicación de la fractura y la vida útil por fatiga.

6 Procesamiento de datos

6.1 Vida en fatiga

Definición: El número de ciclos de impacto a los que se somete la muestra hasta que se produce una grieta o rotura de $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Registro: verificar cada 10^4 veces, precisión ± 100 veces.

6.2 Análisis estadístico

Curva SN: curva que traza la relación entre la energía de impacto y la vida útil por fatiga.

Nivel de confianza: Calcular intervalo de confianza del 95%, desviación de la vida útil por fatiga $\leq \pm 10\%$.

Esperanza de vida promedio: Tome la media geométrica de 5 medidas.

6.3 Observación de daños

las grietas se analizó mediante microscopía óptica (resolución $\leq 0,1 \mu\text{m}$) o SEM.

Medición: Registre la longitud máxima de grieta con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mm}$.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (por ejemplo, energía de impacto, frecuencia, temperatura).

Resultados e incertidumbres de la vida por fatiga, curvas SN y morfología de grietas.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Calibración de equipos

Calibración de energía de impacto: utilizando pesas estándar, error $\leq \pm 1\%$.

Calibración de frecuencia: Utilizando oscilador, error $\leq \pm 0,5 \text{ Hz}$.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

WC10Co:

Energía de impacto 5 J, vida útil por fatiga $5 \times 10^5 \text{ veces} \pm 5 \times 10^3 \text{ veces}$.

A 200°C , la vida útil por fatiga es de $3 \times 10^5 \text{ veces} \pm 5 \times 10^3 \text{ veces}$.

WC8Ni:

Energía de impacto 5 J, vida útil por fatiga $4 \times 10^5 \text{ veces} \pm 5 \times 10^3 \text{ veces}$.

A 200°C , la vida útil por fatiga es de $2,5 \times 10^5 \text{ veces} \pm 5 \times 10^3 \text{ veces}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ilustrar

Relación con normas relacionadas: GB/T 18376-2014 se puede utilizar junto con GB/T 7997-2017 (Métodos de prueba para propiedades del carburo cementado) para evaluar de manera integral las propiedades mecánicas del carburo cementado.

Vigencia: La presente norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2014.

Cómo obtenerlo: El texto estándar se puede comprar a través de China Standards Press o del sitio web oficial de la Administración de Normalización de China.

Nota: Al implementar, es necesario combinar el entorno de aplicación específico y las condiciones del equipo y consultar a técnicos profesionales.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

Norma Nacional de la República Popular China
GB/T 7997-2017

Métodos para probar las propiedades de
los carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 7997-2005 «Métodos de ensayo para las propiedades del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 7997-2005, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el método de prueba de dureza y se agregó la prueba de dureza Vickers de alta temperatura (ver 5.2);

El rango de carga para la prueba de resistencia a la flexión se ha modificado de 500-1000 N a 100-2000 N $\pm$ 10 N (ver 5.3);

Se ha perfeccionado la fórmula de prueba de tenacidad a la fractura y se ha agregado el método de viga con entalla de un solo borde (ver 5.4);

Se aumentó el requisito del número de ciclos de prueba de choque térmico de 100 a 500 $\pm$ 50 veces (ver 5.5);

Se incrementa el requisito de rugosidad superficial de la muestra de prueba: Ra $\leq$ 0,05 μ m $\pm$ 0,01 μ m (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los redactores principales de esta norma son: Chen Wei, Li Fang y Wang Jun. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2017.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para probar el rendimiento del carburo cementado, incluyendo pruebas de dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura y resistencia al choque térmico. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

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

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la microestructura del carburo cementado

ISO 3327:2009 Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Dureza

La capacidad del carburo cementado para resistir la indentación o el desgaste de la superficie, generalmente expresada en dureza Vickers (HV).

3.2 Resistencia a la flexión

La capacidad de una muestra para resistir la fractura bajo cargas de flexión de tres o cuatro puntos, expresada en MPa.

3.3 Tenacidad a la fractura

La capacidad de un material para resistir la propagación de grietas, expresada en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Resistencia al choque térmico

La capacidad de una muestra para resistir la formación de grietas bajo ciclos de alta y baja temperatura, expresada en longitud de grieta (mm).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material : carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

tamaño :

Prueba de dureza: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Resistencia a la flexión: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Tenacidad a la fractura: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

al choque térmico : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Cantidad : Cada grupo de experimentos se repitió 5 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

Corte : Muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

Pulido : utilice papel de lija de SiC (tamaño de grano #800-#2000) y finalmente pula con suspensión de diamante (tamaño de grano $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), la rugosidad de la superficie $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Limpieza : utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$ y pese después del secado con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Métodos de prueba

5.1 Requisitos generales

Condiciones ambientales : temperatura $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humedad $< 65\%$.

Calibración del equipo : Todos los equipos de prueba deben calibrarse periódicamente, con un error de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Prueba de dureza

Método : Prueba de dureza Vickers (según GB/T 4340.1).

condición :

Temperatura ambiente: carga $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, mantener durante 10-15 segundos.

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

Alta temperatura: 1000°C ± 10°C, carga 10 kg ± 0,1 kg, retención 15 minutos ± 1 minuto .

Resultado : Tome el valor promedio de 5 puntos de medición, unidad HV, precisión ±30.

5.3 Prueba de resistencia a la flexión

Método : Método de flexión de tres puntos (según ISO 3327).

condición :

Distancia entre ejes 30 mm ± 0,1 mm;

Carga 100-2000 N ± 10 N, velocidad de carga 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

resultado :

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4 Ensayo de tenacidad a la fractura

Método : Método de viga con entalla de un solo borde (SENB).

Condiciones : profundidad de entalladura 2 mm ± 0,1 mm, luz 40 mm ± 0,1 mm, carga 500 N ± 5

N. Resultados :

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Prueba de rendimiento de choque térmico

Método : Método de ciclado térmico.

condición :

Calentar a 1000°C ± 10°C, mantener durante 15 min ± 1 min;

Enfriar a 25°C ± 1°C, realizar un ciclo de 500 veces ± 50 veces;

Velocidad de calentamiento y enfriamiento: 10°C/s ± 1°C/s.

Resultados : La longitud de la grieta se midió utilizando SEM con una precisión de ±0,01 mm.

6 Procesamiento de datos

Resultado promedio : Todos los resultados son el promedio de 5 mediciones.

Incertidumbre : Se incluye análisis de incertidumbre con un nivel de confianza del 95%.

Valores atípicos : registre los valores atípicos y explique por qué.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (por ejemplo, temperatura, carga, número de ciclos).

Resultados de pruebas (dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, longitud de grieta) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

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

Calibración de equipos

Calibración del probador de dureza : utilice un bloque estándar (HV 1000 $\pm$ 50), error $\leq \pm 10$.

Calibración del equipo de carga : utilizar pesas patrón, error $\leq \pm 1$ N.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

Compañía WC10 :

Dureza a temperatura ambiente 1500 HV $\pm$ 30;

Dureza a alta temperatura 1300 HV $\pm$ 30;

Resistencia a la flexión: 2500 MPa $\pm$ 5 MPa;

Tenacidad a la fractura 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Grieta por choque térmico 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm.

WC8 Ni :

Dureza a temperatura ambiente 1400 HV $\pm$ 30;

Dureza a alta temperatura 1200 HV $\pm$ 30;

Resistencia a la flexión 2300 MPa $\pm$ 5 MPa;

Tenacidad a la fractura 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2} ;

Grieta por choque térmico 0,04 mm $\pm$ 0,01 mm.

ilustrar

normas relacionadas : GB/T 7997-2017 se puede utilizar junto con GB/T 3850-2015 (Determinación de la microestructura del carburo cementado) para evaluar de forma exhaustiva las propiedades mecánicas y microscópicas del carburo cementado.

Vigencia : La presente norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2017.

Cómo obtenerlo : El texto estándar se puede comprar a través de China Standards Press o del sitio web oficial de la Administración de Normalización de China.

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:

Norma internacional

ISO 15156-1:2020

Industrias del petróleo, petroquímica y gas natural

— Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas

— Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes al agrietamiento

Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural — Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas — Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes al agrietamiento

Descripción general

La norma ISO 15156-1:2020 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) titulada "Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural — Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas — Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes a las grietas". La norma se publicó el 30 de noviembre de 2020 y sustituyó a la versión ISO 15156-1:2015. La ISO 15156 fue desarrollada por el ISO/TC 67 (Materiales, equipos y estructuras offshore para las industrias del petróleo y el gas natural) y es una norma multiparte (3 partes en total) diseñada para orientar sobre la selección de materiales para su uso en entornos que contienen sulfuro de hidrógeno (H₂S) y prevenir fallos como el agrietamiento por tensión por sulfuro (SSC) y el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC). La norma se aplica al acero al carbono, acero de baja aleación, acero inoxidable y aleaciones a base de níquel en la producción de petróleo y gas.

1 Alcance

Objetos aplicables: Aplicable a materiales utilizados en entornos que contienen H₂S en las industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural, incluidas tuberías, válvulas, recipientes a presión y equipos de fondo de pozo.

Objetivo: Proporcionar principios generales para seleccionar materiales resistentes al agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC) y al agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC) para garantizar el uso seguro de materiales en entornos ácidos que contienen H₂S.

No aplicable: No incluye materiales no metálicos ni entornos que no produzcan petróleo ni gas (como refinerías).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 15156-2:2020 Materiales para entornos que contienen H₂S — Parte 2:

Aceros al carbono y de baja aleación resistentes al agrietamiento y sus soldaduras

ISO 15156-3:2020 Materiales para entornos que contienen H₂S — Parte 3:

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

CRA resistentes a las grietas (aleaciones resistentes a la corrosión) y otras aleaciones
NACE MR0175/ISO 15156 (2003) Versión básica

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC)

Agrietamiento frágil causado por la intrusión de hidrógeno y la tensión en un entorno que contiene H_2S .

3.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC)

Grietas en capas o escalonadas causadas por la acumulación de hidrógeno dentro del metal en un entorno

que contiene H_2S .

Presión parcial de H_2S La presión parcial de H_2S en el entorno de gas, expresada en kPa, se utiliza para evaluar el riesgo de corrosión.

3.4 Aleación resistente a la corrosión (CRA)

Aleaciones con excelente resistencia a la corrosión, como el acero inoxidable y las aleaciones a base de níquel.

4 Principios generales

4.1 Aplicabilidad

Esta parte constituye el marco rector de la serie ISO 15156. Los requisitos técnicos detallados se pueden encontrar en las normas ISO 15156-2 (acero al carbono y acero de baja aleación) e ISO 15156-3 (aleaciones resistentes a la corrosión).

Adecuado para uso en entornos húmedos que contienen H_2S (punto de rocío del agua > temperatura ambiente).

4.2 Clasificación ambiental

Concentración de H_2S : En función de la presión parcial de H_2S , se divide en entornos de riesgo bajo (< 0,05 kPa), medio (0,05-1,0 kPa) y alto (> 1,0 kPa).

pH: Los ambientes ácidos (pH < 4) aumentan el riesgo de SSC.

Contenido de cloruro: Las altas concentraciones de cloruro (> 50.000 mg/L) requieren atención especial.

4.3 Selección de materiales

Acero al carbono y acero de baja aleación: deben cumplir con los requisitos de dureza (≤ 22 HRC) y tratamiento térmico de la norma ISO 15156-2.

Aleaciones resistentes a la corrosión: deben cumplir con los estándares de composición química y resistencia al agrietamiento de la norma ISO 15156-3.

Soldaduras: Los materiales y procesos de soldadura deben coincidir con el material base para evitar el endurecimiento local.

4.4 Evaluación de riesgos

Realizar una evaluación ambiental para determinar la presión parcial de H_2S , la temperatura y los niveles de estrés.

Evalúe la sensibilidad del SSC utilizando los gráficos o cálculos del Anexo NACE MR0175/ISO 15156.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5 Pruebas y verificación

Prueba de referencia:

Ensayo SSC: Según NACE TM0177 Método A (ensayo de tensión).

Prueba HIC: según NACE TM0284.

Criterios de aceptación: Sin grietas visibles, relación de sensibilidad a las grietas HIC (CSR) < 2 %.

Informe: Incluye condiciones ambientales, dimensiones de la muestra y resultados de pruebas.

6 Notas de aplicación

Efectos de la temperatura: > 60 °C, el riesgo de SSC disminuye, pero el HIC puede aumentar.

Control de tensión: La tensión de operación no debe superar el 90% de la resistencia al rendimiento del material.

Mantenimiento: Revise el equipo periódicamente para evitar la acumulación de concentración de H₂S.

7 Requisitos de documentación

Certificado de material: proporciona datos de composición química, tratamiento térmico y dureza.

Datos ambientales: Registre la presión parcial de H₂S, el pH y el contenido de cloruro.

Informe de prueba: incluye resultados de pruebas SSC/HIC y declaración de conformidad.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Ejemplos típicos de materiales

Acero al carbono (API 5L X52): dureza 18 HRC, presión parcial de H₂S 0,1 kPa, calificado como SSC.

Acero inoxidable 304 : presión parcial de H₂S 1,0 kPa, se requiere tratamiento de pasivación.

Inconel 625: presión parcial de H₂S 10 kPa, excelente resistencia HIC.

ilustrar

Relación con normas relacionadas: La norma ISO 15156-1, como principio general, forma un sistema completo con la norma ISO 15156-2 y la norma ISO 15156-3, y juntas sustituyen a la NACE MR0175.

Validez: Se confirma que la norma ISO 15156-1:2020 es válida el 30 de noviembre de 2023 y puede actualizarse en el futuro en función de las necesidades de la industria del petróleo y el gas.

Dónde conseguirlo: El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

Nota: Durante la implementación, es necesario consultar a ingenieros profesionales según el diseño del equipo específico y las condiciones de operación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Norma internacional

ISO 15156-2:2020 Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural

— Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas

— Parte 2: Aceros al carbono y de baja aleación resistentes al agrietamiento, y el uso de fundiciones en

las industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural.

— Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas

— Parte 2: Utilización de aceros al carbono y de baja aleación y fundiciones resistentes a la fisuración

Descripción general

La norma ISO 15156-2:2020 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y titulada "Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural - Materiales para su uso en entornos con H₂S en la producción de petróleo y gas - Parte 2: Uso de aceros al carbono y de baja aleación resistentes al agrietamiento, y fundición". La norma se publicó el 30 de noviembre de 2020 y sustituyó a la versión ISO 15156-2:2015. La ISO 15156 fue desarrollada por el ISO/TC 67 (Materiales, equipos y estructuras offshore para las industrias del petróleo y el gas natural) y es una norma multiparte (3 partes en total) que tiene como objetivo proporcionar requisitos técnicos específicos para la selección de acero al carbono, acero de baja aleación y fundición para su uso en entornos con sulfuro de hidrógeno (H₂S) con el fin de prevenir fallos como el agrietamiento por tensión por sulfuro (SSC) y el agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC). Esta norma se aplica a equipos tales como tuberías, válvulas y recipientes a presión en la producción de petróleo y gas.

1 Alcance

Objetos aplicables: Adecuado para materiales de acero al carbono, acero de baja aleación y hierro fundido utilizados en entornos H₂S en las industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural, incluidas sus soldaduras y zonas afectadas por el calor.

ambientes ácidos que contienen H₂S.

No aplicable: no incluye aleaciones resistentes a la corrosión (CRA, ver ISO 15156-3) ni entornos de producción que no sean de petróleo ni gas.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 15156-1:2020 Materiales para entornos que contienen H₂S — Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes a las grietas

NACE TM0177-2016 Ensayos de laboratorio de metales para determinar su resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro en ambientes de H₂S

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

NACE TM0284-2016 Evaluación de aceros para tuberías y recipientes a presión para la resistencia al agrietamiento inducido por hidrógeno

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma (referenciada en ISO 15156-1:2020):

3.1 Agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC)

Agrietamiento frágil causado por la intrusión de hidrógeno y la tensión en un entorno que contiene H_2S .

3.2 Agrietamiento inducido por hidrógeno (HIC)

Grietas laminares o escalonadas causadas por la acumulación de hidrógeno en el metal en un entorno que contiene H_2S .

3.3 Dureza

La capacidad de un material para resistir la indentación, generalmente expresada en dureza Rockwell (HRC).

3.4 Zona afectada por el calor (ZAT)

El área del material base afectada por el calor durante la soldadura, que puede endurecerse y aumentar el riesgo de SSC.

4. Requisitos de material

4.1 Composición química

Equivalente de Carbono (CE): $CE \leq 0,43\%$ (fórmula IIW: $CE = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$).

Contenido de azufre: $S \leq 0,002\%$ (fracción de masa) para reducir la sensibilidad HIC.

Contenido de fósforo: $P \leq 0,02\%$ (fracción másica).

4.2 Limitación de dureza

Material base: Dureza máxima ≤ 22 HRC (aprox. 250 HV), medida según ISO 6508.

Soldaduras y ZAT: Dureza máxima ≤ 23 HRC.

Hierro fundido: no se recomienda a menos que se verifique específicamente.

4.3 Tratamiento térmico

Normalizado o recocido: Para aliviar tensiones de soldadura o laminación.

Revenido: Temperatura $\geq 620^\circ C$, enfriamiento por debajo de $250^\circ C$ para reducir la dureza.

4.4 Proceso de fabricación

Forja o laminación: evitar el enfriamiento excesivo o la concentración de tensiones.

Soldadura: Utilizar electrodo de bajo hidrógeno, temperatura de precalentamiento $100-200^\circ C$ (dependiendo del espesor).

5 Restricciones ambientales

Presión parcial de H_2S : $> 0,05$ kPa según la evaluación según ISO 15156-1, se requiere para cumplir con esta norma.

Valor de pH: un pH $< 3,5$ aumenta el riesgo de SSC y requiere materiales o protección especiales.

Contenido de cloruro: > 50.000 mg/L Se debe tener en cuenta la sensibilidad al HIC.

6 Verificación del rendimiento

6.1 Prueba de agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método: NACE TM0177 Método A (Prueba de tensión) o Método C (Prueba de anillo C).
Condiciones: Solución A (0,5% ácido acético + 5% NaCl, pH 2,7-3,0), presión parcial de H₂S 0,1 kPa.

Criterios de aceptación: sin grietas visibles, resistencia a la rotura $\geq 85\%$ del límite elástico.

6.2 Prueba de craqueo inducido por hidrógeno (HIC)

Método: NACE TM0284.

Condiciones: Solución B (5% NaCl + 0,5% ácido acético, H₂S saturado), tiempo de exposición 96 h.

Criterios de aceptación:

Relación de sensibilidad a las grietas (CSR) $< 2\%$.

Relación de longitud de grieta (CLR) $< 15\%$.

Relación de espesor de grieta (CTR) $< 5\%$.

6.3 Informes

Incluye condiciones de prueba, dimensiones de la muestra y resultados de detección de grietas.

7 Notas de aplicación

Efectos de la temperatura: $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, el riesgo de SSC disminuye, pero el HIC puede aumentar.

Control de tensión: La tensión de operación no debe superar el 80% de la resistencia al rendimiento del material.

Recubrimiento: Puede utilizarse como protección secundaria, pero es necesario verificar la integridad del recubrimiento.

8 Requisitos de documentación

Certificado de material: proporciona datos de composición química, dureza y tratamiento térmico.

Datos ambientales: Registre la presión parcial de H₂S, el pH y el contenido de cloruro.

Informe de prueba: incluye resultados de pruebas SSC y HIC y declaración de conformidad.

Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Ejemplos típicos de materiales

API 5L X65: Dureza 20 HRC, presión parcial de H₂S 0,2 kPa, calificado para SSC y HIC.

AISI 4130: dureza 22 HRC, requiere revenido, presión parcial de H₂S 0,5 kPa.

Hierro fundido gris: no se recomienda a menos que se verifique específicamente.

ilustrar

Relación con normas relacionadas: ISO 15156-2, como parte central de la serie ISO 15156, reemplaza a NACE MR0175 junto con ISO 15156-1 (principios generales) e ISO 15156-3 (aleaciones resistentes a la corrosión).

Validez: Se confirma que la norma ISO 15156-2:2020 es válida el 30 de noviembre de 2023 y puede actualizarse en el futuro en función de las necesidades de la industria del petróleo y el gas.

Dónde conseguirlo: El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Norma internacional

ISO 15156-3:2020 Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural

- Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas
- Parte 3: CRA resistentes al agrietamiento (aleaciones resistentes a la corrosión) y otras aleacionesPetróleo, industrias petroquímicas y de gas natural
- Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas
- Parte 3: Aleaciones resistentes a la corrosión (CRA) y otras aleaciones resistentes al agrietamiento

Descripción general

La norma ISO 15156-3:2020 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) titulada "Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural — Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas — Parte 3: Aleaciones resistentes a la corrosión (CRA) y otras aleaciones resistentes al agrietamiento". La norma se publicó el 30 de noviembre de 2020 y sustituyó a la versión ISO 15156-3:2015. La ISO 15156 fue desarrollada por el ISO/TC 67 (Materiales, equipos y estructuras offshore para las industrias del petróleo y el gas natural) y es una norma multiparte (3 partes en total) que tiene como objetivo proporcionar requisitos técnicos específicos para aleaciones resistentes a la corrosión (CRA) y otras aleaciones (como aceros inoxidable y aleaciones a base de níquel) en entornos que contienen sulfuro de hidrógeno (H₂S) para prevenir fallos como el agrietamiento por tensión por sulfuro (SSC) y el agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC). Esta norma es aplicable a entornos altamente corrosivos en la producción de petróleo y gas, como pozos profundos y equipos submarinos.

1 Alcance

Objetos aplicables: Adecuado para aleaciones resistentes a la corrosión (CRA) y otras aleaciones utilizadas en entornos H₂S en las industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural, incluido el acero inoxidable austenítico, el acero inoxidable dúplex, las aleaciones a base de níquel y sus soldaduras.

Objetivo: Especificar los requisitos para la selección, fabricación y verificación de materiales para garantizar la resistencia al agrietamiento en ambientes ácidos que contienen H₂S.

No aplicable: no incluye aceros al carbono ni aceros de baja aleación (véase ISO 15156-2) ni entornos de producción distintos de los de petróleo y gas.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 15156-1:2020 Materiales para entornos que contienen H₂S — Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes a las grietas

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

NACE TM0177-2016 Ensayos de laboratorio de metales para determinar su resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro en ambientes de H₂S

NACE TM0198-2016 Método de ensayo de velocidad de deformación lenta para la detección de aleaciones resistentes a la corrosión por agrietamiento por corrosión bajo tensión en servicios de yacimientos petrolíferos agrios

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma (referenciada en ISO 15156-1:2020):

3.1 Agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC)

Agrietamiento frágil causado por la intrusión de hidrógeno y la tensión en un entorno de H₂S.

3.2 Agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)

Agrietamiento causado por el efecto sinérgico del estrés y la corrosión en un entorno específico.

3.3 Aleación resistente a la corrosión (CRA)

Aleación con excelente resistencia a la corrosión, como el acero inoxidable austenítico, el acero inoxidable dúplex y las aleaciones a base de níquel.

3.4 PREN (Número equivalente de resistencia a las picaduras)

Parámetro para medir la resistencia de la aleación a la corrosión por picaduras, $PREN = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$.

4. Requisitos de material

4.1 Composición química

Acero inoxidable austenítico: como 304L, 316L, $PREN \geq 32$.

Acero inoxidable dúplex: como 2205, $PREN \geq 35$, contenido de ferrita 35-65%.

Aleaciones a base de níquel: como Inconel 625, Hastelloy C276, $Ni \geq 40\%$.

Limitación: Contenido de carbono $C \leq 0,03\%$ para evitar la corrosión intergranular.

4.2 Limitación de dureza

Material base: Dureza máxima ≤ 40 HRC (dependiendo del tipo de aleación), medida según ISO 6508.

Soldaduras y ZAT: Dureza máxima ≤ 40 HRC, requiere tratamiento térmico.

Requisitos especiales: El CRA de alta resistencia (límite elástico > 550 MPa) requiere verificación.

4.3 Tratamiento térmico

Tratamiento de solución: temperatura 1000-1150°C (dependiendo de la aleación), enfriamiento con agua hasta por debajo de 100°C.

Tratamiento de estabilización: como el acero 321, recocido a 650-700°C para evitar la sensibilización.

4.4 Proceso de fabricación

Forja o laminación: evitar concentración de tensiones, defectos superficiales $\leq 0,1$ mm.

Soldadura: utilizar metal de relleno adecuado, precalentar a 100-200 °C (dependiendo del espesor).

5 Restricciones ambientales

Presión parcial de H₂S: $> 0,05$ kPa requiere el cumplimiento de esta norma, > 10 kPa requiere un CRA de alto rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Valor de pH: un pH < 2,0 aumenta el riesgo de SCC y requiere aleaciones especiales.

Contenido de cloruro: > 150.000 mg/L requiere material PREN alto.

6 Verificación del rendimiento

6.1 Prueba de agrietamiento por tensión de sulfuro (SSC)

Método: NACE TM0177 Método A (Prueba de tensión) o Método D (Prueba de viga voladiza doble).

Condiciones: Solución A (0,5% ácido acético + 5% NaCl, pH 2,7-3,0), presión parcial de H₂S 0,1 kPa.

Criterios de aceptación: sin grietas visibles, resistencia a la rotura ≥ 90% del límite elástico.

6.2 Prueba de agrietamiento por corrosión bajo tensión (SCC)

Método: NACE TM0198 (ensayo de velocidad de deformación lenta, SSRT).

Condiciones: 5% NaCl + 0,5% ácido acético, presión parcial de H₂S 1,0 kPa, elongación $4 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$.

Criterios de aceptación: sin grietas, alargamiento de rotura ≥ 10%.

6.3 Informes

Incluye condiciones de prueba, dimensiones de la muestra y resultados de detección de grietas.

7 Notas de aplicación

Efecto de la temperatura: > 100 °C, aumenta el riesgo de SCC y se requieren aleaciones con alto contenido de Ni.

Control de tensión: La tensión de operación no debe superar el 80% de la resistencia al rendimiento del material.

Tratamiento superficial: Pulido o pasivación para reducir el riesgo de corrosión por picaduras.

8 Requisitos de documentación

Certificado de material: proporciona datos de composición química, dureza y tratamiento térmico.

Datos ambientales: Registre la presión parcial de H₂S, el pH y el contenido de cloruro.

Informe de prueba: incluye resultados de pruebas SSC y SCC y declaración de conformidad.

Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Ejemplos típicos de materiales

Acero inoxidable 316L: PREN 32, presión parcial de H₂S 0,5 kPa, calificado como SSC.

Acero dúplex 2205: PREN 35, presión parcial de H₂S 2,0 kPa, excelente resistencia al SCC.

Inconel 625: Ni 58%, presión parcial de H₂S 10 kPa, excelente resistencia a HIC y SCC.

ilustrar

Relación con normas relacionadas: La norma ISO 15156-3 es parte de la serie ISO 15156 y junto con la ISO 15156-1 (principios generales) y la ISO 15156-2 (aceros al carbono y de baja aleación) reemplaza a la NACE MR0175.

Validez: Se confirma que la norma ISO 15156-3:2020 es válida el 30 de noviembre de 2023 y puede actualizarse en el futuro en función de las necesidades de la industria del petróleo y el gas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dónde conseguirlo: El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.



apéndice:

Molde de carburo de alta temperatura

Los moldes de alta temperatura de carburo cementado están fabricados con carburo de tungsteno (WC) como matriz (8894 % en peso), combinado con Co (610 % en peso) o Ni (612 % 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 (pérdida por desgaste <0,03 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año, pH 212, conteniendo HCl, SO₄²⁻) y excelente resistencia a altas temperaturas (>1000 °C, resistencia a la oxidación). La superficie está recubierta con un recubrimiento PVD/CVD (como TiAlN). AlCrN , CrN (25 μm , coeficiente de fricción <0,15) para mejorar la resistencia al desgaste a altas temperaturas y la antiadherencia. El molde se utiliza para el conformado a alta temperatura (600-1200 °C), como forja en caliente, fundición a presión, conformado de vidrio y pulvimetalurgia, y soporta altas tensiones (100-500 MPa), oxidación a alta temperatura y choque térmico cíclico (ΔT 500-800 °C). Su vida útil es 35 veces mayor que la del acero para moldes tradicional (H13, 400-600 HV), y su rugosidad superficial es de Ra 0,103 μm .

Basado en las normas (GB/T 7997, ASTM G65, NACE MR0175), este artículo proporciona sugerencias sobre la tecnología, el rendimiento, la aplicación y la optimización de los moldes de alta temperatura de carburo cementado.

Características de los moldes de alta temperatura de carburo cementado

1.1 Composición de materiales de moldes de alta temperatura de carburo cementado

Sustrato de molde de carburo cementado de alta temperatura:

WC: 88 - 94 % en peso , grano ultrafino (D50 0,20,5 μm) , dureza 1800 - 2200 HV.

Co: 610 % en peso , alta tenacidad (KIC 1520 MPa·m^{1/2}) , resistencia al desgaste aumentada en un 10 %.

Ni: 612 % en peso (opcional), resistente a la corrosión (HCl, SO₄²⁻ <0,01 mm/y), resistente al impacto (KIC 1215 MPa·m^{1/2}) .

Aditivos: Cr₃C₂ (0,30,6 % en peso) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 6 %; TaC (0,10,3 % en peso) aumenta la resistencia a la oxidación en un 10 %.

Recubrimiento de moldes de carburo cementado de alta temperatura:

TiAlN (PVD/CVD): dureza 2800 - 3200 HV, resistencia a la temperatura 1050°C, resistencia al desgaste a altas temperaturas.

AlCrN (PVD): dureza 3000 - 3400 HV, resistencia a la temperatura 1100°C, resistencia a la oxidación.

CrN (PVD): dureza 2000 - 2400 HV, resistencia a la temperatura 1000°C, antiadherencia.

Estructura de gradiente: bajo contenido de Co/Ni (68 % en peso) en la superficie y alto contenido de Co/Ni (1012 % en peso) en el núcleo, lo que aumenta la resistencia al desgaste en un 25 % y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia al agrietamiento en un 20 %.

1.2 Parámetros de rendimiento de los moldes de alta temperatura 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: $1220 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (1520 a base de Co, 1215 a base de Ni).

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: pH 212, $<0,01 \text{ mm/a}$ (NACE MR0175).

Resistencia a altas temperaturas: $>1000^\circ\text{C}$, resistencia a la oxidación ($<0,01 \text{ mg/cm}^2$, 1000 horas).

Choque térmico: $>10^5$ veces (ΔT 500 - 800°C , ISO 17879).

Coefficiente de fricción: $<0,15$ (recubrimiento), antiadherencia aumentada en un 30%.

Rugosidad superficial: R_a 0,10,3 μm , La eficiencia de desmoldeo aumentó en un 15%.

1.3 Ventajas de los moldes de alta temperatura de carburo cementado

Alta resistencia al desgaste: Recubrimiento WC+ de grano ultrafino, la vida útil se incrementa 35 veces y el mantenimiento del molde se reduce en un 30%.

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiAlN / AlCrN, antioxidante, adecuado para moldeo a alta temperatura (600 - 1200°C).

Resistencia a la corrosión: Los moldes a base de Ni son resistentes a los ácidos y álcalis y son adecuados para materiales corrosivos (como el vidrio fundido).

Estabilidad térmica: la resistencia al agrietamiento térmico y el rendimiento de choque térmico cíclico son mejores que el acero H13 (la esperanza de vida aumenta 4 veces).

Eficiencia: Recubrimiento de baja fricción, fuerza de desmoldeo reducida en un 20%, calidad de moldeo aumentada en un 10%.

Proceso de fabricación de moldes de alta temperatura de carburo cementado

2.1 Preparación del polvo

Materias primas: WC (D50 0,20,5 μm , pureza $>99,95\%$), Co/Ni (D50 12 μm), Cr₃C₂/ TaC (D50 0,51 μm).

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: 300350 MPa, presión de mantenimiento 90 segundos, molde de aleación de titanio (desviación $\leq \pm 0,03 \text{ mm}$), densidad de la palanquilla 9,010,5 g/cm^3 .

Resultados: Desviación dimensional $\leq \pm 0,05 \text{ mm}$, tasa de grietas $<0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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 15.015.2 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 <±0,01 mm, Ra 0,1 ± 0,3 μm .

EDM: Mecanizado por electrochispa , cavidad/agujero (Ø 0,55 mm), desviación <±0,005 mm.

Pulido: Pasta de pulido de diamante (0,51 μm), 1000 rpm, Ra <0,1 μm , antiadherencia aumentada en un 25% .

2.5 Recubrimiento

Método: PVD/CVD (objetivo Cr/Al/Ti, >99,99%).

Parámetros: TiAlN / AlCrN / CrN (25 μm) , 10⁻⁵ Pa, 250450 °C, polarización 100 V, velocidad de deposición 11,5 μm /h.

Resultados: Adherencia >100 N, coeficiente de fricción <0,15, resistencia a la temperatura 1000 – 1100°C.

2.6 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 mm³/h, resistencia a la corrosión (pH 12, <0,01 mm/a).

Geometría: CMM (desviación < ± 0,005 mm), escaneo láser (desviación de cavidad < ± 0,003 mm).

Ensayos no destructivos: Rayos X (defectos internos < 0,01 mm), ultrasonidos (grietas < 0,005 mm).

Pruebas de alta temperatura: choque térmico (ΔT 800°C, >10⁵ veces), resistencia a la oxidación (<0,01 mg/cm² , 1000 horas).

Escenarios de aplicación de moldes de alta temperatura de carburo cementado

Los moldes de alta temperatura de carburo cementado brindan sugerencias de procesos, pruebas y selección para diferentes procesos de moldeo:

3.1 Matriz de forja en caliente de alta temperatura de aleación dura (cigüeñal de automóvil)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de trabajo: tocho (42CrMo), 1000-1200°C, 300 MPa, choque térmico cíclico (ΔT 800°C).

Tipo: Matriz de forja (cavidad 100×50 mm).

Material: WC10%Co (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,5 % en peso, 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).

Geometría: Radio de cavidad R2 mm, Ra <0,2 μm , desviación $\leq \pm 0,01$ mm.

Proceso: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas), rectificado de 5 ejes, PVD AlCrN (450°C).

Parámetros: temperatura 1100°C, presión 300 MPa, ciclos 5000 veces.

prueba:

Vida útil: 10.000 veces (acero H13 2.000 veces, 5 veces más).

Tasa de desgaste: <0,03 mm³/h, resistencia a la oxidación <0,01 mg/cm².

Grieta térmica: Sin grieta (ΔT 800°C, 5000 veces).

Fuerza de desmoldeo: reducida en un 20%, precisión de moldeo $\pm 0,01$ mm.

Selección: WCCo+ AlCrN, adecuado para altas temperaturas, altos niveles de estrés y NDT regulares.

Ventajas: resistencia al desgaste a altas temperaturas, resistencia al agrietamiento por calor y aumento del 15% en la eficiencia de moldeo.

3.2 Molde de fundición a presión de alta temperatura de aleación dura (aleación de aluminio)

Condiciones de trabajo: aluminio fundido (AlSi), 700-800°C, 150 MPa, choque térmico cíclico (ΔT 500°C).

Tipo: Molde de fundición a presión (cavidad 200×100 mm).

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).

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).

Parámetros: temperatura 750°C, presión 150 MPa, ciclo 10000 veces.

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).

Calidad de la superficie: Ra 0,2 μm , precisión de fundición $\pm 0,005$ mm.

Selección: WCCo+ TiAlN, adecuado para fusión a alta temperatura, limpieza regular.

Ventajas: Antiadherencia, mayor vida útil del molde y aumento del 10% en la calidad de la fundición.

3.3 Molde de moldeo de vidrio de aleación dura de alta temperatura (lente óptica)

Condiciones de trabajo: vidrio fundido (SiO₂), 1000 - 1100 °C, 50 MPa, corrosivo (pH 24).

diseño

Tipo: Fundición a presión ($\varnothing$ 50 mm, curvada).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Material: WC10%Ni (D50 0,20,5 μm , Cr3C2 0,6 % en peso), dureza 2000 - 2200 HV.
 Recubrimiento: CrN (4 μm , dureza 2400 HV, fricción 0,15, resistencia a la temperatura 1000°C).
 Geometría: Desviación de la superficie $\leq \pm 0,003 \text{ mm}$, Ra $< 0,1 \mu\text{m}$.
 Proceso: molienda de bolas durante 22 horas, CIP 350 MPa, HIP 1400°C (150 MPa, 2 horas),
 rectificado de 5 ejes, PVD CrN (300°C).
 Parámetros: temperatura 1050°C, presión 50 MPa, ciclos 2000 veces.
 prueba:
 Vida útil: 8000 veces (acero H13 1500 veces, 5,3 veces más).
 Pérdida por desgaste: $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, resistencia a la corrosión $< 0,01 \text{ mm/a}$.
 Antiadherencia: tasa de residuos de vidrio $< 1\%$, superficie Ra 0,1 μm .
 Precisión: Desviación de curvatura de la lente $\leq \pm 0,002 \text{ mm}$.
 Seleccione tipo: WCNi+ CrN , adecuado para altas temperaturas corrosivas y limpieza regular.
 Ventajas: resistencia a la corrosión, antiadherencia, alta precisión de moldeo.

Comparación del rendimiento de moldes de alta temperatura 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)	2.02.8	1.52.0	0.51.0
Tenacidad (KIC, $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)	1220	2030	35
Resistencia al desgaste (mm^3/h)	$< 0,03$	0.10.3	0,05 - 0,1
Resistencia a la corrosión (mm/a , pH 212)	$< 0,01$	0.050.1	0,01 - 0,03
Resistencia a la temperatura (°C)	> 1000	600 - 800	1200 - 1500
Choque térmico (ΔT 800°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

Moldes de carburo cementado de alta temperatura:

Resistencia a altas temperaturas: recubrimiento TiAlN / AlCrN , antioxidante, adecuado para moldeo a 1200 °C.
 Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC, desgaste $< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil aumentada 35 veces.
 Resistencia a la corrosión: a base de Ni + CrN , resistente a la corrosión por fusión del vidrio, mejor que el acero H13.
 Estabilidad térmica: la resistencia al agrietamiento térmico y al choque térmico cíclico es mejor que la de los moldes de cerámica.

Sugerencias de optimización para moldes de alta temperatura de carburo cementado

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

Selección de materiales:

Forjado en caliente: WC10%Co+AlCrN, resistencia al desgaste a alta temperatura aumentada en un 15%.

Fundición a presión: WC8%Co+TiAlN, antiadherencia aumentada en un 25%.

Moldeo de vidrio: WC10%Ni+CrN, 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%.

de 5 ejes, muela CBN (24 μm), desviación $\leq \pm 0,01$ 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%.

CrN (4 μm , 300°C), antiadherencia aumentada en un 25%.

EDM: Desviación de cavidad $\leq \pm 0,003$ mm, precisión aumentada en un 5%.

Optimización de equipos:

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, 10^{-6} Pa.

CNC de 5 ejes: Desviación $\leq \pm 0,005$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 11,5 $\mu\text{m/h}$, desviación $\leq \pm 0,05$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo:

Forja en caliente: WCCo+ AlCrN, 1000 - 1200°C, 300 - 500 MPa.

Fundición a presión: WCCo+ TiAlN, 700 - 800°C, 100 - 200 MPa.

Moldeo de vidrio: WCNi+ CrN, 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 mm^3/h), resistencia a la corrosión (pH 212, <0,01 mm/a), resistencia a la temperatura (>1000°C, <0,01 mg/cm^2).

Geometría: CMM (desviación $\leq \pm 0,005$ mm), escaneo láser (desviación de cavidad $\leq \pm 0,003$ mm).

Pruebas de alta temperatura: choque térmico (ΔT 800°C, >10⁵ veces), antioxidación (1000 horas).

Normas y especificaciones

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

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

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa.

GB/T 7997-2017: Dureza 1800-2200 HV.

ASTM G65: Tasa de desgaste <0,03 mm^3/h .

NACE MR0175: Resistencia al agrietamiento por tensión de sulfuro.

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

ISO 6508: Desviación de dureza $< \pm 40$ HV.

ISO 17879: Ensayo de choque térmico.

en conclusión

Al optimizar el grano ultrafino WC ($0,20,5 \mu\text{m}$), la fase de unión Co/Ni (612 % en peso) y el recubrimiento PVD/CVD (TiAlN / AlCrN / CrN, $25 \mu\text{m}$), los moldes de alta temperatura de carburo cementado logran alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste ($< 0,03 \text{ mm}^3/\text{h}$), resistencia a la corrosión (pH 212, $< 0,01 \text{ mm/año}$) y resistencia a altas temperaturas ($> 1000^\circ\text{C}$). Los moldes son adecuados para forjado en caliente (palanquillas de acero), fundición a presión (aleaciones de aluminio) y moldeo de vidrio (lentes ópticas). La vida útil aumenta 35 veces, Ra $0,10,3 \mu\text{m}$, y la eficiencia de moldeo aumenta un 1015 %. La optimización del tamaño del grano, el espesor del recubrimiento y la precisión de la electroerosión pueden reducir los costos (5000-20000 yuanes por pieza), y los desafíos radican en el procesamiento de alta precisión (aumento de costo del 15%) y las pruebas de choque térmico de alta temperatura (ciclo $> 10^5$ veces).

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

GRUPO CTIA Cortador de papel de carburo

1. Descripción general

CTIA GROUP desarrolla, diseña y produce herramientas de corte industriales de carburo, y personaliza el producto terminado para sus clientes. La cortadora de papel de carburo CTIA GROUP utiliza carburo de tungsteno (como WC-Co y WC-Ni) como material de cuchilla y se utiliza especialmente para el corte preciso de papel, cartón, película, papel de aluminio y otros materiales. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas (600-800 °C mantiene la resistencia) garantizan un rendimiento de corte continuo y de alta velocidad. Se utiliza ampliamente en las industrias de impresión, embalaje, fabricación de papel y papelería para satisfacer las necesidades de corte de superficies de alta precisión (tolerancia <0,01 mm) y alta calidad.

Como fabricante personalizado de herramientas de corte de carburo cementado en China con ventajas únicas y décadas de experiencia, CTIA GROUP Technology Co., Ltd. integra los procesos de diseño y fabricación avanzados de la industria con tecnologías inteligentes para proporcionar a los clientes globales herramientas de corte de papel de alto rendimiento, ayudando a las industrias de impresión y embalaje a desarrollarse de manera ecológica y eficiente.

2. Materiales y fabricación

2.1 Composición del material

Ingredientes principales

La hoja está hecha de un compuesto de carburo de tungsteno (WC, 82–92%) y un aglutinante (como Co, 6–12%; Ni, 0–5%), con trazas de TiC (0,5–2%) y TaC (0,3–1%) añadidas para mejorar la resistencia al desgaste.

WC-8Co: El contenido de Co es del 8%, alta tenacidad, adecuado para el corte a alta velocidad de papel y cartón comunes.

WC-6Co-Ni: el contenido de Co es del 6%, el contenido de Ni es del 2%, resistente a la corrosión, adecuado para entornos húmedos o papel especial (como papel bancario).

Grano ultrafino

El tamaño de partícula de WC es de 0,4 a 1,2 µm, lo que aumenta la dureza a HV1900 y mejora la resistencia al astillado en un 30 %.

Ventajas

En comparación con el acero con alto contenido de carbono, los cortadores de papel de carburo son 3 veces más duros y 5 veces más resistentes al desgaste; en comparación con los cortadores de cerámica, son más resistentes y un 50% más resistentes al impacto.

2.2 Proceso de fabricación

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

Metalurgia de polvos:

Ingredientes

Los polvos de WC de alta pureza (pureza > 99,9 %) y Co se mezclaron en un molino de bolas durante 24 horas para garantizar la uniformidad (desviación de distribución de partículas < 5 %).

reprimir

Moldeado bajo prensado isostático de 400 MPa, la densidad del tocho es >95%, lo que reduce los defectos de sinterización.

sinterización

Sinterizado en un horno de sinterización al vacío a 1400 ± 10 °C durante 2 horas bajo protección de hidrógeno, la dureza alcanza HV1800-1900 y la porosidad es <0,1 %.

Rectificado de precisión:

Utilice una amoladora CNC de cinco ejes y una muela de diamante para mecanizar la hoja hasta obtener una agudeza de <2 μm , una rectitud de <0,005 mm y una rugosidad de superficie de R_a <0,08 μm .

Los ángulos de la hoja (15–25° en un lado, 30–45° en ambos lados) garantizan un corte suave y sin rebabas.

Tecnología de recubrimiento:

Recubrimiento PVD

de TiN y TiAlN se utilizan con un espesor de 1,5-3 μm , una temperatura de deposición de 400-500 °C, una dureza de HV2800, un coeficiente de fricción de 0,2-0,3 y una mejora de la resistencia al desgaste del 60 %.

Recubrimiento DLC

Algunas herramientas de corte de alta gama utilizan un revestimiento similar al diamante (DLC) con un espesor de 1-2 μm , un coeficiente de fricción tan bajo como 0,1 y una vida útil extendida al 100%, lo que las hace adecuadas para cortes de alto acabado.

Control de calidad

Cada lote de herramientas de corte se prueba en cuanto a su composición mediante fluorescencia de rayos X (XRF) y para detectar defectos en el borde de corte mediante microscopio, de acuerdo con las normas ISO 9001 e ISO 14001.

3. Especificaciones de la cortadora de papel inteligente de carburo de tungsteno de China

Las cortadoras de papel de carburo CTIA GROUP ofrecen diversas especificaciones para satisfacer las necesidades de diferentes equipos y materiales de corte. A continuación, se muestra la tabla de especificaciones principales:

tipo	Dimensiones (mm)	Ángulo de la hoja	Grosor apropiado Grado mm	Materiales aplicables	Dispositivos aplicables
Cortador de	500×80×10–1500×120×15	15–20° en un	0,1–8	Papel estucado, papel de	Polar, Wohlenberg, Perfecta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

papel de borde recto		lado		periódico, cartón	
Cortador de papel circular	Diámetro 50–300, espesor 2–10	Bilateral 30–40°	0,05–5	Película, papel de aluminio, rollo de papel	Máquina cortadora, máquina cortadora de bobinas
cortador de papel dentado	300×50×5–800×80×8	20–25° en un lado	0,1–3	Papel para etiquetas, papel para sellos, papel perforado	Máquina troqueladora, máquina cortadora de etiquetas
Cortador de papel personalizado	Según necesidades del cliente (máximo 2000×150×20)	Ajustable de 15 a 45°	0,05–10	Papel bancario, materiales compuestos, películas especiales	Equipos personalizados (por ejemplo , Heidelberg, Muller)

tolerancia

Largo/ancho ±0,02 mm, espesor ±0,01 mm, rectitud del filo de corte <0,005 mm.

Personalización

Admite tamaños y formas de hoja no estándar (como bisel, hoja ondulada), con un ciclo de entrega de 7 a 14 días.

Paquete

El cuchillo está equipado con una micro Hardbox inteligente (tamaño 15×10×5 cm, con RFID y código QR incorporados) para un fácil reciclaje y en línea con los estándares de fabricación ecológica.

Tipos y aplicaciones de cortadores de papel de carburo

Cortador de papel de borde recto

Se utiliza para cortar hojas planas, espesor de corte 0,1-8 mm, precisión <0,01 mm, adecuado para plantas de impresión para cortar papel estucado, papel de periódico, cartón, compatible con Polar, Wohlenberg y otros equipos.

Cortador de papel circular

Se utiliza para cortar bobinas, velocidad> 200 m/min, adecuado para cortar películas de embalaje, papel de aluminio, papel en rollo, tolerancia <5 μm, ampliamente utilizado en líneas de producción de alta velocidad.

cortador de papel dentado

Se utiliza para perforar o cortar con dientes de sierra, la planitud del corte se mejora en un 30%, es adecuado para el procesamiento de papel de etiquetas y papel de sello, y se utiliza en máquinas troqueladoras.

Cortador de papel personalizado

Los ángulos de las hojas y los revestimientos están diseñados para materiales especiales (como papel bancario y materiales compuestos), como la cortadora de bisel TiAlN fabricada por China Tungsten Intelligence, que extiende la vida útil en un 25%.

Casos de aplicación de cortadoras de papel de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La guillotina de papel de borde recto CTIA GROUP (1000×100×12 mm, revestimiento de TiN) se utiliza en la guillotina de papel Polar 115 para cortar papel estucado A4 (70 g/m²) , con una producción anual de 200 millones de hojas, una vida útil de la herramienta de 600.000 veces, una reducción del 60% en la frecuencia de cambio de herramienta y una reducción del 30% en los costes de corte.

Cortadora circular de papel (diámetro de 200 x espesor de 5 mm, recubrimiento DLC) para corte de película BOPP, velocidad de 250 m/min, tolerancia <3 μm , producción anual de 50 millones de metros, vida útil de la herramienta de 1 millón de metros, la satisfacción del cliente aumentó en un 35%.

La guillotina dentada (500×60×6 mm, con recubrimiento de TiAlN) se utiliza para perforar etiquetas de papel, con una precisión de corte de <0,008 mm y una producción anual de 100 millones de hojas. La durabilidad de la herramienta aumenta un 40 % y la tasa de desperdicios se reduce un 50 %.

5. Características técnicas de la cortadora de papel de carburo

Alta eficiencia

La velocidad de corte es de 50 a 200 m/min, el espesor de corte individual es de 0,05 a 10 mm y la eficiencia de producción aumenta entre un 40 y un 60 %.

Alta precisión

La tolerancia de corte es <0,01 mm y la suavidad de corte es Ra <0,15 μm, cumpliendo con la norma ISO 9001 y las normas de la industria de la impresión (como ISO 12647).

Durabilidad

La dureza de la herramienta de carburo es de 62-65 HRC, la vida útil es de 500.000 a 1.000.000 de cortes y la frecuencia de cambio de herramienta se reduce en un 50%.

Reciclabilidad

caja rígida microinteligente (con RFID integrado y carga de datos 5G). En combinación con la fundición de zinc o métodos electroquímicos, la tasa de recuperación de tungsteno es superior al 90 % y el coste se reduce entre un 30 % y un 40 %.

Características de CTIA GROUP

La tecnología de recubrimiento DLC y carburo cementado de grano ultrafino desarrollada independientemente aumenta la vida útil de la herramienta en un 20 % en comparación con el promedio de la industria, lo que respalda las demandas de alta velocidad de las industrias de impresión y embalaje ().

6. Mantenimiento y rectificado de cortadores de papel de carburo

Mantenimiento diario

limpio

Después de cortar, limpie la cuchilla con etanol anhidro para eliminar restos de papel y residuos pegajosos para evitar la corrosión.

almacenar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Almacenar en un ambiente seco (humedad <60%), utilizando caja de herramientas personalizada de China Tungsten (incluye espuma a prueba de golpes e inhibidor de óxido).

examinar

Compruebe el desgaste del borde después de cada 100.000 cortes (aumento de 50 veces bajo un microscopio) para asegurarse de que no haya astillas.

Tecnología de reafilado

Ciclo de reafilado

La herramienta puede reafilarse cuando la profundidad de desgaste sea inferior a 0,1 mm. Se recomienda reafilarla cada 300.000 a 500.000 cortes.

Tecnología

Para el procesamiento se utilizan una muela de diamante (tamaño de grano D15) y una rectificadora CNC, con un error de ángulo de hoja <0,5° y una rugosidad de superficie Ra <0,1 μm.

frecuencia

Un cuchillo de filo recto se puede reafilar de 3 a 5 veces, y uno de filo redondo, de 2 a 4. Tras el reafilado, el rendimiento se recupera al 90 % y el coste se reduce en un 40 %.

7. Tendencia de desarrollo de las cortadoras de papel de carburo

Fabricación inteligente

Presentamos la tecnología de gemelo digital para monitorear el desgaste de las herramientas y el rendimiento de corte en tiempo real, predecir los ciclos de mantenimiento y reducir el tiempo de inactividad en un 20%.

Combinado con IA para optimizar el ángulo de la cuchilla (15–45°) y los parámetros de recubrimiento, la eficiencia de corte aumenta en un 25% ().

Fabricación ecológica

Investigar y desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co (<4%) para reducir el consumo de recursos de cobalto y reducir el impacto ambiental en un 50%.

Hardbox microinteligente , que integra tecnología RFID, código QR y 5G, mejora la eficiencia del reciclaje en un 40% y reduce las emisiones de líquidos residuales en un 60% (consulte la tendencia de fabricación ecológica de China para herramientas de corte).

Recubrimiento superduro

Desarrollar recubrimientos nano multicapa (como TiAlN / CrN , DLC/Si3N4) con una dureza de HV3500, un aumento del 70% en la resistencia al desgaste y un aumento de 2 veces en la vida útil. Optimizar el proceso de deposición de recubrimiento (recubrimiento iónico por arco, tasa de deposición aumentada en un 30%) y reducir los costos de producción en un 15%.

Personalización y modularidad

Cuchillas y recubrimientos para papeles de impresión digital (como el papel HP Indigo) y materiales compuestos de alta resistencia, que mejoran la precisión de corte en un 20 %. Fomentan el diseño modular de herramientas (como cuchillas reemplazables), reducen el tiempo de instalación en un 50 % y los costos de inventario en un 25 %.

Las cortadoras de papel de carburo de CTIA GROUP se han convertido en herramientas de corte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

esenciales en las industrias de impresión, embalaje y fabricación de papel gracias a su alta dureza (HV1800-1900), resistencia al desgaste y alta precisión (tolerancia <0,01 mm). Su carburo de grano ultrafino, su recubrimiento DLC y su sistema microinteligente de reciclaje Hardbox mejoran significativamente la vida útil de la herramienta (500.000-1 millón de cortes), la eficiencia (velocidad de 200 m/min) y su rendimiento ecológico (tasa de recuperación de tungsteno >90%). En numerosas aplicaciones, como plantas de impresión y líneas de producción de embalajes, las cortadoras han demostrado una excelente rentabilidad (reducción del 30-40 %) y un aumento del 35 % en la satisfacción del cliente.

En el futuro, CTIA GROUP continuará investigando, desarrollando y diseñando cortadores de papel de carburo a través de fabricación inteligente (gemelos digitales, optimización de IA) y reciclaje ecológico (aleaciones bajas en Co, tecnología de líquido iónico), para ayudar a la industria de la impresión y el embalaje a desarrollarse de manera ecológica y eficiente y mejorar su competitividad en el mercado global.

apéndice:

ISO 9227:2017

Prueba de corrosión

Prueba de niebla salina en atmósfera artificial

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de ensayo para realizar ensayos de niebla salina (niebla salina neutra, NSS), ensayos de niebla salina con ácido acético (niebla salina con ácido acético, AASS) y ensayos de niebla salina con ácido acético acelerado con cobre (niebla salina con ácido acético acelerado con cobre, CASS) en atmósferas artificiales para evaluar la resistencia a la corrosión de materiales metálicos y sus recubrimientos protectores (como carburo cementado, capa galvanizada o placa de acero recubierta). Los métodos de ensayo son aplicables a la comparación del comportamiento frente a la corrosión de materiales, componentes o conjuntos, pero no predicen directamente su vida útil en entornos reales. Esta norma no es aplicable a la evaluación de la resistencia a la corrosión de materiales no metálicos.

2 Referencias normativas

Las cláusulas enumeradas en los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplican las versiones referenciadas; para los documentos referenciados sin fecha, se aplican las versiones más recientes (incluidas todas las modificaciones).

ISO 1514:2016 Pinturas y barnices — Paneles de prueba estándar para ensayos

ISO 2808:2019 Pinturas y barnices — Determinación del espesor de la película

ISO 3574:2012 Chapas y flejes de acero al carbono laminados en frío — Especificaciones

Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a este documento:

Prueba de niebla salina: en condiciones controladas, se dispersa una solución de sal en gotas finas a través de un dispositivo de pulverización para formar una atmósfera corrosiva artificial para evaluar la resistencia a la corrosión de un material.

NSS (prueba de niebla salina neutra): prueba de niebla salina realizada utilizando una solución de sal neutra (pH 6,5-7,2).

AASS (prueba de niebla salina con ácido acético): prueba de niebla salina que se realiza añadiendo ácido acético a una solución salina neutra y ajustando el pH a 3,1-3,3.

de cloruro (CuCl_2) a la solución de prueba de niebla salina de acetato acelera la prueba de corrosión.

Pérdida de peso: El cambio en la masa de una muestra antes y después de una prueba, generalmente expresado en mg/cm^2 .

4 Principio de prueba

La prueba de niebla salina simula las condiciones de corrosión en entornos marinos o industriales mediante la exposición de la muestra a una atmósfera artificial que contiene gotitas de sal. La prueba NSS simula un entorno neutro de niebla salina, y las pruebas AASS y CASS aceleran la corrosión

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

mediante la acidificación y la adición de catalizadores (como el CuCl_3). 2), adecuados para evaluaciones de corrosión más exigentes. La velocidad de corrosión se evalúa mediante la pérdida de peso, el análisis de productos de corrosión o defectos superficiales (como picaduras y desconchados).

5 Equipo de prueba

5.1 Cámara de prueba de niebla salina

Volumen ≥ 400 L, asegurando un flujo de aire uniforme alrededor de la muestra.

El cuerpo de la caja está hecho de material resistente a la corrosión (como plástico reforzado con fibra de vidrio) para evitar la contaminación del material metálico.

Equipado con dispositivo de pulverización, sistema de calefacción y sistema de control de humedad.

5.2 Dispositivo de pulverización

El material de la boquilla es un material resistente a la corrosión (como el politetrafluoroetileno).

Presión de pulverización: 0,07-0,17 MPa (0,7-1,7 bar).

de gota de pulverización: 1-10 μm .

5.3 Control ambiental

Temperatura en la cámara de prueba:

Temperatura ambiente: $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

AASS y CASS: $50^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: $\geq 95\%$ HR.

6 Solución de prueba

6.1 Solución de prueba NSS

Concentración de cloruro de sodio (NaCl): $50 \text{ g/L} \pm 5 \text{ g/L}$.

pH: 6,5-7,2 (a 25°C).

Pureza de la solución: Impurezas (como Cu, Ni) $< 0,001\%$.

6.2 Solución de prueba AASS

Añade ácido acético glacial a la solución NSS y ajusta el pH a 3,1-3,3 (a 25°C).

6.3 Solución de prueba CASS

$\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ a la solución de AASS a una concentración de $0,26 \text{ g/L} \pm 0,02 \text{ g/L}$.

pH: 3,1-3,3 (a 25°C).

6.4 Recopilación de soluciones

Velocidad de recolección: 1,0-2,0 mL/h (área horizontal de 80 cm^2).

Concentración de la solución de recolección de NaCl : $50 \text{ g/L} \pm 10 \text{ g/L}$.

7. Requisitos de la muestra

7.1 Tipo de muestra

Materiales metálicos, materiales revestidos o componentes, con dimensiones adecuadas a la cámara de ensayo (recomendado $150 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$).

La rugosidad superficial de la muestra de carburo cementado es $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$.

7.2 Número de muestras

Se incluyeron al menos 3 muestras en cada grupo para garantizar la confiabilidad estadística.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Preparación de la muestra

Limpie la muestra para eliminar el aceite y los óxidos (se puede limpiar con etanol anhidro).
Los bordes de las muestras deben ser lisos para evitar bordes y esquinas afilados que puedan provocar corrosión local.

Registre la masa inicial de la muestra (precisión $\pm 0,001$ g).

7.4 Colocación de la muestra

La muestra se coloca en un ángulo de 15° - 30° con respecto a la vertical.

La distancia entre las muestras debe ser ≥ 20 mm para garantizar que las gotas no gotee sobre otras.

8 Procedimientos de prueba

8.1 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $35^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 6,5-7,2.

EAA: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3.

CASS: $50^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, pH 3,1-3,3, con CuCl_2 .

8.2 Tiempo de prueba

Ciclos de prueba recomendados: 24 h, 48 h, 96 h, 240 h, 720 h (seleccionar según los requisitos de la aplicación).

Se recomiendan 720 h para el carburo cementado para evaluar la resistencia a la corrosión a largo plazo.

8.3 Operación de prueba

Precaliente la cámara de prueba a la temperatura especificada. Añada la solución de prueba y active el pulverizador. Coloque la muestra, cierre la cámara de prueba y registre la hora de inicio de la prueba. Compruebe el pH de la solución y la velocidad de recolección cada 24 horas.

8.4 Fin de la prueba

Las muestras fueron extraídas y enjuagadas con agua destilada para eliminar los depósitos de sal.

Lavar con etanol anhidro y secar ($60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, 30 min).

Registre la masa final de la muestra (precisión $\pm 0,001$ g).

9 Evaluación de resultados

9.1 Cálculo de pérdida de peso

Tasa de pérdida de peso (mg/cm^2) = (masa inicial - masa final) / área de superficie de la muestra.
 cm^2 después de 720 h de NSS $\pm 0,01$ mg/cm^2 .

9.2 Análisis de superficies

Utilice un microscopio óptico (aumento $50\times$ - $200\times$) para observar picaduras, desconchados o productos de corrosión.

Registre el número, tamaño (diámetro, profundidad) y distribución de las picaduras de corrosión.

9.3 Criterios de evaluación

De acuerdo con los requisitos de la aplicación, se establecen los estándares calificados de tasa de pérdida de peso o defectos de superficie.

Por ejemplo: pérdida de peso del carburo de la válvula química $< 0,1$ mg/cm^2 , profundidad de picaduras < 5 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: tipo de material, tamaño, estado de la superficie.

Condiciones de prueba: tipo de prueba (NSS/AASS/CASS), temperatura, pH, tiempo de prueba.

Resultados: tasa de pérdida de peso, número y tamaño de picaduras de corrosión, fotografías de la superficie.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos de la solicitud.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de la resistencia a la niebla salina de materiales típicos

Tipo de material	Tipo de prueba	Tiempo de prueba (h)	Tasa de pérdida de peso (mg/cm²)	Aplicaciones típicas
Carburo cementado (WC-10Co)	Sistema Nacional de Seguridad	720	0,08 ± 0,01	Equipos marinos
Chapa de acero galvanizado	Asociación Estadounidense de Abogados	240	0,15 ± 0,02	Componentes de construcción
Acero inoxidable (304)	CASS	96	0,05 ± 0,01	Equipos de procesamiento de alimentos

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales

Temperatura de la cámara de prueba: 15 °C a 35 °C, se recomienda 23 ± 2 °C.

Humedad: 30%-70%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación < 0,02 mm/m.

Resumir

La norma ISO 9227:2017 "Ensayos de corrosión - Ensayos de niebla salina en atmósferas artificiales" proporciona métodos estandarizados para evaluar la resistencia a la corrosión de materiales metálicos y recubrimientos protectores, incluyendo tres tipos de prueba: NSS, AASS y CASS. Mediante condiciones y procedimientos de prueba estandarizados, se puede comparar eficazmente el rendimiento de los materiales en entornos corrosivos simulados, lo que proporciona una base científica para la selección de materiales y aplicaciones de ingeniería (como el uso de carburo cementado en equipos marinos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China
GB/T 18376-2014 Métodos para probar la resistencia a la corrosión y al desgaste de
carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 18376-2001 «Métodos de ensayo para la resistencia a la corrosión y al desgaste del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 18376-2001, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se añadió el método de prueba electroquímica (ver 5.3);

Se ajustaron las condiciones de prueba de niebla salina y se cambió la temperatura de 40 °C a 35 °C ± 2 °C (ver 5.1);

Se modificaron la carga y el número de ciclos del ensayo de desgaste abrasivo. La carga se modificó de 30 N a 20 N $\pm 0,5$ N, y el número de ciclos se modificó de 500 a 1000 ± 10 (véase 6.2).

El requisito de rugosidad de la superficie de la muestra se incrementa a $Ra < 0,8 \mu m \pm 0,1 \mu m$ (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los principales redactores de esta norma son: Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2014.

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de ensayo para la resistencia a la corrosión y al desgaste de los carburos cementados. Es aplicable a los carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, incluyendo, entre otros, los sistemas WC-Co y WC-Ni.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 12444-2006 Métodos de ensayo para la fricción por deslizamiento y el desgaste de materiales metálicos

GB/T 16545-2008 Método de prueba de corrosión por niebla salina para materiales metálicos

ISO 9227-2017 Ensayo de corrosión - Corrosividad en atmósfera artificial

3 Términos y definiciones

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

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Resistencia a la corrosión

La capacidad del carburo cementado para resistir la pérdida de masa o el daño superficial en medios corrosivos (como soluciones ácidas o niebla salina), generalmente expresada en tasa de pérdida de peso (mg/cm^2) y densidad de corriente de corrosión (i_{corr} , A/cm^2).

3.2 Resistencia al desgaste

La capacidad del carburo cementado para resistir el desgaste del material bajo fricción mecánica o acción abrasiva, generalmente expresada en pérdida de masa por desgaste (mg) o volumen de desgaste (mm^3).

3.3 Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})

En pruebas electroquímicas, es un parámetro que refleja la velocidad de corrosión del material, con la unidad de A/cm^2 .

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

4.1.1 Material de la muestra: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión, y la composición debe cumplir con los requisitos técnicos del producto.

4.1.2 Tamaño de la muestra: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. 4.1.3 Número de muestras: cada grupo de pruebas debe repetirse más de 3 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

de la muestra se pule mecánicamente, con una rugosidad de $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Limpieza: Limpieza ultrasónica con etanol anhidro durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$, secado para su uso. 4.2.3 Masa inicial: Medida con balanza analítica, con precisión de $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Prueba de resistencia a la corrosión

5.1 Prueba de niebla salina

5.1.1 Condiciones de prueba:

Solución: Solución de NaCl al $5\% \pm 0,1\%$ (fracción másica), pH 6,5-7,2.

Temperatura: $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Duración: $48 \text{ horas} \pm 2 \text{ horas}$.

5.1.2 Equipo de prueba

Cámara de niebla salina, volumen de pulverización $1-2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$.

5.1.3 Evaluación de resultados:

Tasa de pérdida de peso = $(m_0 - m_1) / A$, unidad: mg/cm^2 , precisión: $\pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$, donde m_0 es la masa antes de la prueba, m_1 es la masa después de la prueba y A es el área de superficie de la muestra.

Observe la morfología de la corrosión de la superficie y registre la profundidad de la picadura de corrosión (precisión $\pm 0,5 \mu\text{m}$).

5.2 Prueba de inmersión en ácido

5.2.1 Condiciones de prueba:

Solución: Solución de H_2SO_4 al $1\% \pm 0,1\%$ (fracción de volumen).

Temperatura: $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Tiempo de inmersión: $24 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2.2 Equipo de prueba

Baño de agua a temperatura constante.

5.2.3 Evaluación de resultados:

La tasa de pérdida de peso se calcula de acuerdo con 5.1.3.

Mida la profundidad de las picaduras de corrosión con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

5.3 Pruebas electroquímicas

5.3.1 Condiciones de prueba:

Electrolito: solución de NaCl al $3,5\% \pm 0,1\%$, temperatura $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Sistema de electrodos: electrodo de trabajo (aleación dura), electrodo de referencia (electrodo de calomelanos saturados SCE), electrodo auxiliar (electrodo de platino).

Velocidad de escaneo: $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$, rango de potencial $\pm 0,25 \text{ V}$ vs. E_{corr} .

5.3.2 Equipo de prueba

Estación de trabajo electroquímica, precisión de potencial $\pm 0,001 \text{ V}$, precisión de corriente $\pm 10^{-9} \text{ A}$.

5.3.3 Evaluación de resultados:

Mide el potencial de corrosión (E_{corr} , precisión $\pm 0,02 \text{ V}$) y la densidad de corriente de corrosión (i_{corr} , precisión $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

Se utilizó el análisis de ajuste de Tafel y la prueba se repitió ≥ 3 veces.

6 Prueba de resistencia al desgaste

6.1 Prueba de fricción y desgaste

6.1.1 Condiciones de prueba:

Carga: $50 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$.

Velocidad de deslizamiento: $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$.

Tiempo de prueba: $30 \text{ minutos} \pm 1 \text{ minuto}$.

Par de fricción: pasador de carburo, el material del par es un disco de acero endurecido (dureza HV 600 ± 50).

6.1.2 Equipo de prueba

Máquina de prueba de fricción y desgaste, precisión de carga $\pm 1 \text{ N}$, precisión de velocidad $\pm 0,01 \text{ m/s}$.

6.1.3 Evaluación de resultados:

Pérdida de masa por desgaste = $m_0 - m_1$, unidad: mg, precisión: $\pm 0,01 \text{ mg}$.

Observe la profundidad y el ancho de la cicatriz de desgaste con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

6.2 Prueba de desgaste abrasivo

6.2.1 Condiciones de prueba:

Abrasivo: SiC, tamaño de partícula $100-150 \mu\text{m}$.

Carga: $20 \text{ N} \pm 0,5 \text{ N}$.

Número de ciclos de prueba: $1000 \text{ ciclos} \pm 10 \text{ ciclos}$.

Par de fricción: muestra de carburo, el material de acoplamiento es un disco abrasivo.

6.2.2 Equipo de prueba

Máquina de prueba de desgaste abrasivo, precisión de carga $\pm 0,5 \text{ N}$, precisión de círculo ± 10 círculos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.2.3 Evaluación de resultados:

Volumen de desgaste = $(m_0 - m_1) / \rho$, unidad: mm^3 , precisión: $\pm 0,01 \text{ mm}^3$, donde ρ es la densidad del material, precisión: $\pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

Mida el perfil de la cicatriz de desgaste con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

7 Procesamiento de datos

7.1 Todos los resultados de las pruebas son el promedio de más de 3 mediciones.

7.2 La resistencia a la corrosión se expresa como tasa de pérdida de peso (mg/cm^2 , precisión $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$) e i_{corr} (A/cm^2 , precisión $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

7.3 La resistencia al desgaste se expresa como pérdida de masa por desgaste (mg , precisión $\pm 0,01 \text{ mg}$) o volumen de desgaste (mm^3 , precisión $\pm 0,01 \text{ mm}^3$).

7.4 Los resultados están acompañados de un análisis de incertidumbre con un nivel de confianza del 95%.

8 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (como temperatura, tiempo, carga, etc.).

Resultados de pruebas (pérdida de peso, i_{corr} , pérdida por desgaste, etc.) e incertidumbres.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice normativo)

Ejemplo de preparación de muestra

A.1 Corte de muestra: Utilizar muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $10 \text{ m/s} \pm 1 \text{ m/s}$.

A.2 Pulido: Utilizar papel de lija de SiC (grano #800-#1200), y finalmente pulir con suspensión de diamante (grano $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$). A.3 Limpieza: Limpieza ultrasónica durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$, pesar después del secado.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

B.1 WC10Ni: Tasa de pérdida de peso por niebla salina $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-6} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$, pérdida de masa por desgaste $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

B.2 WC10 Co: Tasa de pérdida de peso por niebla salina $0,07 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, $i_{\text{corr}} 10^{-5} \text{ A/cm}^2 \pm 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, pérdida de masa por desgaste $0,12 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

Para

asuntos no contemplados en esta norma, consulte las normas internacionales pertinentes (como ISO 3738 e ISO 28079) o consulte con el comité técnico. Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 9 de julio de 2014 y entró en vigor el 1 de octubre de 2014.

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:

Norma internacional

ISO 4287:1997 Especificaciones geométricas del producto

— Textura de la superficie: método de contorno

— Términos, definiciones y parámetros de textura de superficie

Especificaciones geométricas del producto (GPS)

— Textura de la superficie: Método de perfil

— Términos, definiciones y parámetros de textura superficial

Descripción general

La norma ISO 4287:1997 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) titulada "Especificaciones Geométricas de Productos (GPS) — Textura superficial: Método de perfil — Términos, definiciones y parámetros de textura superficial". La norma se publicó el 1 de agosto de 1997. La última versión, ISO 4287:1997 (Amd 1:2009), entró en vigor en 2018. La norma ISO 4287 fue desarrollada por el ISO/TC 213 (Especificaciones y Verificación de Productos Geométricos) para proporcionar términos, definiciones y parámetros unificados para el método de perfil de textura superficial, aplicable a la evaluación de la calidad superficial de piezas mecánicas, herramientas y materiales. Esta norma se utiliza ampliamente en fabricación, control de calidad y diseño de ingeniería.

1 Alcance

Objetos aplicables: Aplicable a piezas que miden y evalúan la textura de la superficie utilizando el método de perfil, incluidos metales, plásticos y cerámicas.

Propósito: Definir la terminología y los métodos de cálculo de los parámetros de textura de la superficie y brindar orientación para la medición y el informe de la rugosidad de la superficie.

No aplicable: No aplicable a mediciones sin perfil de topografía de superficie (como el método de área) o análisis de microestructura.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 3274:1996 Especificaciones geométricas de productos (GPS)

— Textura de la superficie: Método de perfil — Características nominales de los instrumentos de contacto (aguja)

ISO 4288:1996 Especificaciones geométricas de productos (GPS)

— Textura superficial: Método del perfil — Reglas y procedimientos para la evaluación de la textura superficial

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Conceptos básicos

3.1.1 Textura de la superficie

La superficie de una pieza es la suma de su rugosidad, ondulación y error de forma. 3.1.2 Perfil Sección transversal bidimensional de la textura de la superficie, que representa la curva de altura versus longitud.

3.2 Parámetros de rugosidad

3.2.1 Ra (Desviación media aritmética)

Perfil Desviación media aritmética, definida como el promedio de los valores absolutos de la desviación del perfil dentro de la longitud de muestreo, en μm (Micrómetros). 3.2.2 Rq (Desviación cuadrática media)

Perfil Desviación cuadrática media, definida como la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de la desviación del perfil dentro de la longitud de muestreo, en μm (Micrómetros). 3.2.3 Rz (Altura máxima del perfil)

Altura máxima del perfil, definida como la diferencia de altura entre el pico más alto y el valle más bajo dentro de la longitud de muestreo, en μm (Micrómetros). 3.2.4 Rt (Altura total del perfil)

Altura total del perfil, definida como la diferencia de altura máxima entre el pico más alto y el valle más bajo dentro de la longitud de evaluación, en μm (Micrómetros). 3.2.5 Rp (Altura máxima del pico del perfil)

Altura del pico dentro de la longitud de muestreo, en μm (Micrómetros).

3.2.6 Rv (profundidad máxima del valle del perfil) es

la profundidad más profunda del valle dentro de la longitud de muestreo, en μm (micrómetros).

3.3 Longitudes de muestreo y evaluación

3.3.1 Longitud de muestreo (l_r)

La longitud de referencia utilizada para calcular los parámetros de rugosidad, normalmente 0,25 mm, 0,8 mm o 2,5 mm. 3.3.2 Longitud de evaluación (l_n)

La suma de múltiples longitudes de muestreo, utilizada para una evaluación integral de la textura de la superficie, normalmente 5 l_r . 3.3.3 Longitud transversal (l_t)

La longitud total realmente escaneada durante el proceso de medición, normalmente 1,5 l_n .

3.4 Otros parámetros

3.4.1 Sk (profundidad de rugosidad del núcleo)

Perfil Profundidad de rugosidad del núcleo, refleja las propiedades del material portante, la unidad es μm (micrómetros). 3.4.2 Rsk (asimetría)

Perfil La asimetría describe la asimetría de la distribución de la altura, la unidad no está especificada.

3.4.3 Rku (curtosis) Perfil

Curtosis describe la nitidez de la distribución de la altura, la unidad no está especificada.

4 Métodos de cálculo de parámetros

4.1 Parámetros de rugosidad

Cálculo de Ra:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$Ra = \frac{1}{lr} \int_0^{lr} |z(x)| dx$$

其中, $z(x)$ 为轮廓偏差 (Profile deviation), lr 为采样长度 (Sampling length)。

Rq 计算 (Calculation of Rq):

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{lr} \int_0^{lr} z(x)^2 dx}$$

Rz 计算 (Calculation of Rz): 取采样长度 (Sampling length) 内最大峰高 (Peak height) 与最低谷深 (Valley depth) 的和。

Rt 计算 (Calculation of Rt): 取评估长度 (Evaluation length) 内最大峰高 (Peak height) 与最低谷深 (Valley depth) 的和。

4.2 Condiciones de medición

Instrumento: Instrumento de contacto (aguja) conforme a la norma ISO 3274, con un radio de aguja $\leq 5 \mu m$.

Filtrado: Utilice un filtro paso alto para eliminar el efecto de la ondulación. La longitud de onda de corte λc suele ser de 0,8 mm.

5 Requisitos de presentación de informes

Valores de los parámetros: Informa Ra , Rq , Rz y otros valores de los parámetros (Valores de los parámetros), la unidad es μm (Micrómetros), la precisión es $\pm 0,01 \mu m$.

Condiciones de medición: incluye longitud de muestreo, longitud de evaluación, condiciones de filtrado y tipo de aguja.

Incertidumbre: La incertidumbre de la medición se proporciona dentro de un nivel de confianza del 95%.

6 Apéndice

Apéndice A: Datos típicos

Pieza de acero mecanizada: $Ra = 0,8 \mu m \pm 0,01 \mu m$, $Rz = 4,5 \mu m \pm 0,1 \mu m$.

Carburo cementado pulido: $Ra = 0,02 \mu m \pm 0,01 \mu m$, $Rz = 0,15 \mu m \pm 0,01 \mu m$.

Apéndice B: Ejemplo de medición

La longitud de muestreo es de 0,8 mm, la longitud de evaluación es de 4 mm y el valor de medición de Ra es de $1,2 \mu m$.

ilustrar

Normas relacionadas: La norma ISO 3274 especifica las características de los instrumentos de medición. La norma ISO 4288 proporciona reglas y procedimientos para la evaluación de la textura superficial.

Validez: ISO 4287:1997 (Amd 1:2009) confirmada como válida en 2018, puede actualizarse en el futuro según el marco GPS.

Dónde conseguirlo: El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

Nota: Durante la implementación, es necesario combinar el proceso de tratamiento de superficie

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

específico y la calibración del equipo de medición, y consultar con técnicos profesionales.

apéndice:

Norma internacional

ISO 3274:1996 Especificaciones geométricas de productos (GPS)

— Textura de la superficie: método de contorno

Especificaciones geométricas del producto (GPS) para instrumentos de contacto

— Textura de la superficie: Método de perfil

— Características nominales de los instrumentos de contacto (aguja)

Descripción general

La norma ISO 3274:1996 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y titulada "Especificaciones geométricas de productos - Textura superficial: Método de perfilado - Características nominales de los instrumentos de contacto". Se publicó el 1 de agosto de 1996, y su última versión, la ISO 3274:1996 (Amd. 1:2009), cuya validez se confirmó en 2019. La norma ISO 3274 fue desarrollada por el ISO/TC 213 (Especificaciones geométricas de productos y verificación) para especificar las características nominales de los instrumentos de contacto utilizados para la medición de la rugosidad superficial, incluyendo sondas, dispositivos de accionamiento y requisitos de filtros. Esta norma proporciona una base técnica para la medición de la rugosidad superficial y se utiliza ampliamente en la fabricación, la ingeniería mecánica y los ensayos de materiales.

1 Alcance

Aplicable a : Perfilometría para medir la textura de superficies mediante instrumentos de contacto, cubriendo materiales como metales, plásticos y cerámicas.

Objetivo : Definir las características nominales de los instrumentos de contacto para garantizar la comparabilidad y consistencia de los resultados de la medición.

No aplicable : No es adecuado para su uso con instrumentos de medición sin contacto (como equipos ópticos o láser) ni para análisis microestructurales.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 4287:1997 Especificaciones geométricas del producto — Textura de la superficie: Método del perfil — Términos, definiciones y parámetros de textura de la superficie

ISO 4288:1996 Especificaciones geométricas del producto — Textura de la superficie: Método del perfil — Reglas y procedimientos para la evaluación de la textura de la superficie

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Instrumento de contacto

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

Un dispositivo que utiliza una sonda física para contactar la superficie para la medición, utilizado para obtener datos del perfil de la superficie. 3.2 La parte al final del instrumento **de sonda** que contacta la superficie y es responsable de detectar los cambios de altura. 3.3 **Longitud de muestreo**

La longitud de referencia utilizada para medir la textura de la superficie, normalmente 0,25 mm, 0,8 mm o 2,5 mm. 3.4 Filtro de **longitud de onda de corte**

La longitud crítica utilizada para separar la rugosidad y la ondulación, un valor común es 0,8 mm.

4 Requisitos de las características del instrumento

4.1 Sonda

Forma : Punta cónica o esférica, radio de la punta típicamente de 2 μm a 10 μm .

Materiales : Materiales resistentes al desgaste como el diamante o el carburo.

Fuerza de contacto : 0,5 mN a 4 mN , dependiendo de la dureza y rugosidad de la superficie.

4.2 Dispositivo de accionamiento

Velocidad de movimiento : 0,1 mm/s a 1 mm/s, precisión $\pm 0,02$ mm/s.

Rectitud : El error de rectitud de la trayectoria en movimiento es $\leq 0,5$ μm .

Resolución : resolución de altura $\leq 0,01$ μm , resolución de longitud $\leq 0,1$ μm .

4.3 Filtros

Tipo : Filtro paso alto con corrección de fase o 2RC.

Longitud de onda de corte (λ_c) : 0,08 mm, 0,25 mm, 0,8 mm o 2,5 mm, seleccione según los requisitos de medición.

Características de transferencia : de acuerdo con los requisitos de la norma ISO 11562, tasa de atenuación $\geq 75\%$.

5 Condiciones de medición

Condiciones ambientales : temperatura $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humedad 40%-60%.

Preparación de la superficie : La superficie de la muestra debe estar limpia, libre de aceite y suciedad, con una rugosidad de $R_a \leq 0,8$ μm .

Dirección de medición : mida a lo largo de la dirección de procesamiento principal o la dirección vertical de la pieza.

6 Recopilación y procesamiento de datos

Intervalo de muestreo : se ajusta automáticamente de acuerdo con la longitud de muestreo, el intervalo máximo es $\leq 0,1$ μm .

Número de puntos de datos : al menos 5000 puntos de datos por longitud de muestreo.

Filtrado : utilice una longitud de onda de corte específica para eliminar los efectos de la ondulación.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie.

Modelo del instrumento, tipo de sonda y fuerza de contacto.

Condiciones de medición (por ejemplo, longitud de muestreo, longitud de onda de corte).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados de medición e incertidumbres.

Fecha de prueba y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

Piezas de acero mecanizadas : radio de la sonda 5 μm , longitud de muestreo 0,8 mm, Ra = 0,8 μm .

Carburo de pulido : radio de la sonda 2 μm , longitud de muestreo 0,25 mm, Ra = 0,02 μm .

ilustrar

Normas relacionadas :

La norma ISO 4287 proporciona definiciones de parámetros de textura de la superficie.

La norma ISO 4288 proporciona reglas y procedimientos para la evaluación.

Validez : ISO 3274:1996 (Amd 1:2009) confirmada como válida en 2019 y puede actualizarse en el futuro en función de los avances tecnológicos.

Dónde conseguirlo : El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

Nota : Durante la implementación, es necesario calibrar el instrumento y consultar a técnicos profesionales según los requisitos de medición específicos.

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

Norma internacional

ISO 4288:1996 Especificaciones geométricas del producto

— Textura de la superficie: método de contorno

— Reglas y procedimientos para la evaluación de la textura de la superficie

Especificaciones geométricas del producto

— Textura de la superficie: Método de perfil

— Normas y procedimientos para la evaluación de la textura superficial

Descripción general

La norma ISO 4288:1996 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (OIN) y titulada "Especificaciones geométricas de productos - Textura superficial: Método de perfilado - Reglas y procedimientos para la evaluación de la textura superficial". Se publicó el 1 de agosto de 1996, y su última versión, la ISO 4288:1996 (Amd. 1:2003), cuya validez se confirmó en 2018. La ISO 4288 fue desarrollada por el ISO/TC 213 (Especificaciones geométricas de productos y verificación) para proporcionar reglas y procedimientos de evaluación para el método de perfilado de la textura superficial, incluyendo las condiciones de medición, el procesamiento de datos y la generación de informes de resultados. Esta norma se aplica al control de calidad superficial de piezas mecánicas, herramientas y materiales, y se utiliza ampliamente en los sectores de la fabricación y la ingeniería.

1 Alcance

Objetos aplicables : Adecuado para piezas que miden y evalúan la textura de la superficie mediante perfilometría, incluidos materiales metálicos, plásticos y cerámicos.

Propósito : Especificar reglas y procedimientos para la evaluación de la textura de la superficie para garantizar la consistencia y comparabilidad de los resultados de la medición.

No aplicable : No aplicable para métodos sin contorno (por ejemplo, métodos planimétricos) o análisis microestructural.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 3274:1996 Especificaciones geométricas del producto — Textura de la superficie: Perfilometría — Características nominales para instrumentos de contacto

ISO 4287:1997 Especificaciones geométricas del producto — Textura de la superficie: Método del perfil — Términos, definiciones y parámetros de textura de la superficie

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Textura de la superficie

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

La suma de la rugosidad, la ondulación y la morfología de error de la superficie de la pieza. 3.2

Perfil

Una sección transversal bidimensional de la textura de la superficie, que representa una curva de altura versus longitud. 3.3 **Longitud de muestreo**

Longitud de referencia utilizada para calcular los parámetros de rugosidad, normalmente 0,25 mm, 0,8 mm o 2,5 mm. 3.4 **Longitud de evaluación**

La suma de múltiples longitudes de muestreo, utilizada para una evaluación integral de la textura de la superficie, normalmente 5 lr .

4 Condiciones de medición

4.1 Instrumento

Para los instrumentos de contacto que cumplen con la norma ISO 3274, el radio de la sonda suele ser de entre 2 μm y 10 μm .

Velocidad de movimiento: 0,1 mm/s a 1 mm/s, precisión $\pm 0,02$ mm/s.

4.2 Condiciones ambientales

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 40%-60%.

Evite las vibraciones y las interferencias electromagnéticas.

4.3 Preparación de la superficie

de la muestra está limpia, libre de aceite y suciedad, y la rugosidad $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Dirección de medición: A lo largo de la dirección principal de procesamiento o perpendicular a ella.

5 reglas de evaluación

5.1 Selección de la longitud de muestreo

Seleccione la longitud de muestreo en función de las características de la textura de la superficie:

Superficie fina: 0,25 mm.

Superficie general: 0,8 mm.

Superficie rugosa: 2,5 mm.

5.2 Filtrado

Se utiliza un filtro de paso alto con una longitud de onda de corte λ_c normalmente de 0,8 mm.

Cumple con los requisitos de corrección de fase de la norma ISO 11562 con una atenuación de $\geq 75\%$.

5.3 Procesamiento de datos

Parámetros de rugosidad : calcule R_a , R_q , R_z y otros parámetros.

Procesamiento de valores atípicos : elimine datos obviamente anormales y vuelva a medir.

Incertidumbre : Evalúa el error ocasionado por el equipo de medición y su operación, con un nivel de confianza del 95%.

6 Procedimiento de evaluación

Etapas de preparación : calibrar el instrumento y limpiar la superficie de la muestra.

Fase de medición : escanee a lo largo de la dirección especificada y registre los datos del contorno.

Fase de análisis : Aplicar filtros y calcular valores de parámetros.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fase de informe : registrar los resultados y compararlos con los requisitos de tolerancia.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie. Condiciones de medición (p. ej., longitud de muestreo, longitud de onda de corte , dirección de medición).

Valores e incertidumbres de los parámetros de textura superficial. Fecha de la prueba y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

Piezas de acero mecanizadas : longitud de muestreo 0,8 mm, $R_a = 0,8 \mu m$, $R_z = 4,5 \mu m$.

Carburo pulido : longitud de muestreo 0,25 mm, $R_a = 0,02 \mu m$, $R_z = 0,15 \mu m$.

Apéndice B: Ejemplos de medición La longitud de evaluación fue de 4 mm, la longitud de onda de corte fue de 0,8 mm y el valor R_a medido fue de $1,2 \mu m$.

ilustrar

Normas relevantes : La norma ISO 3274 especifica las características nominales de los instrumentos de contacto. La norma ISO 4287 define los parámetros de textura superficial.

Validez : ISO 4288:1996 (Amd 1:2003) Confirmada su validez en 2018, puede actualizarse en el futuro según el marco GPS.

Dónde conseguirlo : El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO .

Nota : Durante la implementación, es necesario calibrar el instrumento y consultar a técnicos profesionales según los requisitos de medición específicos.

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:

Norma Nacional de la República Popular China

GB/T 12444-2006 Métodos

para probar la fricción por deslizamiento y el desgaste de materiales metálicos

Prefacio

Esta norma fue elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2000 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 12444-1990 «Métodos de ensayo para la fricción por deslizamiento y el desgaste de materiales metálicos».

En comparación con la GB/T 12444-1990, los principales cambios técnicos son los siguientes:

El rango de carga de prueba se ajustó de 20-100 N a $10-200\text{ N} \pm 1\text{ N}$ (ver 5.2);

El rango de velocidad de deslizamiento se modificó de 0,05-0,5 m/s a $0,01-1\text{ m/s} \pm 0,01\text{ m/s}$ (ver 5.2);

Se agregaron los requisitos de selección para los materiales del par de fricción y se aclaró la dureza de los materiales emparejados (ver 4.2);

El requisito de precisión para la medición de la pérdida de masa por desgaste se ha perfeccionado de $\pm 0,1\text{ mg}$ a $\pm 0,01\text{ mg}$ (véase 6.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Hierro y el Acero (SAC/TC 183).

Las unidades de redacción de esta norma son: Instituto de Investigación de Metales, Academia China de Ciencias, Instituto de Investigación del Hierro y el Acero de Beijing, Universidad de Tsinghua. Los principales redactores de esta norma son: Esta norma entrará en vigor el 1 de diciembre de 2006.

1 Alcance

Esta norma especifica el método para el ensayo de fricción por deslizamiento y desgaste de materiales metálicos, aplicable a la evaluación de la resistencia al desgaste de materiales metálicos (como acero, aleaciones, carburo cementado, etc.) en condiciones de fricción seca o lubricación. El método de ensayo se basa en la forma de contacto pasador-disco y puede utilizarse para control de calidad, selección de materiales y comparación de rendimiento.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 1031-1995 Determinación de la densidad y densidad relativa de plásticos

GB/T 6682-2008 Especificaciones y métodos de prueba para el agua utilizada en laboratorios analíticos

ISO 4287:1997 Parámetros de geometría de superficie: Términos, definiciones y parámetros de

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

perfilometría

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 La fricción por deslizamiento es

la resistencia generada por el contacto entre dos superficies en movimiento relativo, la unidad es N.

3.2 La pérdida de masa por desgaste es la diferencia de masa de la muestra antes y después de la prueba, la unidad es mg, lo que refleja la resistencia al desgaste del material. 3.3 El coeficiente de fricción es la relación entre la fuerza de fricción por deslizamiento y la carga de presión normal, la unidad es adimensional y la precisión es $\pm 0,01$.

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

4.1.1 Material de la muestra: Materiales metálicos, incluidos, entre otros, acero, aleaciones y aleaciones duras.

4.1.2 Forma de la muestra: Pasador cilíndrico, tamaño $\varnothing 6 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, o según lo determinado por acuerdo. 4.1.3 Número de muestras: Cada grupo de prueba se repetirá más de 3 veces.

4.2 Par de fricción

4.2.1 Material de acoplamiento: normalmente placa de acero endurecido (dureza HV 600 ± 50) o material especificado por acuerdo.

4.2.2 Tratamiento de la superficie: rugosidad superficial del material de acoplamiento $R_a \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3 Procesamiento de muestras

de la muestra se pule mecánicamente, con una rugosidad de $R_a \leq 0,4 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.3.2 Limpieza: Limpieza ultrasónica con etanol anhidro durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$, pesando después del secado, con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.3.3 Estado inicial: Asegurarse que la muestra no presente manchas de aceite ni capa de óxido.

5 Métodos de prueba

5.1 Equipo de prueba

5.1.1 Máquina de ensayo de fricción y desgaste: con funciones de control de carga (precisión $\pm 1 \text{ N}$), control de velocidad (precisión $\pm 0,01 \text{ m/s}$) y medición de fuerza de fricción (precisión $\pm 0,1 \text{ N}$).

5.1.2 Condiciones ambientales: temperatura $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humedad $< 65\%$, o condiciones de lubricación determinadas de común acuerdo.

5.2 Condiciones de prueba

5.2.1 Carga: $10\text{-}200 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$, ajustable según las propiedades del material.

5.2.2 Velocidad de deslizamiento: $0,01\text{-}1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$. 5.2.3 Tiempo de prueba: $30 \text{ minutos} \pm 1 \text{ minuto}$, o distancia de deslizamiento $100 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$. 5.2.4 Forma de contacto: Pin-disco, área de contacto aproximadamente $0,28 \text{ cm}^2 \pm 0,01 \text{ cm}^2$.

5.3 Procedimiento de prueba

5.3.1 Instalar la muestra: Fijar la muestra al asiento del pasador de la máquina de prueba, y el

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

material correspondiente es una placa horizontal.

5.3.2 Aplicar la carga: Cargar gradualmente hasta el valor establecido y estabilizar durante 1 minuto ± 10 segundos. 5.3.3 Iniciar la prueba: Registrar la fuerza de fricción, la distancia de deslizamiento y el tiempo de prueba. 5.3.4 Finalizar la prueba: Descargar, retirar la muestra, limpiarla y pesarla.

6 Procesamiento de datos

6.1 Coeficiente de fricción

6.1.1 Fórmula de cálculo:

$$\mu = \frac{F}{N}$$

其中, μ 为摩擦系数, F 为摩擦力 (N), N 为正压载荷 (N)。

6.1.2 Precisión del resultado: $\pm 0,01$, tomando el valor promedio de 5 mediciones.

6.2 Pérdida de masa por desgaste

6.2.1 Fórmula de cálculo:

$$\Delta m = m_0 - m_1$$

其中, Δm 为磨损质量损失 (mg), m_0 为试验前质量, m_1 为试验后质量。

6.3 Medición de la cicatriz de desgaste

6.3.1 Utilice un microscopio óptico o un perfilómetro para medir la profundidad y el ancho de la cicatriz de desgaste con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

6.3.2 Registre la morfología de la cicatriz de desgaste y realice un análisis SEM si es necesario.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (como carga, velocidad, tiempo, etc.).

Resultados de pruebas (coeficiente de fricción, pérdida de masa por desgaste, tamaño de la cicatriz de desgaste, etc.) e incertidumbres.

Fecha de prueba y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Ejemplo de preparación de muestra

A.1 Corte de muestra: Utilizar una muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Pulido: Utilizar papel de lija de SiC (grano 800-1200) y finalmente pulir con suspensión de diamante (grano $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

A.3 Limpieza: Limpieza ultrasónica durante $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$, pesar después del secado.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

B.1 Acero 45#: carga 50 N, velocidad 0,1 m/s, coeficiente de fricción $0,35 \pm 0,01$, pérdida de masa por desgaste $0,15 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B.2 WC10 Co: carga 100 N, velocidad 0,5 m/s, coeficiente de fricción $0,25 \pm 0,01$, pérdida de masa por desgaste $0,08 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

ilustrar

Para asuntos no contemplados en esta norma, consulte las normas internacionales pertinentes (como la ASTM G99) o consulte con el comité técnico.

Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 18 de julio de 2006 y entró en vigor el 1 de diciembre de 2006.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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

Norma Nacional de la República Popular China
GB/T 16545-2008 Métodos de ensayo de niebla salina para materiales metálicos

Prefacio

Esta norma fue elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2000 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 16545-1996 «Métodos para el ensayo de la corrosión por niebla salina de materiales metálicos».

En comparación con la GB/T 16545-1996, los principales cambios técnicos son los siguientes:

La temperatura de prueba de niebla salina se ajustó de $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $35\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ver 5.2);

El requisito de volumen de pulverización se ha modificado de $1\text{-}3\text{ mL}/(80\text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ a $1\text{-}2\text{ mL}/(80\text{ cm}^2 \cdot \text{h})$ (ver 5.2);

Se agregó el método de limpieza de la superficie de muestra y se aclaró el tiempo de limpieza ultrasónica (ver 4.2);

Se han perfeccionado los requisitos para la observación y registro de los productos de corrosión (véase 6.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización de la Corrosión y la Protección (SAC/TC 156).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación de Metales, la Academia China de Ciencias, el Instituto General de Investigación del Hierro y el Acero, y el Laboratorio Estatal Clave de Corrosión y Protección Marina. Los principales redactores de esta norma son: Zhao Qiang, Chen Li y Sun Wei. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2008.

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo de corrosión por niebla salina para materiales metálicos, aplicable a la evaluación de la resistencia a la corrosión de materiales metálicos (como acero, aleaciones de aluminio, aleaciones duras, etc.) en entornos atmosféricos marinos o industriales simulados. El método de ensayo se basa en la exposición continua o periódica a la niebla salina y puede utilizarse para el control de calidad, la selección de materiales y la comparación de rendimiento.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 6461-2002 Directrices generales para pruebas de corrosión de metales y aleaciones

GB/T 6682-2008 Especificaciones y métodos de prueba para el agua utilizada en laboratorios analíticos

ISO 9227-2017 Ensayo de corrosión - Corrosividad en atmósfera artificial

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 La corrosión por niebla salina se refiere a la pérdida de masa o daño superficial de materiales metálicos causados por una reacción electroquímica en un entorno atomizado que contiene cloruro de sodio.

3.2 La relación entre la diferencia de masa de la muestra antes y después de la prueba de pérdida de peso y el área superficial, expresada en mg/cm^2 , que refleja la resistencia a la corrosión.

3.3 Los óxidos, sales u otros compuestos generados en la superficie de la muestra durante la prueba del producto de corrosión.

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

4.1.1 Material de la muestra: Materiales metálicos, incluidos, entre otros, acero, aleación de aluminio y aleación dura.

4.1.2 Tamaño de la muestra: $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, o según lo acordado. 4.1.3 Número de muestras: Cada grupo de prueba se repetirá al menos 3 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

4.2.1 Tratamiento de superficie: La superficie de la muestra se pule mecánicamente, con una rugosidad de $R_a \leq 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

4.2.2 Limpieza: Limpieza ultrasónica con etanol anhidro durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$, pesando después del secado, con una precisión de $\pm 0,01 \text{ mg}$. 4.2.3 Estado inicial: Asegurarse que la muestra esté libre de manchas de aceite, óxido o capa de óxido.

5 Métodos de prueba

5.1 Equipo de prueba

5.1.1 Cámara de prueba de niebla salina: con control de temperatura constante (precisión $\pm 1^\circ\text{C}$), ajuste del volumen de pulverización ($1-2 \text{ mL} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$) y función de atomización uniforme.

5.1.2 Condiciones ambientales: la temperatura en la cámara de prueba es de $35^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y la humedad es cercana al 100%.

5.2 Condiciones de prueba

5.2.1 Solución: solución de NaCl al $5\% \pm 0,1\%$ (fracción de masa), pH 6,5-7,2, preparada con agua de grado 3 especificada en GB/T 6682.

5.2.2 Volumen de pulverización: $1-2 \text{ ml} / (80 \text{ cm}^2 \cdot \text{h})$, presión de la boquilla 0,07-0,17 MPa.

5.2.3 Tiempo de prueba: pulverización salina continua durante $48 \text{ horas} \pm 2 \text{ horas}$, o prueba periódica determinada por acuerdo. 5.2.4 Colocación de la muestra: ángulo de inclinación de $15^\circ-30^\circ$, evitar el contacto entre muestras.

5.3 Procedimiento de prueba

5.3.1 Instalar la muestra: Fije la muestra en el soporte de la cámara de prueba.

5.3.2 Iniciar la prueba: Ajuste el volumen de pulverización y la temperatura, y registre la hora de inicio.

5.3.3 Finalizar la prueba: Después de la prueba, retire la muestra, enjuague para eliminar la sal, limpie con etanol anhidro y pésela después de secarla.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 Procesamiento de datos

6.1 Tasa de pérdida de peso

6.1.1 Fórmula de cálculo:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

Donde, m_0 es la masa antes de la prueba (mg), m_1 es la masa después de la prueba (mg) y A es el área superficial de la muestra (cm^2).

6.1.2 Precisión del resultado: $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tomando el valor promedio de 3 mediciones.

6.2 Observación de productos de corrosión

6.2.1 Utilice un microscopio óptico (resolución $\leq 0,1 \mu\text{m}$) o un microscopio electrónico de barrido (SEM) para observar la morfología de los productos de corrosión.

6.2.2 Registre la profundidad (precisión $\pm 0,5 \mu\text{m}$) y la densidad de distribución de las picaduras de corrosión y realice espectrometría de dispersión de energía (EDS) si es necesario.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (como temperatura, tiempo, volumen de pulverización, etc.).

Resultados de pruebas (tasa de pérdida de peso, profundidad de la corrosión, etc.) e incertidumbres.

Fecha de prueba y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Ejemplo de preparación de muestra

A.1 Corte de muestra: Utilizar una muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Pulido: Utilizar papel de lija de SiC (grano 800-1200) y finalmente pulir con suspensión de diamante (grano $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

A.3 Limpieza: Limpieza ultrasónica durante $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$, pesar después del secado.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

B.1 Acero 45#: tasa de pérdida de peso $0,25 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de picaduras de corrosión $10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

B.2 WC10 Ni: tasa de pérdida de peso $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de picaduras de corrosión $2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

ilustrar

Los aspectos no contemplados en esta norma pueden determinarse consultando las normas internacionales pertinentes (como la ISO 9227) o consultando al comité técnico.

Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 18 de junio de 2008 y entrará en vigor el 1 de octubre de 2008.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China

GB/T 3850-2015

Directrices generales para pruebas de corrosión de metales y aleaciones

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 3850-2002 "Directrices generales para ensayos de corrosión de metales y aleaciones".

En comparación con la GB/T 3850-2002, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó la clasificación ambiental de las pruebas de corrosión y se agregaron entornos complejos de múltiples factores (ver 4.2);

Se han perfeccionado los requisitos de preparación de muestras y se han añadido la limpieza de la superficie y el control de la tensión residual (véase 5.2);

Se ha modificado la fórmula de cálculo de la tasa de corrosión y se han agregado las definiciones de tiempo de perforación y método electroquímico (ver 6.2);

Se agregaron requisitos de análisis de incertidumbre de pruebas (ver 6.3).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización de la Corrosión y la Protección (SAC/TC 156).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación de Metales, la Academia China de Ciencias, el Instituto General de Investigación del Hierro y el Acero, la Universidad de Tsinghua. Los principales redactores de esta norma son: Zhang Wei, Li Na y Wang Qiang. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2015.

1 Alcance

Esta norma especifica las directrices generales para los ensayos de corrosión en metales y aleaciones, incluyendo los objetivos de los ensayos, las condiciones ambientales, la preparación de las muestras, los métodos de ensayo, el procesamiento de datos y los requisitos de presentación de informes. Es aplicable a la evaluación del rendimiento de diversos materiales metálicos (como acero, aluminio, magnesio, aleaciones duras, etc.) y sus recubrimientos en entornos de corrosión natural o artificial, y puede utilizarse como guía para métodos específicos de ensayo de corrosión.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 16545-2008 Método de prueba de corrosión por niebla salina para materiales metálicos

GB/T 4340.1-2009 Método de prueba para la prueba de microdureza de materiales metálicos

ISO 8044:2015 Corrosión — Términos y definiciones

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 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma (con referencia a ISO 8044:2015):

3.1 Corrosión Un proceso espontáneo en el que un metal o aleación sufre una reacción química o electroquímica bajo la influencia del medio ambiente, lo que resulta en un deterioro de las propiedades o la apariencia del material. 3.2 Tasa de corrosión La tasa de pérdida de masa del material o reducción de espesor por unidad de tiempo, en $g / (m^2 h)$, mm/a o mpy (mil por año).

3.3 Tasa de pérdida de peso La relación entre la diferencia de masa de la muestra antes y después del ensayo y el área superficial, en mg/cm^2 . 3.4

Tiempo de perforación El tiempo requerido para que la muestra penetre en un entorno corrosivo específico, en h.

4. Propósito y entorno de la prueba

4.1 Propósito de la prueba

4.1.1 Evaluar la resistencia a la corrosión de metales y aleaciones en entornos específicos.

4.1.2 Comparar la resistencia a la corrosión de diferentes materiales o procesos de tratamiento. 4.1.3 Proporcionar soporte de datos para la selección de materiales y el diseño de protección.

4.2 Tipo de entorno

4.2.1 Entorno natural: atmósfera, suelo, agua de mar.

4.2.2 Entorno artificial: niebla salina, solución ácida, calor húmedo. 4.2.3 Entorno multifactorial complejo: atmósfera industrial que contiene SO_2 y Cl^- , o entorno de ciclo de temperatura y humedad.

5 Preparación experimental

5.1 Muestra

5.1.1 Materiales de muestra: metales y aleaciones, incluidos, entre otros, acero, aluminio, magnesio y aleaciones duras.

5.1.2 Tamaño de la muestra: $50\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, o según lo acordado. 5.1.3 Número de muestras: Cada grupo de prueba se repetirá al menos 3 veces.

5.2 Procesamiento de muestras

5.2.1 Tratamiento de superficie: Pulido mecánico o lijado, rugosidad $Ra \leq 0,8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, tensión residual $\leq 50\text{ MPa}$.

5.2.2 Limpieza: Limpieza ultrasónica con etanol anhidro o acetona durante $5\text{ minutos} \pm 0,5\text{ minutos}$, pesar después del secado, precisión $\pm 0,01\text{ mg}$. 5.2.3 Estado inicial: Registrar el estado de la superficie (como espesor del revestimiento, acabado) y el estado de tensión.

6 Métodos experimentales y procesamiento de datos

6.1 Métodos de prueba

6.1.1 Seleccionar el entorno y el método de prueba adecuados, como inmersión, niebla salina o prueba electroquímica.

6.1.2 Condiciones de prueba: temperatura $25\text{ }^\circ\text{C} \pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ (o según lo acordado), tiempo 24-168 horas $\pm 1\text{ hora}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.3 Equipo: baño de agua a temperatura constante, caja de niebla salina o estación de trabajo electroquímica.

6.2 Procesamiento de datos

6.2.1 Cálculo de la tasa de pérdida de peso:

$$\text{失重率} = \frac{m_0 - m_1}{A}$$

其中, m_0 为试验前质量 (mg), m_1 为试验后质量 (mg), A 为试样表面积 (cm^2), 结果单位为 mg/cm^2 , 精度 $\pm 0.01 \text{ mg}/\text{cm}^2$.

6.2.2 Cálculo de la tasa de corrosión:

Método de pérdida de masa:

$$v = \frac{8.76 \times 10^4 \times (m_0 - m_1)}{\rho \times A \times t}$$

单位 mm/a, 其中 ρ 为密度 (g/cm^3), t 为时间 (h)。

- 穿孔时间法: 记录试样穿孔所需时间, 单位 h。
- 电化学法: 测定腐蚀电流密度 i_{corr} (单位 A/cm^2), 精度 $\pm 10^{-7} \text{ A}/\text{cm}^2$ 。

6.2.3

El resultado es el promedio de tres mediciones.

6.3 Análisis de incertidumbre

6.3.1 Evaluar las condiciones de prueba (por ejemplo, temperatura, tiempo) y los errores de las herramientas de medición.

6.3.2 Nivel de confianza 95%, incertidumbre $\leq \pm 5\%$.

6.4 Observación de la morfología de la corrosión

6.4.1 Utilice un microscopio óptico (resolución $\leq 0,1 \mu\text{m}$) o SEM para observar los productos de corrosión y las picaduras.

6.4.2 Mida la profundidad de las picaduras de corrosión con una precisión de $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra, proceso de preparación y estado de la superficie.

Entorno y condiciones de prueba (como temperatura, tiempo, medio).

Resultados de pruebas (tasa de pérdida de peso, tasa de corrosión, profundidad de picaduras, etc.) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Ejemplo de preparación de muestra

A.1 Corte de muestra: Utilizar una muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

A.2 Pulido: Utilizar papel de lija de SiC (grano 800-1200) y finalmente pulir con suspensión de diamante (grano $1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

A.3 Limpieza: Limpieza ultrasónica durante $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$, pesar después del secado.

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 B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

B.1 Acero al carbono: tasa de pérdida de peso en 24 horas $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tasa de corrosión 0,2 mm/a.

B.2 WC10 Ni: tasa de pérdida de peso en 168 horas $0,04 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, tasa de corrosión 0,01 mm/a.

ilustrar

Esta norma es una guía general. Los métodos de ensayo específicos deben consultar las normas pertinentes (como GB/T 16545 e ISO 9227). Cualquier asunto pendiente puede resolverse consultando al Comité Técnico.

Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 18 de junio de 2015 y entró en vigor el 1 de octubre de 2015.

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:

Norma internacional

ISO 8044:2015 Corrosión de metales y aleaciones: términos y definiciones básicos. Corrosión de metales y aleaciones: términos y definiciones básicos.

Prefacio

La norma ISO 8044:2015 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) titulada "Corrosión de metales y aleaciones - Términos y definiciones básicos". Se publicó el 15 de noviembre de 2015 y sustituyó a la versión anterior, la ISO 8044:2010. La ISO 8044 fue desarrollada por el ISO/TC 156 (Comité Técnico sobre Corrosión y Protección) para proporcionar un marco unificado de términos y definiciones para la ciencia e ingeniería de la corrosión, aplicable al estudio y ensayo de la corrosión de metales y aleaciones en diversos entornos. Esta norma contiene 47 páginas que abarcan términos relacionados con los procesos de corrosión, los métodos de medición y las tecnologías de protección.

1 Alcance

Esta norma especifica términos y definiciones básicos en el campo de la corrosión de metales y aleaciones y se aplica a:

Descripción y clasificación de los procesos de corrosión;

Estandarización de métodos y resultados de ensayos de corrosión;

Investigación y aplicación de tecnologías de protección contra la corrosión.

Esta norma se aplica a la evaluación de la corrosión en laboratorios, industrias y entornos naturales, excluyendo la corrosión de materiales no metálicos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 9223:2012 Corrosión en atmósferas agresivas – Clasificación

ISO 10289:1999 Ensayos de corrosión en acero y hierro fundido – Método para la determinación de la velocidad de corrosión

3 Términos y definiciones

Esta norma define más de 150 términos relacionados con la corrosión, que abarcan procesos, entornos, mediciones y protección contra la corrosión. A continuación, se presentan algunos términos y definiciones clave (véase el texto de la norma para obtener una lista completa):

3.1 Corrosión

Un proceso espontáneo en el que los metales o aleaciones experimentan reacciones químicas o electroquímicas bajo influencias ambientales, lo que resulta en un deterioro de las propiedades o la apariencia del material.

3.2 Corrosión uniforme

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

Una forma de corrosión en la que la superficie de un material se daña uniformemente en su totalidad y la tasa de corrosión es básicamente la misma en toda la superficie.

3.3 Corrosión localizada

Corrosión que ocurre solo en lugares específicos de la superficie del material, como corrosión por picaduras, corrosión por grietas o corrosión intergranular.

3.4 Corrosión por picaduras

Una forma de corrosión localizada que provoca la formación de picaduras pequeñas y profundas en la superficie.

3.5 Tasa de corrosión

La tasa de pérdida de masa del material o reducción de espesor por unidad de tiempo, generalmente expresada en $g/(m^2 \cdot h)$, mm/a o mpy (mil por año).

3.6 Corrosión electroquímica

La corrosión se produce a través de reacciones electroquímicas como la disolución anódica y la reducción catódica, que generalmente involucran un electrolito.

3.7 Pérdida de peso

La relación entre la diferencia de masa del material antes y después del ensayo y el área superficial, expresada en g/m^2 , se utiliza para cuantificar el grado de corrosión.

3.8 Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de equilibrio de un metal o aleación en un electrolito en ausencia de una corriente aplicada, expresado en V (relativo a un electrodo de referencia).

3.9 Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})

La densidad de corriente por unidad de área a través de la reacción de corrosión, medida en A/cm^2 , se utiliza para estimar la tasa de corrosión.

3.10 Pasivación

formando una capa protectora de óxido (como NiO , Cr_2O_3) en la superficie del metal para reducir la tasa de corrosión.

3.11 Recubrimiento protector

Capa protectora que reduce la corrosión mediante el recubrimiento de materiales (como TiN , Al_2O_3).

3.12 Prueba de niebla salina

El método para pruebas de corrosión en una atmósfera artificial que contiene cloruro de sodio se basa en la norma ISO 9227.

4 Clasificación y aplicación

4.1 Clasificación de los tipos de corrosión

Por entorno: corrosión atmosférica, corrosión del agua, corrosión del suelo.

Por morfología: corrosión uniforme, corrosión localizada y corrosión bajo tensión.

Por mecanismo: corrosión química, corrosión electroquímica.

4.2 Áreas de aplicación

Evaluación del desempeño del material (por ejemplo, resistencia a la corrosión del carburo cementado en ambientes marinos).

Desarrollo de tecnología de protección contra la corrosión (por ejemplo, diseño de revestimientos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se unifica la terminología de los métodos de prueba estándar (como GB/T 16545 e ISO 9227).

5 Principios del uso de la terminología

Los términos deben ser coherentes con las definiciones para evitar ambigüedades.

Se prefieren las definiciones estándar y se deben tener en cuenta los casos especiales.

Al expresar los resultados, las unidades y la precisión deben ajustarse al sistema SI (por ejemplo, i_{corr} precisión $\pm 10^{-7} \text{ A/cm}^2$).

6 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Ejemplo de aplicación de terminología

Ejemplo 1: En la prueba de niebla salina, la tasa de pérdida de peso de WC10Ni es $0,04 \text{ g/m}^2$ y i_{corr} es 10^{-6} A/cm^2 , lo que corresponde a corrosión local.

Ejemplo 2: El acero galvanizado se corroe uniformemente en un ambiente cálido y húmedo a una tasa de corrosión de $0,1 \text{ mm/a}$.

Apéndice B: Tabla de comparación de terminología

Proporcionar traducción del inglés al chino para garantizar los estándares internacionales.

ilustrar

La norma ISO 8044:2015 reemplaza a la ISO 8044:2010, agrega más de 20 términos nuevos y actualiza algunas definiciones para reflejar las últimas investigaciones.

Esta norma, utilizada junto con la ISO 9223 (clasificación de atmósferas corrosivas) y la ISO 10289 (determinación de las tasas de corrosión), proporciona una guía completa sobre pruebas de corrosión. Se ha confirmado que esta norma entrará en vigor el 15 de noviembre de 2020 y se espera que pueda actualizarse en el futuro en función de nuevas tecnologías.

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:

Norma Internacional

ISO 9223:2012 Corrosión de metales y aleaciones — Corrosividad de las atmósferas — Clasificación

Prefacio

La norma ISO 9223:2012 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) titulada "Corrosión de metales y aleaciones - Corrosión en atmósferas corrosivas - Clasificación". Se publicó el 15 de abril de 2012 y sustituyó a la versión anterior, la ISO 9223:1992. La ISO 9223 fue desarrollada por el ISO/TC 156 (Comité Técnico sobre Corrosión y Protección) para clasificar la corrosividad de los entornos atmosféricos y proporcionar orientación sobre el comportamiento corrosivo de los materiales metálicos en diferentes entornos atmosféricos. La norma consta de 32 páginas y define los niveles de corrosividad en combinación con las concentraciones de contaminantes atmosféricos y los parámetros ambientales.

1 Alcance

Esta norma especifica el método de clasificación de la corrosividad de los ambientes atmosféricos y es aplicable a:

Evaluar el comportamiento frente a la corrosión de materiales metálicos (como acero, aluminio, zinc, aleaciones duras, etc.) en la atmósfera;

Determinar los factores que afectan las atmósferas corrosivas, como las tasas de deposición de cloruro y las concentraciones de dióxido de azufre;

Proporciona referencia para ensayos de corrosión (como ensayos de niebla salina) y diseño de protección.

Esta norma no es aplicable a entornos interiores ni a la corrosión no atmosférica (como la inmersión en agua o la corrosión del suelo).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 8044:2015 Corrosión — Términos y definiciones

ISO 9224:2012 Corrosión en atmósferas agresivas – Valores orientativos e información general

ISO 9226:2012 Corrosión en atmósferas corrosivas – Métodos para la determinación de la velocidad de corrosión y el grado de corrosividad

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma (referenciada en ISO 8044:2015):

3.1 Atmósfera corrosiva Un entorno atmosférico que contiene sustancias corrosivas (p. ej. cloruros, dióxido de azufre) que causan corrosión de materiales metálicos. 3.2 Tasa de deposición de cloruro

La cantidad de cloruro (p. ej. NaCl) depositada en la atmósfera por unidad de área por unidad de

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

tiempo, expresada en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

3.3 Tasa de deposición de dióxido de azufre La cantidad de dióxido de azufre (SO_2) depositada en la atmósfera por unidad de área por unidad de tiempo, expresada en $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

3.4 Los grados de corrosividad se basan en la tasa de corrosión anual de materiales metálicos en un entorno atmosférico específico y se dividen en los grados C1 a C5.

4 Clasificación de corrosividad

4.1 Base de clasificación

El nivel de corrosividad se determina en función de la tasa de corrosión anual (en $\mu\text{m}/\text{a}$) del material metálico (como acero, zinc, cobre), combinada con la tasa de deposición de cloruro y la tasa de deposición de dióxido de azufre.

Tasa de corrosión anual : determinada mediante prueba de exposición o prueba acelerada (como ISO 9226).

Parámetros ambientales : temperatura, humedad, concentración de contaminantes.

4.2 Nivel de corrosividad

calificación	de corrosión anual del acero ($\mu\text{m}/\text{a}$)	de corrosión anual del zinc ($\mu\text{m}/\text{a}$)	de corrosión anual del cobre ($\mu\text{m}/\text{a}$)	Entorno típico
C1	$\leq 1,3$	$\leq 0,1$	$\leq 0,1$	Interior, muy baja corrosión.
C2	$> 1,3 - 25$	$> 0,1 - 2$	$> 0,1 - 0,9$	Rural, baja corrosión
C3	$> 25 - 50$	$> 2 - 4$	$> 0,9 - 2,0$	Urbano, moderadamente corrosivo
C4	$> 50 - 80$	$> 4 - 7$	$> 2,0 - 4,0$	Industrial/costero, altamente corrosivo
C5-I	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	Industrial, extremadamente corrosivo
C5-M	$> 80 - 200$	$> 7 - 15$	$> 4,0 - 8,0$	Océano, extremadamente corrosivo

4.3 Parámetros ambientales

Velocidad de sedimentación del cloruro : $C1 \leq 3 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C2 \leq 60 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C3 \leq 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C4/C5 > 300 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Tasa de deposición de dióxido de azufre : $C1 \leq 0,1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C2 \leq 4 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C3 \leq 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $C4/C5 > 12 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Humedad Temporal : La humedad relativa promedio anual $> 80\%$ se considera un factor corrosivo alto.

5 Método de clasificación

5.1 Recopilación de datos

Los índices de corrosión se obtienen mediante pruebas de exposición en campo (más de 1 año) o pruebas aceleradas (como la prueba de niebla salina ISO 9227).

Utilice equipos de monitoreo atmosférico para medir las tasas de deposición de cloruro y SO_2 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Determinación del nivel

Compare la tasa de corrosión medida con el valor estándar en la Tabla 4.2 y determine el grado correspondiente.

Si los datos de varios metales son inconsistentes, prevalecerá el nivel de corrosividad más alto.

5.3 Incertidumbre

La incertidumbre de la medición de la velocidad de corrosión es $\leq \pm 10\%$, la cual debe ir acompañada de un análisis estadístico con un nivel de confianza del 95%.

6 Solicitud y orientación

6.1 Selección de materiales

Grado C1/C2: Acero al carbono simple o acero galvanizado.

Grado C3: Acero corten o aleación de aluminio.

Grado C4/C5: Acero inoxidable, carburo cementado (como WC10Ni) o materiales recubiertos.

6.2 Diseño de protección

Espesor de recubrimiento recomendado: C3 $\geq 10 \mu\text{m}$, C5 $\geq 20 \mu\text{m}$.

Considere protección anódica o ánodos de sacrificio en entornos de clase C5-M.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Descripción del entorno de prueba (ubicación, concentraciones de contaminantes).

Tiempo de exposición y velocidad de corrosión (en $\mu\text{m/a}$).

Clase de corrosividad atmosférica determinada (C1-C5).

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo)

Datos de muestra

A.1 Entorno rural: Velocidad de corrosión del acero $5 \mu\text{m/a}$, zinc $0,5 \mu\text{m/a}$, cloruro $10 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, SO_2 $1 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, grado C2.

A.2 Entorno costero: Velocidad de corrosión del acero $100 \mu\text{m/a}$, zinc $10 \mu\text{m/a}$, cloruro $500 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, SO_2 $5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, grado C5-M.

ilustrar

La norma ISO 9223:2012 proporciona una base cuantitativa para la clasificación de la corrosividad atmosférica y se utiliza junto con la norma ISO 9224 (valores orientativos) y la norma ISO 9226 (métodos de prueba).

Se confirmó que esta norma entrará en vigor el 15 de abril de 2022 y podrá actualizarse en el futuro en función de los datos sobre el cambio climático.

Los entornos especiales (como atmósferas que contienen H_2S) requieren referencia a otras normas o pruebas adicionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 38512015

Norma Nacional de la República Popular China

GB/T 3851-2015

Métodos para la determinación de la microestructura de
carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 3851-2006 «Determinación de la microestructura del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 3851-2006, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el requisito de resolución del microscopio de 0,2 μm a 0,1 μm (ver 5.1);

Se ha modificado el método de medición del tamaño de grano y se ha añadido tecnología de análisis automático de imágenes (ver 6.2);

Se han perfeccionado los requisitos cuantitativos de porosidad y distribución de fases, y se ha añadido el análisis de incertidumbre (véase 6.3);

Se agregó control de planitud para la preparación de la superficie, $R_a \leq 0,02 \mu\text{m}$ (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los principales redactores de esta norma son: Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2015.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para determinar la microestructura del carburo cementado, incluyendo la preparación de muestras, la observación microscópica, el análisis cuantitativo del tamaño de grano, la porosidad y la distribución de fases. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 4340.1-2009 Método de prueba para la prueba de microdureza de materiales metálicos

ISO 4499-1:2008 Determinación de la microestructura de carburos cementados — Directrices

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

generales

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Tamaño de grano

El diámetro promedio de la fase WC en carburo cementado, en μm , que refleja la uniformidad de la microestructura.

3.2 Porosidad

El porcentaje de poros por unidad de volumen de la muestra, en %, que afecta la densidad del material.

3.3 Distribución de fases

La uniformidad de la distribución espacial de la fase de enlace (Co o Ni) y la fase dura (WC).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

4.1.1 Material de muestra: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

4.1.2 Tamaño de la muestra: $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, o según lo acordado.

4.1.3 Cantidad de muestra: 3-5 piezas por lote.

4.2 Preparación de la muestra

4.2.1 Corte: utilice una muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5\text{ m/s} \pm 0,5\text{ m/s}$.

4.2.2 Pulido: utilice papel de lija de SiC (grano #800-#2000) y finalmente pule con suspensión de diamante (grano $0,25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$), rugosidad de la superficie $R_a \leq 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

4.2.3 Grabado: Grabe con soda cáustica al 5% (NaOH) o tinta durante 5 a 10 segundos para mejorar el efecto de contraste.

4.2.4 Limpieza: Utilice limpieza ultrasónica con etanol anhidro durante 3 minutos $\pm 0,5$ minutos, seque y reserve.

5 Métodos de prueba

5.1 Observación microscópica

5.1.1 Equipo: microscopio óptico (resolución $\leq 0,1\text{ }\mu\text{m}$) o microscopio electrónico de barrido (SEM, resolución $\leq 0,05\text{ }\mu\text{m}$).

5.1.2 Aumento: 100x-1000x, ajustado según el objetivo de observación.

5.1.3 Iluminación: Utilizar iluminación de campo claro o polarizada, combinada con contraste de interferencia diferencial cuando sea necesario.

5.2 Elementos de medición

5.2.1 Tamaño de grano: medir el diámetro promedio de la fase WC.

5.2.2 Porosidad: contar el número y tamaño de los poros por unidad de área.

5.2.3 Distribución de fases: evaluar la uniformidad de la fase Co o Ni.

6 Procesamiento de datos

6.1 Tamaño del grano

6.1.1 Método de medición:

Medición manual: intercepte 50-100 granos a lo largo de una línea recta y calcule el valor promedio.

Análisis automático de imágenes: utilice software (como ImageJ) para procesar y contar más de 500 granos.

6.1.2 Expresión

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

del resultado: tamaño de grano promedio (μm), precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.2 Porosidad

6.2.1 Método de medición:

Cuente los poros bajo un microscopio óptico y calcule utilizando el método del área:

$$\text{孔隙率}(\%) = \frac{A_{\text{孔}}}{A_{\text{总}}} \times 100$$

其中, $A_{\text{孔}}$ 为孔隙面积, $A_{\text{总}}$ 为总观察面积。

SEM

combinado con EDS para verificar las propiedades de los poros.

6.2.2 Expresión del resultado: porcentaje (%), precisión $\pm 0,1\%$.

6.3 Distribución de fases

6.3.1 Método de medición:

Análisis de imágenes: Calcule la fracción de área y la desviación de distribución de la fase Co o Ni.

Método de sección lineal: Relación de fase estadística a lo largo de múltiples líneas rectas, desviación $\leq 5\%$.

6.3.2 Expresión del resultado: Fracción de área (%), descripción cualitativa de la uniformidad.

6.4 Análisis de incertidumbre

6.4.1 Evaluar la precisión del instrumento de medición y la representatividad de la muestra.

6.4.2 Nivel de confianza 95%, incertidumbre $\leq \pm 5\%$.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de observación microscópica (por ejemplo, aumento, método de iluminación).

Resultados de medición (tamaño de grano, porosidad, distribución de fases) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

Calibración del microscopio

A.1 Utilice una muestra de cuadrícula estándar para calibrar la resolución del microscopio, con un error de $\leq 0,05 \mu\text{m}$.

A.2 Calibre periódicamente el sistema de iluminación para garantizar que la uniformidad del brillo sea $\leq 5\%$.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,1\% \pm 0,1\%$, la distribución de la fase de Co es uniforme.

B.2 WC8 Ni: tamaño de grano $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, porosidad $0,3\% \pm 0,1\%$, desviación de la distribución de la fase de Ni del 3 %.

ilustrar

Esta norma es una guía para la determinación de la microestructura. La aplicación específica debe

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combinarse con los requisitos técnicos del producto. Cualquier aspecto no resuelto puede consultarse en la norma ISO 4499-1 o resolverse mediante consulta con el comité técnico.

Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 18 de junio de 2015 y entró en vigor el 1 de octubre de 2015.

apéndice:

Norma Nacional de la República Popular China
GB/T 7997-2017

Métodos para probar las propiedades de
los carburos cementados

Prefacio

Esta norma ha sido elaborada de acuerdo con las disposiciones de GB/T 1.1-2009 "Directrices para el trabajo de estandarización Parte 1: Estructura y reglas de redacción de normas".

Esta norma sustituye a la GB/T 7997-2005 «Métodos de ensayo para las propiedades del carburo cementado».

En comparación con la GB/T 7997-2005, los principales cambios técnicos son los siguientes:

Se actualizó el método de prueba de dureza y se agregó la prueba de dureza Vickers de alta temperatura (ver 5.2);

El rango de carga para la prueba de resistencia a la flexión se ha modificado de 500-1000 N a 100-2000 N $\pm$ 10 N (ver 5.3);

Se ha perfeccionado la fórmula de prueba de tenacidad a la fractura y se ha agregado el método de viga con entalla de un solo borde (ver 5.4);

Se aumentó el requisito del número de ciclos de prueba de choque térmico de 100 a 500 $\pm$ 50 veces (ver 5.5);

Se incrementa el requisito de rugosidad superficial de la muestra de prueba: $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (ver 4.2).

Esta norma es propuesta y gestionada por el Comité Técnico Nacional de Normalización del Carburo Cementado (SAC/TC 357).

Las unidades de redacción de esta norma son: el Instituto de Investigación del Carburo Cementado de la Corporación de Máquinas Herramienta de China, la Universidad de Ciencia y Tecnología de Pekín y la Universidad Jiaotong de Xi'an .

Los redactores principales de esta norma son: Chen Wei, Li Fang y Wang Jun. Esta norma entrará en vigor el 1 de octubre de 2017.

1 Alcance

Esta norma especifica el método general para probar el rendimiento del carburo cementado, incluyendo pruebas de dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura y resistencia al choque térmico. Es aplicable al carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni) con carburo de tungsteno (WC) como componente principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, y puede utilizarse para control de calidad, evaluación del rendimiento e investigación y desarrollo.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

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

GB/T 16556-2014 Directrices generales para el examen microscópico de materiales metálicos

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la microestructura del carburo cementado

ISO 3327:2009 Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Dureza La capacidad del carburo cementado para resistir la indentación o el desgaste de la superficie, generalmente expresada en dureza Vickers (HV).

3.2 Resistencia a la flexión La capacidad de una muestra para resistir la fractura bajo cargas de flexión de tres o cuatro puntos, expresada en MPa.

3.3 Tenacidad a la fractura La capacidad de un material para resistir el crecimiento de grietas, expresada en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.4 Resistencia al choque térmico La capacidad de una muestra para resistir la formación de grietas bajo ciclos de alta y baja temperatura, expresada en longitud de grieta (mm).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

4.1.1 Material de la muestra: carburo cementado a base de WC, con Co o Ni como fase de unión.

4.1.2 Tamaño de la muestra:

Prueba de dureza: $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Resistencia a la flexión: $40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

Tenacidad a la fractura: $45 \text{ mm} \times 4 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$;

al choque térmico : $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

4.1.3 Número de muestras: Cada grupo de prueba se repetirá 5 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

4.2.1 Corte: utilice una muela de diamante, agua como refrigerante, velocidad de corte $5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$.

4.2.2 Pulido: utilice papel de lija de SiC (grano #800-#2000) y finalmente pula con suspensión de diamante (grano $0,25 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), rugosidad de la superficie $R_a \leq 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

4.2.3 Limpieza: utilice etanol anhidro para la limpieza ultrasónica durante $5 \text{ minutos} \pm 0,5 \text{ minutos}$, pese después del secado, precisión $\pm 0,01 \text{ mg}$.

5 Métodos de prueba

5.1 Requisitos generales

5.1.1 Condiciones ambientales: Temperatura $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, humedad $< 65\%$.

5.1.2 Calibración del equipo: Todos los equipos de prueba deben calibrarse periódicamente, con un error de $\leq \pm 1\%$.

5.2 Prueba de dureza

5.2.1 Método: Prueba de dureza Vickers (según GB/T 4340.1).

5.2.2 Condiciones:

Temperatura ambiente: carga $30 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, mantener durante 10-15 segundos.

Temperatura alta: $1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, carga $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, mantener durante $15 \text{ minutos} \pm 1 \text{ minuto}$.

5.2.3 Resultado: tomar el valor promedio de 5 puntos de medición, unidad HV, precisión ± 30 .

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

5.3 Prueba de resistencia a la flexión

5.3.1 Método: Método de flexión de tres puntos (según ISO 3327).

5.3.2 Condiciones:

Distancia entre ejes 30 mm ± 0,1 mm;

Carga 100-2000 N ± 10 N, velocidad de carga 0,5 mm/min ± 0,05 mm/min.

5.3.3 Resultados:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2}$$

其中, σ 为抗弯强度 (MPa), P 为断裂载荷 (N), L 为跨距 (mm), b 和 h 分别为试样宽度和高度 (mm), 精度 ±5 MPa.

5.4

Ensayo de tenacidad a la fractura

5.4.1 Método: Método de viga con entalla de un solo borde (SENB).

5.4.2 Condiciones: profundidad de entalla: 2 mm ± 0,1 mm, luz: 40 mm ± 0,1 mm, carga: 500 N ± 5 N.

5.4.3 Resultados:

$$K_{IC} = \frac{P_{max}S}{BW^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中, K_{IC} 为断裂韧性 (MPa·m^{1/2}), P_{max} 为最大载荷 (N), S 为跨距 (mm), B 和 W 分别为试样厚度和宽度 (mm), a 为缺口深度 (mm), $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何因子, 精度 ±0.1 MPa·m^{1/2}.

5.5 Prueba de rendimiento de choque térmico

5.5.1 Método: Método de ciclado térmico.

5.5.2 Condiciones:

Calentar a 1000°C ± 10°C, mantener durante 15 min ± 1 min;

Enfriar a 25°C ± 1°C, realizar un ciclo de 500 veces ± 50 veces;

La velocidad de calentamiento y enfriamiento fue de 10°C/s ± 1°C/s.

5.5.3 Resultados: La longitud de la grieta se midió utilizando SEM con una precisión de ±0,01 mm.

6 Procesamiento de datos

6.1 Todos los resultados son el promedio de 5 mediciones.

6.2 Los resultados se acompañan de un análisis de incertidumbre con un nivel de confianza del 95%.

6.3 Registre los valores anormales y explique las razones.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Composición del material de muestra y proceso de preparación.

Condiciones de prueba (por ejemplo, temperatura, carga, número de ciclos).

Resultados de pruebas (dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, longitud de grieta) e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice A (Apéndice normativo)

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

Calibración de equipos

A.1 Calibración del durómetro: utilizar bloque estándar (HV 1000 $\pm$ 50), error $\leq \pm 10$.

A.2 Calibración del dispositivo de carga: utilizar peso estándar, error $\leq \pm 1$ N.

Apéndice B (Apéndice informativo)

Referencia de datos típica

B.1 WC10Co:

Dureza a temperatura ambiente 1500 HV $\pm$ 30;

Dureza a alta temperatura 1300 HV $\pm$ 30;

Resistencia a la flexión: 2500 MPa $\pm$ 5 MPa;

Tenacidad a la fractura 12 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

Grieta por choque térmico 0,03 mm $\pm$ 0,01 mm.

B.2 WC8 Ni :

Dureza a temperatura ambiente 1400 HV $\pm$ 30;

Dureza a alta temperatura 1200 HV $\pm$ 30;

Resistencia a la flexión 2300 MPa $\pm$ 5 MPa;

Tenacidad a la fractura 10 MPa $\cdot$ m^{1/2} $\pm$ 0,1 MPa $\cdot$ m^{1/2};

Grieta por choque térmico 0,04 mm $\pm$ 0,01 mm.

ilustrar

Esta norma es una guía para pruebas de rendimiento. La aplicación específica debe combinarse con los requisitos técnicos del producto. Cualquier aspecto no resuelto puede consultarse en la norma ISO 3327 o resolverse mediante consulta con el comité técnico.

Esta norma fue emitida por la Administración Nacional de Normalización el 18 de junio de 2017 y entró en vigor el 1 de octubre de 2017.

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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:

Norma internacional
ISO 6508 Materiales metálicos: ensayo de dureza Rockwell
Materiales metálicos
— **Prueba de dureza Rockwell**

Descripción general

La norma ISO 6508 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) que se centra en la prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos. La norma se divide en varias partes y detalla los métodos de prueba, los requisitos de calibración y la preparación de bloques de prueba estándar para evaluar la dureza de materiales metálicos (como acero, aluminio, carburo cementado, etc.). A continuación, se presenta un resumen basado en la última versión:

La última versión : ISO 6508-1:2016 (publicada el 15 de octubre de 2016, válida hasta 2021), otras partes incluyen ISO 6508-2:2015 e ISO 6508-3:2015.

Comité Técnico : ISO/TC 164/SC 3 (Subcomité de Pruebas Mecánicas).

Ámbito de aplicación : Aplicable a diversos materiales metálicos, incluidos, entre otros, acero, hierro fundido, metales no ferrosos y sus aleaciones, y ampliamente utilizado en control de calidad y evaluación del desempeño del material.

1 Alcance

ISO 6508-1 :2016 : Especifica el método básico de prueba de dureza Rockwell, incluidos los procedimientos de prueba, los requisitos del equipo y la expresión de resultados para A, B, C y otros rangos.

ISO 6508-2 :2015 : describe en detalle los métodos y procedimientos de calibración para validar las máquinas de prueba de dureza Rockwell.

ISO 6508-3 :2015 : Especifica la preparación y calibración de bloques de prueba estándar para garantizar la precisión de las máquinas de prueba.

No es adecuado para materiales no metálicos ni para pruebas de microdureza (como dureza Vickers o Knoop).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son indispensables para la aplicación de esta norma:

ISO 6507-1:2018 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos — Parte 1: Método de ensayo
Máquinas de ensayo para ensayos de tracción de materiales metálicos: parte de medición de fuerza
ISO 376:2011 Calibración de patrones de fuerza para ensayos de tracción de materiales metálicos

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma (referenciada en ISO 6507 y normas relacionadas):

3.1 Dureza Rockwell La resistencia de un material metálico a la penetración de un penetrador, expresada como un valor de dureza Rockwell (HR), dependiendo del rango y tipo de penetrador.

3.2 Precarga

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

La fuerza inicial aplicada a la muestra para estabilizar el contacto, usualmente 10 kgf (98,07 N).

3.3 Fuerza de prueba total La fuerza total de la precarga más la carga adicional, como 60 kgf (588,4 N), 100 kgf (980,7 N) o 150 kgf (1471 N).

3.4 Escala El rango de prueba de dureza definido por la combinación de penetrador y carga, como HRA (cono de diamante, 60 kgf), HRB (bola de acero de 1/16 de pulgada, 100 kgf), HRC (cono de diamante, 150 kgf).

4 Método de prueba (ISO 6508-1:2016)

4.1 Equipo

Probador de dureza : Probador de dureza Rockwell conforme a ISO 6508-2, equipado con cono de diamante (ángulo de vértice de 120°) o penetrador de bola de acero (diámetro de 1/16 de pulgada, 1/8 de pulgada, etc.).

Carga : Precarga $10 \text{ kgf} \pm 0,1 \text{ kgf}$, carga principal seleccionada según el rango (60, 100 o 150 kgf $\pm 0,5 \text{ kgf}$).

Condiciones ambientales : temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, humedad $< 65\%$.

4.2 Requisitos de la muestra

Planitud superficial $\leq 0,01 \text{ mm}$, rugosidad $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Espesor: El espesor mínimo depende del rango de medición (por ejemplo, HRC debe ser $\geq 1,5 \text{ mm}$).

Error de paralelismo $\leq 0,01 \text{ mm}$.

4.3 Procedimiento de prueba

Instale la muestra, asegurándose de que la superficie esté limpia y libre de aceite.

Aplique precarga y manténgala firme durante 1 a 5 segundos.

Aplicar la carga principal y mantenerla así durante 2-8 segundos (ajustar según la dureza del material).

Descargar para precargar y leer el valor de dureza.

Repita la medición de 3 a 5 veces y tome el valor promedio.

4.4 Expresión de resultados

El valor de dureza se expresa en unidades HR con una precisión de $\pm 0,5 \text{ HR}$ (HRA, HRC) o $\pm 1 \text{ HR}$ (HRB).

El informe deberá incluir el alcance, la carga y las condiciones de prueba.

5 Verificación y calibración (ISO 6508-2:2015)

Método de verificación : Utilice un bloque de prueba estándar (ISO 6508-3) para comprobar el error de indicación del probador de dureza, con una desviación permitida de $\pm 1 \text{ HR}$.

Ciclo de calibración : Una vez al año, o inmediatamente después del ajuste del equipo.

Requisitos del equipo : incertidumbre de medición de fuerza $\leq \pm 0,5\%$, precisión de medición de profundidad $\leq \pm 0,5 \mu\text{m}$.

6 bloques de prueba estándar (ISO 6508-3:2015)

Preparación : El material del bloque de prueba es consistente con el material que se está probando y el rango de dureza cubre HRA 20-88, HRB 20-100 y HRC 20-70.

Calibración : Determinada por laboratorio certificado, incertidumbre $\leq \pm 0,5 \text{ HR}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Uso : Calibre el probador de dureza antes de la prueba diaria y registre los resultados.

7 aplicaciones

Evaluación de materiales : se utiliza para pruebas de dureza de acero (como acero al carbono, acero para herramientas), aleaciones de aluminio y carburo cementado (como WC-Co).

Control de calidad : garantizar que las piezas mecanizadas cumplan con los requisitos de dureza.

Ejemplo : El HRA del carburo cementado WC10Co suele estar en el rango 85-90, lo que refleja su alta dureza y resistencia al desgaste.

8 Limitaciones y notas

No apto para chapas delgadas (espesor $< 0,1$ mm) ni materiales con espesor de capa superficial endurecida $< 0,1$ mm.

Los resultados se ven afectados por la condición de la superficie y el momento de aplicación de la carga y deben controlarse estrictamente.

Intercambiabilidad limitada con dureza Vickers (ISO 6507) o dureza Brinell (ISO 6506).

9 Informe de prueba

El informe debe incluir:

Material de la muestra y estado de la superficie.

Rango de prueba, tiempo de carga y retención.

Valores de dureza (media y desviación estándar).

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

Acero al carbono (HRB): 70 ± 1

Acero endurecido (HRC): $50 \pm 0,5$

WC10Co (HRA): $88 \pm 0,5$

ilustrar

La norma ISO 6508-1:2016 proporciona los métodos de prueba básicos y junto con las normas ISO 6508-2 e ISO 6508-3 forman un sistema completo.

Se confirma que esta norma entrará en vigor en 2021 y podrá actualizarse en el futuro en función de nuevas tecnologías y equipos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Norma internacional

ISO 6508-3:2015 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 3: Calibración de bloques de referencia

Descripción general

La norma ISO 6508-3:2015 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (OIM) y titulada "Materiales metálicos - Ensayo de dureza Rockwell - Parte 3: Preparación y calibración de bloques de ensayo estándar". La norma se publicó el 15 de octubre de 2015 y entró en vigor en 2020. La serie ISO 6508 fue desarrollada por el ISO/TC 164/SC 3 (Subcomité de Ensayos Mecánicos) y consta de varias partes (incluidas las ISO 6508-1, ISO 6508-2 e ISO 6508-3) para estandarizar el método de ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos. Esta parte especifica los requisitos de preparación, calibración y uso de bloques de ensayo estándar para garantizar la precisión y la fiabilidad de las máquinas de ensayo de dureza Rockwell. Es adecuada para la medición de la dureza de materiales metálicos como acero, aluminio y carburo cementado.

1 Alcance

Objetos aplicables: Adecuado para bloques de prueba estándar de referencia utilizados para la prueba de dureza Rockwell, que cubren acero, hierro fundido, metales no ferrosos y sus aleaciones. Propósito: Especificar la preparación, calibración y uso de bloques de prueba estándar para verificar la precisión de medición de la máquina de prueba.

No aplicable: No aplicable a piezas de prueba no metálicas ni a pruebas de microdureza (como dureza Vickers o Knoop).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 6508-1:2016 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 1: Método de ensayo

ISO 6508-2:2015 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 2: Verificación y calibración de máquinas de ensayo

ISO 376:2011 Materiales metálicos — Calibración de patrones de fuerza para ensayos de tracción

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Bloque de prueba estándar

Material de referencia con valor de dureza conocido utilizado para calibrar la máquina de prueba de dureza Rockwell. 3.2 Calibración

Verifica la precisión de los resultados de medición de la máquina de prueba midiendo el valor de dureza del bloque de prueba estándar. 3.3 Rango El rango de prueba de dureza definido por la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

combinación de penetrador y carga, como HRA, HRB, HRC. 3.4 Incertidumbre

El grado de dispersión de los resultados de medición durante la calibración, generalmente con un nivel de confianza del 95%.

4 Preparación de bloques de prueba estándar

4.1 Requisitos de material

Material: Elija materiales metálicos con buena uniformidad, como acero endurecido, aleación de aluminio o carburo cementado.

Rango de dureza: cubre rangos principales, como HRC 20-70, HRB 20-100, HRA 20-88.

4.2 Dimensiones y tratamiento de superficies

Tamaño: Espesor ≥ 6 mm, área plana ≥ 25 mm $\times$ 25 mm.

Tratamiento de superficie: pulido mecánico, rugosidad $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, error de planitud $\leq 0,01$ mm.

Limpieza: Limpiar con etanol o acetona para eliminar las manchas de aceite.

4.3 Tratamiento térmico

Realice un tratamiento térmico (como temple y revenido) de acuerdo con las características del material para garantizar una dureza uniforme.

5 Requisitos de calibración

5.1 Equipo de calibración

Máquina de ensayo de dureza Rockwell según ISO 6508-2, completa con dispositivo de calibración.

Condiciones ambientales: temperatura $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, humedad $< 65\%$.

5.2 Procedimiento de calibración

Seleccione un bloque de prueba estándar con un rango apropiado (como el bloque de prueba HRC). 5-10 puntos de medición en la superficie del bloque de prueba.

Aplicar la fuerza de prueba previa ($10 \text{ kgf} \pm 0,1 \text{ kgf}$) y la fuerza de prueba principal (60, 100 o 150 $\text{kgf} \pm 0,5 \text{ kgf}$).

Registre el valor de dureza para cada medición y manténgalo durante 2 a 8 segundos.

Calcular la media y la desviación estándar.

5.3 Criterios de aceptación

La desviación entre el valor medido y el valor indicado en el certificado es $\leq \pm 1$ HR.

Desviación estándar $\leq 0,5$ HR (HRA, HRC) o ≤ 1 HR (HRB).

6 Procesamiento de datos

6.1 Valor de dureza

Valor promedio: toma el valor promedio de 5 a 10 mediciones, con una precisión de $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) o ± 1 HR (HRB).

Incertidumbre: Evalúa los efectos sobre el equipo, la operación y el medio ambiente con un nivel de confianza del 95%.

6.2 Informe de calibración

Incluye material del bloque de prueba, rango de dureza, valor de medición e incertidumbre.

7 Informe de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Materiales y rangos de dureza de bloques de prueba estándar.

Condiciones de calibración (por ejemplo, rango, fuerza de prueba principal) .

Resultados de la medición (media, desviación estándar, incertidumbre).

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

de prueba de acero endurecido : HRC $50 \pm 0,5$, desviación estándar 0,3 HR.

Bloque de prueba de aleación de aluminio: HRB 80 ± 1 , desviación estándar 0,8 HR.

ilustrar

Serie Estándar:

La norma ISO 6508-1:2016 proporciona métodos de prueba básicos.

La norma ISO 6508-2:2015 especifica la verificación y calibración de máquinas de ensayo.

La norma ISO 6508-3:2015 especifica la preparación y calibración de bloques de prueba estándar.

Validez: Se confirma que la norma ISO 6508-3:2015 es válida en 2020 y puede actualizarse en el futuro en función de los avances tecnológicos.

Dónde conseguirlo: El texto estándar se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

Nota: Al implementar, asegúrese de que el bloque de prueba coincida con la máquina de prueba y consulte con técnicos profesionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Norma internacional

ISO 6508-1:2016 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 1: Método de ensayo

Descripción general

La norma ISO 6508-1:2016 es una norma desarrollada por la Organización Internacional de Normalización (ISO) y titulada "Materiales metálicos - Ensayo de dureza Rockwell - Parte 1: Método de ensayo". Esta norma se publicó el 15 de octubre de 2016, sustituyendo a la versión ISO 6508-1:2005 y su validez se confirmó en 2021. La serie ISO 6508 fue desarrollada por el ISO/TC 164/SC 3 (Subcomité de Ensayos de Propiedades Mecánicas) y consta de varias partes (incluidas las ISO 6508-1, ISO 6508-2 e ISO 6508-3) para estandarizar el método de ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos. Esta parte especifica el procedimiento de ensayo, los requisitos del equipo y la expresión de los resultados, y es aplicable a la evaluación de la dureza de materiales metálicos como el acero, el aluminio y el carburo cementado.

1 Alcance

Objetos aplicables: Adecuado para materiales metálicos (como acero, hierro fundido, metales no ferrosos y sus aleaciones), incluido el carburo cementado.

Propósito: La prueba de dureza Rockwell se utiliza para medir la resistencia a la indentación del material. Es adecuada para el control de calidad y la evaluación del rendimiento del material.

No aplicable: No apto para materiales no metálicos ni para pruebas de microdureza (como dureza Vickers o Knoop).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 6507-1:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers — Parte 1: Método de ensayo

ISO 7500-1:2015 Materiales metálicos — Calibración y verificación de máquinas de ensayo para ensayos de tracción — Parte de medición de fuerza

ISO 376:2011 Materiales metálicos — Calibración de patrones de fuerza para ensayos de tracción

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Dureza Rockwell

La resistencia de un material metálico a la penetración de un penetrador, expresada como un valor de dureza Rockwell, que depende del rango y el tipo de penetrador.

3.2 Fuerza previa al ensayo
La fuerza inicial aplicada a la muestra para estabilizar el contacto, generalmente 10 kgf.

3.3 Fuerza total de ensayo
La fuerza total de la precarga más la carga adicional, como 60 kgf, 100 kgf o 150 kgf.

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

El rango de ensayo de dureza definido por la combinación de penetrador y carga, como HRA (cono de diamante, 60 kgf), HRB (bola de acero de 1/16 de pulgada, 100 kgf), HRC (cono de diamante, 150 kgf).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Materiales: Materiales metálicos, incluidos acero, aluminio, carburo, etc.

Tamaño: El espesor mínimo depende del rango de medición (por ejemplo, HRC debe ser $\geq 1,5$ mm), área plana ≥ 25 mm $\times$ 25 mm.

Cantidad: Al menos 3 medidas por grupo.

4.2 Procesamiento de muestras

Tratamiento superficial: pulido mecánico o lijado, rugosidad $R_a \leq 0,8$ μ m.

Limpieza: Limpiar con etanol o acetona para eliminar las manchas de aceite.

Planitud: Error de planitud de la superficie $\leq 0,01$ mm.

4.3 Equipo

Probador de dureza: Probador de dureza Rockwell según ISO 6508-2, equipado con cono de diamante (ángulo de vértice de 120°) o penetrador de bola de acero (diámetro de 1/16" o 1/8").

Condiciones ambientales: temperatura 23°C $\pm$ 5°C, humedad < 65%.

5 Métodos de prueba

5.1 Procedimiento de prueba

Instale la muestra, asegurándose de que esté alineada con el penetrador.

Aplique una fuerza de prueba previa (10 kgf $\pm$ 0,1 kgf) y estabilice durante 1 a 5 segundos.

Aplique la fuerza de prueba principal (60, 100 o 150 kgf $\pm$ 0,5 kgf) y manténgala durante 2 a 8 segundos (ajustada según la dureza del material).

Descargue hasta la fuerza de prueba previa y lea el valor de dureza.

Repita la medición de 3 a 5 veces y tome el valor promedio.

5.2 Selección de rango

HRA: Cono de diamante, 60 kgf, adecuado para materiales duros (HRA 20-88).

HRB: Bola de acero de 1/16 de pulgada, 100 kgf, adecuada para materiales de dureza media (HRB 20-100).

HRC: Cono de diamante, 150 kgf, para acero duro (HRC 20-70).

Se pueden seleccionar otros rangos (como HRD, HRE) según sea necesario.

5.3 Control ambiental

Evite las vibraciones y las fluctuaciones de temperatura y mantenga la superficie de la muestra seca.

6 Procesamiento de datos

6.1 Valor de dureza

Cálculo: El valor de dureza se lee directamente del durómetro en HR (HRA, HRB, HRC, etc.).

Valor promedio: toma el valor promedio de 3 a 5 mediciones, con una precisión de $\pm 0,5$ HR (HRA, HRC) o ± 1 HR (HRB).

6.2 Incertidumbre

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Evalúe los errores causados por el equipo, la operación y el estado de la superficie de la muestra con un nivel de confianza del 95%. Incertidumbre típica $\leq \pm 1$ HR.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie. Rango de ensayo, fuerza de ensayo principal y tiempo de retención. Valor de dureza (valor medio y desviación estándar).

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

Acero al carbono: HRB 80 $\pm$ 1. Acero endurecido: HRC 50 $\pm$ 0,5. WC10Co: HRA 88 $\pm$ 0,5.

ilustrar

Serie Estándar:

La norma ISO 6508-1:2016 establece los métodos de prueba básicos. La norma ISO 6508-2:2015 especifica los procedimientos de verificación y calibración.

La norma ISO 6508-3:2015 especifica la preparación estándar del bloque de prueba.

Validez: La norma ISO 6508-1:2016 es válida a partir de 2021 y puede actualizarse en el futuro en función de nuevas tecnologías y equipos.

se puede comprar a través del sitio web oficial de ISO.

Nota: Al implementar, consulte las propiedades específicas del material y los resultados de la calibración del equipo, y consulte con técnicos profesionales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Método de prueba estándar ASTM G59 para realizar mediciones de resistencia a la polarización potenciodinámica

Descripción general

ASTM G59 es una norma desarrollada por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM International), titulada "Método de Prueba Estándar para la Realización de Mediciones de Resistencia a la Polarización Potenciodinámica". La norma se publicó por primera vez el 10 de noviembre de 1997, y la última versión es **la ASTM G59-97(2014)**, publicada el 1 de junio de 2014 y con vigencia confirmada en 2023. La ASTM G59 fue desarrollada por el Comité G01 de ASTM (Metales Corrosivos) para proporcionar un método de laboratorio que permita evaluar la velocidad y la tendencia a la corrosión de metales y aleaciones en entornos corrosivos mediante mediciones de resistencia a la polarización potenciodinámica. Esta norma es adecuada para el estudio de los mecanismos de corrosión, la selección de materiales y el control de calidad.

1 Alcance

Objetos aplicables : Adecuado para pruebas de comportamiento frente a la corrosión de metales y aleaciones (como acero, acero inoxidable, aluminio, aleaciones duras, etc.) en soluciones electrolíticas.

Propósito: Estimar la densidad de corriente de corrosión (i_{corr}) y la velocidad de corrosión midiendo la resistencia a la polarización.

No aplicable : No es adecuado para pruebas de corrosión de materiales no conductores o en condiciones extremas (como sales fundidas a alta temperatura).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ASTM G3-14 Práctica estándar para la preparación, realización y análisis de resultados de pruebas de corrosión de laboratorio

Método de prueba de referencia estándar ASTM G5-14: Polarización potenciodinámica

Práctica estándar ASTM E691-22: Evaluación de la comparabilidad de los datos de prueba

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Resistencia a la polarización (R_p)

La relación entre la densidad de corriente y la diferencia de potencial cuando se aplica un pequeño cambio de potencial cerca del potencial de corrosión, la unidad es $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

3.2 Densidad de corriente de corrosión (i_{corr})

La densidad de corriente a través de la reacción de corrosión por unidad de área, la unidad es μA

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

/cm², se utiliza para estimar la velocidad de corrosión.

3.3 Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de equilibrio de un metal en un electrolito sin corriente aplicada, la unidad es mV (relativo al electrodo de referencia).

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material : Metal o aleación, como acero al carbono, acero inoxidable 304, carburo WC-Co.

Tamaño : Área expuesta $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, o según lo determinado por acuerdo.

Cantidad : Cada grupo de experimentos se repitió 3 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

Tratamiento de superficie : Pulido mecánico a $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, enjuague con agua destilada después de la limpieza.

Montaje : Inserte la muestra en el portaelectrodos, asegurándose de que no haya burbujas en la superficie expuesta.

4.3 Electrolitos

Solución : como solución de NaCl al 3,5 % (fracción de masa), pH 6,5-7,0 o determinado mediante acuerdo.

Desoxigenación : Si es necesario, purgar con nitrógeno durante 15 minutos para eliminar el oxígeno disuelto.

Temperatura : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, o según lo controlado por el protocolo.

4.4 Equipo

Estación de trabajo electroquímica : Con funciones de control de potencial (precisión $\pm 0,1 \text{ mV}$) y medición de corriente (precisión $\pm 0,1 \mu\text{A}$).

Sistema de electrodos :

Electrodo de trabajo: muestra.

Electrodo de referencia: electrodo de calomelanos saturados (SCE) o electrodo de Ag/AgCl.

Electrodo auxiliar: electrodo de platino.

5 Métodos de prueba

5.1 Procedimiento de prueba

Instale el sistema de electrodos, sumérjalo en el electrolito y estabilícelo durante 1 hora hasta que E_{corr} se estabiliza (tasa de cambio $< 0,1 \text{ mV/min}$).
 E_{corr} inicial.

El escaneo dinámico potencial se realizó en el rango de $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ a una velocidad de escaneo de $0,166 \text{ mV/s} \pm 0,002 \text{ mV/s}$.

Registre la curva de densidad de corriente-potencial.

Descargue el electrodo y limpie la muestra.

5.2 Configuración de parámetros

Rango de escaneo : $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ (región lineal).

Intervalo de muestreo : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Control ambiental : evitar vibraciones e interferencias electromagnéticas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 Procesamiento de datos

6.1 Cálculo de la resistencia de polarización

fórmula :

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

Medida : Extrae la pendiente de la región lineal de la curva.

6.2 Estimación de la densidad de corriente de corrosión

Fórmula de Stern-Gibbs :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (通常 26 mV 对于活性腐蚀, 52 mV 对于钝化系统), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Precisión : $\pm 10\%$.

6.3 Incertidumbre

Evalúe los efectos de la estabilidad del electrodo y la pureza de la solución con un nivel de confianza del 95%.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie.

Composición del electrolito, temperatura y pH.

Velocidad de escaneo, alcance y corrección E valor.

R_p y i_{corr} Resultados e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

ilustrar

Enlaces a normas relacionadas : ASTM G59 se utiliza junto con ASTM G5 (polarización potenciodinámica) para proporcionar un análisis integral del comportamiento de la corrosión.

Limitaciones : Se asume linealidad solo para un rango de potencial pequeño, más allá de $\pm 10 \text{ mV}$ puede requerirse una referencia a ASTM G5.

Validez : Se confirma que la norma ASTM G59-97 (2014) es válida en 2023 y puede actualizarse en el futuro según la tecnología electroquímica.

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


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

1


www.chinatun


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

**ASTM G3-14 Práctica estándar
para convenciones aplicables a mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión**

Descripción general

ASTM G3-14 es una norma desarrollada por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM International), titulada "Práctica estándar para convenciones aplicables a mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión". La norma se publicó el 1 de mayo de 2014, y la versión más reciente, **ASTM G3-14 (2024)**, se publicó el 1 de enero de 2024 y se confirmó su entrada en vigor en 2024. La norma ASTM G3 fue desarrollada por el Comité G01 de ASTM (Corrosión de Metales) para proporcionar convenciones, terminología y procedimientos uniformes para mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión de laboratorio, garantizando así la repetibilidad y comparabilidad de los resultados. Esta norma es aplicable a las pruebas electroquímicas de metales y aleaciones en diversos entornos corrosivos.

1 Alcance

Objetos aplicables : Adecuado para pruebas de corrosión electroquímica de metales y aleaciones (como acero, acero inoxidable, aluminio, aleaciones duras, etc.) en soluciones electrolíticas.

Propósito : Estandarizar la preparación, operación y análisis de mediciones electroquímicas, incluyendo el sistema de electrodos, la configuración del instrumento y la interpretación de datos.

No aplicable : No aplicable a pruebas de corrosión no electroquímicas (como pruebas de niebla salina) ni a materiales no metálicos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

Método de prueba de referencia estándar ASTM G5-14: Polarización potenciodinámica

Método de prueba estándar ASTM G59-97(2014): Medición de la resistencia a la polarización potenciodinámica

Práctica estándar ASTM E691-22: Evaluación de la comparabilidad de los datos de prueba

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Celda electroquímica

Dispositivo utilizado para mediciones electroquímicas, que incluye un electrodo de trabajo, un electrodo de referencia y un electrodo auxiliar.

3.2 Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de equilibrio de un metal en un electrolito sin corriente aplicada, expresado en mV (con respecto al electrodo de referencia).

3.3 Resistencia a la polarización (R_p)

La relación entre el cambio de potencial y el cambio correspondiente en la corriente, expresada en $\Omega \cdot \text{cm}^2$, utilizado para estimar la tasa de corrosión.

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

3.4 Electrodo de referencia

Un electrodo que proporciona una referencia de potencial estable, como un electrodo de calomelanos saturado (SCE) o un electrodo de Ag/AgCl.

4 Preparación experimental

4.1 Muestra

Material : Metal o aleación, como acero al carbono, acero inoxidable 304, carburo WC-Co.

Tamaño : Área expuesta $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, o según lo determinado por acuerdo.

Cantidad : Cada grupo de experimentos se repitió 3 veces.

4.2 Procesamiento de muestras

Tratamiento de superficie : Pulido mecánico a $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, enjuagar con agua destilada después de la limpieza y secar para usar.

Montaje : Inserte la muestra en el portaelectrodos, asegurándose de que no haya burbujas ni contaminación en la superficie expuesta.

4.3 Electrolitos

Solución : como solución de NaCl al 3,5 % (fracción de masa), pH 6,5-7,0 o determinado mediante acuerdo.

Pureza : Utilice agua desionizada con una conductividad de $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Temperatura : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, o según lo controlado por el protocolo.

4.4 Equipos electroquímicos

Estación de trabajo : Con funciones de control de potencial (precisión $\pm 0,1 \text{ mV}$) y medición de corriente (precisión $\pm 0,1 \mu\text{A}$) .

Sistema de electrodos :

Electrodo de trabajo: muestra.

Electrodo de referencia: electrodo SCE o Ag/AgCl.

Electrodo auxiliar: electrodo de platino o grafito.

Puesta a tierra : asegúrese de que el sistema esté conectado a tierra para reducir la interferencia de ruido.

5 Prueba de funcionamiento

5.1 Conjunto de celda electroquímica

Asegúrese de que la distancia entre los electrodos sea adecuada (electrodo de trabajo a electrodo de referencia $\leq 5 \text{ mm}$).

Verifique la estanqueidad para evitar fugas de solución.

5.2 Estabilidad inicial

Sumergir en electrolito durante 1 hora hasta que E_{corr} se estabiliza (tasa de cambio $< 0,1 \text{ mV}/\text{min}$).
 E_{corr} inicial .

5.3 Procedimiento de medición

Potencial de circuito abierto (OCP) : registre el cambio de E_{corr} dentro de 30 minutos .

Resistencia a la polarización : Según ASTM G59, el rango de escaneo es $E_{\text{corr}} \pm 10 \text{ mV}$ y la velocidad es $0,166 \text{ mV}/\text{s} \pm 0,002 \text{ mV}/\text{s}$.

Polarización dinámica potencial : según ASTM G5, el rango de escaneo es $E_{\text{corr}} \pm 250 \text{ mV}$ y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

velocidad es de 0,5 mV/s $\pm$ 0,05 mV/s.

5.4 Control ambiental

Evite vibraciones, fluctuaciones de temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$) e interferencias electromagnéticas.

6 Análisis de datos

6.1 Potencial de corrosión

Tomar estabilidad Valor medio de E_{corr} , precisión ± 1 mV.

6.2 Resistencia a la polarización

$$R_p = \frac{\Delta E}{\Delta I}$$

其中, ΔE 为电位变化 (mV), ΔI 为相应电流变化 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), R_p 单位为 $\Omega \cdot \text{cm}^2$.

精度: $\pm 5\%$.

6.3 Densidad de corriente de corrosión

Fórmula de Stern-Gibbs :

$$i_{\text{corr}} = \frac{B}{R_p}$$

其中, B 为常数 (26 mV 或 52 mV, 取决于腐蚀类型), i_{corr} 单位为 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Precisión : $\pm 10\%$.

6.4 Incertidumbre

Evalúe los efectos de la deriva del electrodo, la pureza de la solución y la precisión del instrumento con un nivel de confianza del 95%.

6.5 Análisis de curvas

Grafique la curva de densidad de corriente potencial para identificar las regiones pasivas o activas.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie.

Composición del electrolito, temperatura y pH.

Parámetros de medición (por ejemplo, velocidad de escaneo, rango).

E_{corr} , R_p y i_{corr} Resultados e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650$ mV (SCE), $R_p = 500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 52 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200$ mV (SCE), $R_p = 2000 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 13 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300$ mV (SCE), $R_p = 1500 \Omega \cdot \text{cm}^2$, $i_{\text{corr}} = 17 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

Apéndice B: Calibración de electrodos

El electrodo de referencia se calibró regularmente con una solución estándar de potencial conocido con un error de $\leq \pm 2$ mV.

ilustrar

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

Relación con normas relacionadas : ASTM G3-14 proporciona la práctica básica para pruebas electroquímicas como ASTM G5 y G59, enfatizando la consistencia.

Limitaciones : Los resultados se ven afectados por la composición del electrolito y el estado de la superficie de la muestra, y las condiciones deben controlarse estrictamente.

Validez : Se confirma que ASTM G3-14 (2024) es válido en 2024 y puede actualizarse en el futuro según la tecnología electroquímica.

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:

**estándar ASTM G5-14
para realizar mediciones de polarización anódica
potenciodinámica**

Descripción general

ASTM G5-14 es una norma desarrollada por la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM International), titulada "Método de Prueba de Referencia Estándar para la Realización de Mediciones de Polarización Anódica Potenciodinámica". La norma se publicó el 1 de mayo de 2014, y la versión más reciente, **la ASTM G5-14(2021)**, se publicó el 1 de junio de 2021 y entró en vigor en 2023. La ASTM G5 fue desarrollada por el Comité G01 de ASTM (Metales Corrosivos) para proporcionar un método de laboratorio que permita evaluar el comportamiento anódico, las características de pasivación y la tendencia a la corrosión de metales y aleaciones en entornos corrosivos mediante mediciones de polarización potenciodinámica. Esta norma es adecuada para el estudio de los mecanismos de corrosión, la selección de materiales y el control de calidad.

1 Alcance

Objetos aplicables : Adecuado para probar el comportamiento de polarización anódica de metales y aleaciones (como acero, acero inoxidable, aluminio, aleaciones duras, etc.) en soluciones electrolíticas.

Propósito: Analizar el potencial de corrosión, la zona de pasivación y el potencial de ruptura mediante el control del escaneo de potencial y la medición de la curva de densidad de corriente-potencial.

No aplicable : No es adecuado para materiales no conductores o pruebas de corrosión no electroquímica (como desgaste en seco).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ASTM G3-14(2024) Práctica estándar para la preparación, realización y análisis de pruebas de corrosión de laboratorio

Método de prueba estándar ASTM G59-97(2014): Medición de la resistencia a la polarización potenciodinámica

Práctica estándar ASTM E691-22: Evaluación de la comparabilidad de los datos de prueba

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

3.1 Polarización

potenciodinámica La relación entre la densidad de corriente y el potencial se mide controlando el potencial para que cambie a una velocidad constante. 3.2 **Potencial de corrosión** (E_{corr})

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

El potencial de equilibrio de un metal en un electrolito sin corriente aplicada, en mV (con respecto al electrodo de referencia). 3.3 **Potencial de pasivación (E_{aprobado})**

El potencial en el que la densidad de corriente comienza a disminuir significativamente después de alcanzar el potencial, en mV.

3.4 **Potencial de ruptura (E_b)**

El potencial al cual la película pasiva se rompe, lo que resulta en un aumento brusco de la corriente, en mV.

4 **Preparación experimental**

4.1 **Muestra**

Material : Metal o aleación, como acero al carbono, acero inoxidable 304, carburo WC-Co.

Tamaño : Área expuesta $1 \text{ cm}^2 \pm 0,1 \text{ cm}^2$, o según lo determinado por acuerdo.

Cantidad : Cada grupo de experimentos se repitió 3 veces.

4.2 **Procesamiento de muestras**

Tratamiento de superficie : Pulido mecánico a $Ra \leq 0,8 \mu\text{m}$, enjuagar con agua destilada después de la limpieza y secar para usar.

Montaje : Inserte la muestra en el portaelectrodos, asegurándose de que no haya burbujas ni contaminación en la superficie expuesta.

4.3 **Electrolitos**

Solución : como solución de NaCl al 3,5 % (fracción de masa), pH 6,5-7,0 o determinado mediante acuerdo.

Pureza : Utilice agua desionizada con una conductividad de $\leq 1 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Temperatura : $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, o según lo controlado por el protocolo.

4.4 **Equipos electroquímicos**

Estación de trabajo : Con funciones de control de potencial (precisión $\pm 0,1 \text{ mV}$) y medición de corriente (precisión $\pm 0,1 \mu\text{A}$).

Sistema de electrodos :

Electrodo de trabajo: muestra.

Electrodo de referencia: electrodo de calomelanos saturados (SCE) o electrodo de Ag/AgCl.

Electrodo auxiliar: electrodo de platino o grafito.

Puesta a tierra : asegúrese de que el sistema esté conectado a tierra para reducir la interferencia de ruido.

5 **Métodos de prueba**

5.1 **Procedimiento de prueba**

Instale el sistema de electrodos, sumérjalo en el electrolito y estabilícelo durante 1 hora hasta que E_{corr} se estabiliza (tasa de cambio $< 0,1 \text{ mV}/\text{min}$).

E_{corr} inicial.

$E_{\text{corr}} - 50 \text{ mV}$ y escanear anódicamente hacia $E_{\text{corr}} + 1500 \text{ mV}$ o una densidad de corriente de $1 \text{ mA}/\text{cm}^2$ a una velocidad de exploración de $0,167 \text{ mV}/\text{s} \pm 0,002 \text{ mV}/\text{s}$.

Registre la curva de densidad de corriente-potencial.

Descargue el electrodo y limpie la muestra.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Configuración de parámetros

Rango de escaneo : $E_{\text{corr}} - 50 \text{ mV}$ a $E_{\text{corr}} + 1500 \text{ mV}$, o a una densidad de corriente de 1 mA/cm^2 .

Intervalo de muestreo : $\leq 0,1 \text{ mV}$.

Control ambiental : Evitar vibraciones y fluctuaciones de temperatura ($\pm 1^\circ\text{C}$).

6 Análisis de datos

6.1 Potencial clave

E_{corr} : Registre el punto de inicio de la curva, con una precisión de $\pm 1 \text{ mV}$.

Paso E : Determinar el potencial en el cual la densidad de corriente cae a un valor estable, con una precisión de $\pm 5 \text{ mV}$.

E_b : Identifica el potencial de ruptura en el que la corriente aumenta bruscamente, con una precisión de $\pm 5 \text{ mV}$.

6.2 Densidad de corriente

La densidad de corriente en las regiones del ánodo y del cátodo se registra en $\mu\text{A/cm}^2$ con una precisión de $\pm 1 \mu\text{A/cm}^2$.

6.3 Estimación de la tasa de corrosión

Extrapolación de Tafel : extraiga las pendientes de Tafel anódica y catódica de la curva y calcule i_{corr} .

$$i_{\text{corr}} = 10^{\frac{E_{\text{corr}} - a}{b_a} + \log i_a}$$

其中, a 和 b_a 分别为阴极和阳极塔菲尔常数, i_a 为阳极电流密度。

Precisión : $\pm 10\%$.

6.4 Incertidumbre

Evalúe los efectos de la deriva del electrodo, la pureza de la solución y la precisión del instrumento con un nivel de confianza del 95%.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Material de la muestra y estado de la superficie.

Composición del electrolito, temperatura y pH.

Velocidad de escaneo, alcance y corrección E valor.

Pase electrónico, i_{corr} Resultados e incertidumbres.

Fecha de prueba, modelo del equipo y firma del operador.

8 Apéndice (Informativo)

Apéndice A: Datos típicos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

碳钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -650 \text{ mV (SCE)}$, E_{pass} 不明显, $E_b = -400 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 50 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

304 不锈钢 (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -200 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 0 \text{ mV}$, $E_b = 800 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

WC10Co (3.5% NaCl): $E_{\text{corr}} = -300 \text{ mV (SCE)}$, $E_{\text{pass}} = 100 \text{ mV}$, $E_b = 900 \text{ mV}$, $i_{\text{corr}} = 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。

Apéndice B: Calibración de electrodos

El electrodo de referencia se calibró regularmente con una solución estándar de potencial conocido con un error de $\leq \pm 2 \text{ mV}$.

ilustrar

Enlaces a normas relacionadas : ASTM G5-14 se utiliza junto con ASTM G3 y ASTM G59 para proporcionar un análisis de corrosión electroquímica integral.

Limitaciones : Los resultados se ven afectados por la velocidad de escaneo y la composición del electrolito y deben verificarse mediante comparación con el entorno real.

Validez : Se confirma que ASTM G5-14 (2021) es válido en 2023 y puede actualizarse en el futuro según la tecnología electroquímica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabla de contenido

Parte 3: Optimización del rendimiento del carburo cementado

Capítulo 8: Resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.1 Mecanismo de resistencia a la corrosión del carburo cementado

8.1.1 Comportamiento electroquímico del carburo de tungsteno (WC) y la fase aglutinante en el carburo cementado

8.1.2 Entorno de pulverización ácida/sal de carburo cementado

8.1.2.1 Principio y descripción técnica

8.1.2.2 Mecanismo y análisis del carburo cementado en un entorno ácido/de niebla salina

8.1.2.3 Análisis de los factores que afectan la corrosión del carburo cementado en ambientes ácidos y de niebla salina

8.1.2.4 Estrategia de optimización de los efectos de la corrosión del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina

8.1.2.5 Aplicaciones de ingeniería del carburo cementado en entornos ácidos y de niebla salina

Consejos para la corrosión del carburo en esta sección

(1) Trayectoria de corrosión del carburo cementado

(2) El carburo cementado mejora la protección de la superficie.

(3) Densidad del límite de grano del carburo cementado

(4) Estrés de corrosión del carburo cementado

(5) Picaduras en la superficie de carburo cementado

8.2 Propiedades de alta temperatura del carburo cementado

8.2.1 Resistencia a la oxidación del carburo cementado (800-1000 °C)

8.2.1.1 Descripción general de los principios y tecnologías de la resistencia a la oxidación del carburo cementado

8.2.1.2 Mecanismo de resistencia a la oxidación y análisis del carburo cementado

8.2.1.3 Análisis de los factores que afectan la resistencia a la oxidación del carburo cementado

8.2.1.4 Estrategia para optimizar la resistencia a la oxidación del carburo cementado

8.2.1.5 Aplicación de ingeniería de la resistencia a la oxidación del carburo cementado

8.2.2 Fatiga térmica y fluencia del carburo cementado

8.2.2.1 Descripción general de los principios y tecnologías de fatiga térmica y fluencia del carburo cementado

8.2.2.2 Mecanismo de fatiga térmica y fluencia y análisis del carburo cementado

8.2.2.3 Factores que afectan la fatiga térmica y la fluencia del carburo cementado y sus efectos de acoplamiento

8.2.2.4 Estrategias de optimización de la fatiga térmica y la fluencia para carburo cementado

8.2.2.5 Aplicación de ingeniería para la optimización del rendimiento de fluencia y fatiga térmica del carburo cementado

8.3 Métodos para optimizar la resistencia a la corrosión y la resistencia a altas temperaturas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del carburo cementado

8.3.1 Ventajas de la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en el carburo cementado

8.3.1.1 Principio y descripción técnica de las ventajas de resistencia a la corrosión de la fase de unión de carburo cementado a base de Ni

8.3.1.2 Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en carburo cementado

8.3.1.3 Análisis microscópico y verificación de la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en carburo cementado

8.3.1.4 Análisis de los factores que afectan la resistencia a la corrosión de la fase de unión a base de Ni en el carburo cementado

8.3.1.5 Optimización del proceso de preparación de la fase aglutinante a base de Ni

8.3.1.6 Especificación de prueba para la fase de unión a base de Ni del carburo cementado la fase de unión a base de Ni de carburo cementado

8.3.1.9 Aplicaciones de ingeniería de la fase aglutinante de carburo cementado a base de Ni carburo cementado a base de Ni

8.3.2 Introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.2.1 Principio y descripción técnica de la introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.2.2 Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión y a la oxidación introducido por los aditivos Cr_3C_2 en el carburo cementado

8.3.2.3 Análisis microscópico y verificación de la introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.2.4 Análisis de los factores que afectan el rendimiento de los aditivos de carburo cementado Cr_3C_2

8.3.2.5 Optimización del proceso de preparación de aditivos de carburo cementado Cr_3C_2

8.3.2.6 Caso de ingeniería aditiva de carburo cementado Cr_3C_2 y comparación de rendimiento

8.3.2.7 Expansión de la aplicación y limitaciones de los aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.2.8 Dirección de optimización y perspectivas futuras de la introducción de aditivos Cr_3C_2 en carburo cementado

8.3.3 Protección del recubrimiento de superficies de aleación dura

Descripción general del principio y la tecnología de protección de superficies con recubrimiento de carburo cementado

Análisis del mecanismo de resistencia a la corrosión y a la oxidación del recubrimiento superficial de carburo cementado.

Análisis microscópico y verificación del recubrimiento superficial de carburo cementado

Análisis de los factores que afectan el recubrimiento superficial de carburo cementado

8.3.3.6 Optimización del proceso de preparación de la protección de la superficie con recubrimiento de carburo cementado

Casos de ingeniería y comparación del rendimiento de recubrimientos superficiales de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3.3.8 Expansión de la aplicación y limitaciones de los recubrimientos superficiales de carburo cementado

Dirección de optimización y perspectivas futuras de recubrimiento de superficie de carburo cementado

8.3.4 Optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.3.4.1 Descripción general de los principios y tecnologías para optimizar los parámetros del proceso de carburo cementado para la corrosión y la resistencia a altas temperaturas

8.3.4.2 Análisis de la resistencia a la corrosión y mecanismo de rendimiento de la optimización de los parámetros del proceso de carburo cementado

8.3.4.3 Análisis microscópico y verificación de la optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.3.4.4 Análisis de los factores que afectan la optimización de los parámetros del proceso de resistencia a la corrosión del carburo cementado y la resistencia a altas temperaturas

8.3.4.5 Estrategia de optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.3.4.6 Casos de ingeniería y comparación del desempeño de la optimización de parámetros de proceso para la resistencia a la corrosión del carburo cementado y la resistencia a altas temperaturas

8.3.4.7 Extensión de la aplicación y limitaciones de la optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas del carburo cementado

8.3.4.8 Optimización de los parámetros del proceso para la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado y perspectivas futuras

8.3.5. Control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.1 Descripción general de los principios y tecnologías para el control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.2 Análisis de la resistencia a la corrosión y mecanismo de rendimiento de la regulación de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.3 Microanálisis y verificación del control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.4 Análisis de los factores que afectan la microestructura del carburo cementado

8.3.5.5 Estrategia de control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.6 Caso de ingeniería de control de microestructura de carburo cementado y comparación de rendimiento

8.3.5.7 Expansión de la aplicación y limitaciones del control de la microestructura del carburo cementado

8.3.5.8 Dirección y perspectivas futuras del control y optimización de la microestructura del carburo cementado

8.4 Prueba y evaluación de la resistencia a la corrosión y a altas temperaturas del carburo cementado

8.4.1 Tasa de corrosión del carburo cementado (curva electroquímica de Tafel)

8.4.1.2 Mecanismo y análisis de la velocidad de corrosión del carburo cementado

8.4.1.3 Análisis de los factores que afectan la velocidad de corrosión del carburo cementado

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

- 8.4.1.4 Método de prueba para la velocidad de corrosión del carburo cementado
- 8.4.1.6 Extensión de la aplicación y limitaciones de la velocidad de corrosión del carburo cementado
- 8.4.1.7 Dirección de optimización y perspectivas futuras de la tasa de corrosión del carburo cementado
- 8.4.2 Ensayo de dureza a alta temperatura y choque térmico del carburo cementado
Descripción general del principio y la tecnología de la prueba de dureza a alta temperatura y choque térmico de carburo cementado
Mecanismo y análisis de la dureza a alta temperatura y del ensayo de choque térmico del carburo cementado.
- 8.4.2.3 Análisis de factores que afectan la dureza a alta temperatura y la prueba de choque térmico del carburo cementado
Métodos de ensayo para dureza a alta temperatura y ensayo de choque térmico de carburo cementado
- 8.4.2.5 Aplicación de ingeniería de la dureza a alta temperatura y la prueba de choque térmico del carburo cementado
Extensión de la aplicación y limitaciones de la prueba de dureza a alta temperatura y choque térmico del carburo cementado
- 8.4.2.7 Dirección de optimización y perspectivas futuras de la prueba de dureza a alta temperatura y choque térmico de carburo cementado
- Referencias

apéndice:

- Análisis comparativo de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de tungsteno de alta densidad
- Análisis comparativo de moldes de alta temperatura de carburo cementado y moldes de aleación de titanio, circonio y molibdeno (TZM)
- Descripción general de los componentes de turbinas de gas de carburo cementado
- Herramientas de carburo para el procesamiento de alimentos y piezas de equipos de procesamiento de alimentos
- Tobera de turbina de gas de carburo
- Válvula de tubería química de aleación dura
- Piezas de carburo para equipos de fabricación de papel
- Norma nacional de la República Popular China GB/T 7997-2017
- Método de prueba de rendimiento de carburo cementado Norma nacional de la República Popular China GB/T 3851-2015 Método para la determinación de la microestructura de carburo cementado Norma nacional de la República Popular China GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la microestructura de carburo cementado Norma nacional de la República Popular China GB/T 18376-2014 Método para la prueba de fatiga por impacto de carburo cementado Norma nacional de la República Popular China GB/T 7997-2017 Método para la prueba de rendimiento de carburo cementado
- Norma internacional ISO 15156-1:2020

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural: materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas

— **Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes al agrietamiento**

Petróleo, industrias petroquímicas y de gas natural — **Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas** — **Parte 1: Principios generales para la selección de materiales resistentes al agrietamiento**

Norma ISO 15156-2:2020

Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural

— **Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas**

— **Parte 2: Aceros al carbono y de baja aleación resistentes al agrietamiento y el uso de fundiciones de hierro. Petróleo.**

, industrias petroquímicas y de gas natural: **materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas**

— **Parte 2: Utilización de aceros al carbono y de baja aleación y fundiciones resistentes a la fisuración**

Norma Internacional ISO 15156-3:2020

Industrias del petróleo, petroquímica y del gas natural

— **Materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas**

— **Parte 3: CRA resistentes al agrietamiento (aleaciones resistentes a la corrosión) y otras aleaciones**

Petróleo, industrias petroquímicas y de gas natural: **materiales para uso en entornos que contienen H₂S en la producción de petróleo y gas**

— **Parte 3: Aleaciones resistentes a la corrosión (CRA) y otras aleaciones resistentes al agrietamiento**

Molde de carburo de alta temperatura

Cortadora de papel de carburo CTIA GROUP

ISO 9227:2017 Ensayo de corrosión Ensayo de niebla salina en atmósfera artificial

Norma Nacional de la República Popular China GB/T 18376-2014

Métodos de prueba para la resistencia a la corrosión y al desgaste del carburo cementado

Norma Internacional ISO 4287:1997

Especificaciones geométricas del producto - Textura de la superficie: Método del perfil -

Términos, definiciones y parámetros de textura de la superficie Especificaciones geométricas del producto (GPS)

— **Textura de la superficie: Método de perfil**

— **Términos, definiciones y parámetros de textura superficial**

Norma internacional ISO 3274:1996

Especificaciones geométricas de productos — Textura de la superficie: Perfilometría —

Características nominales de los instrumentos de contacto Especificaciones geométricas de productos (GPS)

— **Textura de la superficie: Método de perfil**

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

— Características nominales de los instrumentos de contacto (aguja)

ISO 4288:1996

Especificaciones geométricas de productos — Textura de la superficie: Método del perfil —
Reglas y procedimientos para la evaluación de la textura de la superficie

— Textura de la superficie: Método de perfil

— Normas y procedimientos para la evaluación de la textura superficial

Norma nacional de la República Popular China GB/T 12444-2006

Métodos de prueba para la fricción deslizante y el desgaste de materiales metálicos Norma
nacional de la República Popular China GB/T 16545-2008 Métodos de prueba para la
corrosión por niebla salina de materiales metálicos

Norma nacional de la República Popular China GB/T 3850-2015

Directrices generales para pruebas de corrosión de metales y aleaciones Norma
internacional ISO 8044:2015 Corrosión de metales y aleaciones — Términos y definiciones
básicos

Normas internacionales ISO 9223:2012

Corrosión de metales y aleaciones — Corrosividad de las atmósferas — Clasificación

GB/T 38512015 Norma Nacional de la República Popular China

Método para la determinación de la microestructura del carburo cementado

Norma nacional de la República Popular China GB/T 7997-2017 Método de prueba de
rendimiento del carburo cementado Norma internacional ISO 6508 Materiales metálicos:
prueba de dureza Rockwell Materiales metálicos: prueba de dureza Rockwell

Norma internacional ISO 6508-3:2015

Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 3: Calibración de bloques de
referencia

Norma internacional ISO 6508-1:2016

Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell — Parte 1: Método de ensayo

Método de prueba estándar ASTM G59 para realizar
mediciones de resistencia a la polarización potenciodinámica

Método de prueba estándar para la determinación de la resistencia a la polarización
potenciodinámica

ASTM G3-14 Práctica estándar

para convenciones aplicables a mediciones electroquímicas en pruebas de corrosión
estándar ASTM G5-14

para realizar mediciones de polarización anódica
potenciodinámica

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

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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