

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

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 7: Control de las propiedades mecánicas del carburo cementado

El carburo cementado (WC-Co) se usa ampliamente en herramientas de aviación (vida útil de corte >15 horas), brocas de minería (perforación >1200 m) y matrices resistentes al desgaste (extrusión >10⁶ veces) debido a su excelente dureza (HV 1200-1800), buena tenacidad a la fractura (K_{IC} 8-16 MPa·m^{1/2}), alta resistencia a la compresión (4000-6000 MPa) y excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,1 mm³/N·m). Sin embargo, en condiciones de trabajo extremas, como alto impacto (frecuencia >500 Hz), carga cíclica (>10⁵ veces), alta temperatura (>800 °C) y desgaste abrasivo (dureza >800 HV), el rendimiento integral del carburo cementado aún enfrenta desafíos. Es difícil que una sola estrategia de optimización satisfaga simultáneamente los requisitos sinérgicos de dureza, tenacidad, resistencia a la fatiga y resistencia al desgaste. Se puede lograr un avance en el rendimiento integral mediante el control de la microestructura (tamaño de grano de WC 0,2-2 μm, contenido de Co 6%-15%), análisis profundo del mecanismo de falla (velocidad de crecimiento de grietas ~10⁻⁶ mm/ciclo) y la aplicación de tecnología de refuerzo avanzada (VC aditivo 0,2%-0,5%, dosis de implantación de iones 10¹⁶-10¹⁷ cm⁻², espesor de revestimiento láser 50-150 μm).

Este capítulo parte de los siguientes cuatro aspectos: equilibrio entre dureza y tenacidad, resistencia a la fatiga y al impacto, análisis del mecanismo de fallo y estrategia de mejora del rendimiento. Se analizan sistemáticamente las propiedades mecánicas, las ventajas y desventajas, la tecnología de regulación y las condiciones del carburo cementado. Además, se analizará la tendencia de desarrollo del carburo cementado en el contexto de la futura tecnología de IA y la ecología del Internet de las Cosas (IIoT), lo que proporciona mayor eficiencia y fiabilidad para aplicaciones industriales.

Las ventajas del carburo cementado son su alta dureza y resistencia al desgaste, y su capacidad para soportar altas cargas y fricción bajo condiciones de trabajo extremas; sin embargo, su desventaja es la contradicción entre dureza y tenacidad. Una dureza alta (HV>1600) usualmente conduce a una disminución en la tenacidad (K_{IC} < 10 MPa·m^{1/2}), que es propensa a la fractura frágil. Además, la resistencia a la fatiga del carburo cementado aún necesita ser mejorada bajo carga cíclica de alta frecuencia (la tasa de crecimiento de grietas necesita ser controlada a <10⁻⁷ mm/ciclo). A través del análisis en este capítulo, los lectores tendrán una comprensión completa de los métodos para regular las propiedades mecánicas del carburo cementado y su desempeño en aplicaciones prácticas.

7.0 Propiedades mecánicas del carburo cementado

El carburo cementado (WC-Co) se utiliza ampliamente en la aviación, la minería y la fabricación de moldes gracias a sus excelentes propiedades mecánicas. A continuación, se detallan sus principales propiedades mecánicas, incluyendo su definición, método de medición, factores influyentes y contexto de aplicación:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.1. Alta dureza del carburo cementado .

7.0.1.0 ¿Cuál es la dureza del carburo cementado?

La dureza del carburo cementado (WC-Co) se refiere a la capacidad de su superficie para resistir la indentación o los arañazos de objetos externos (como los penetradores), lo que refleja la resistencia del material a la deformación plástica y al desgaste. Como material compuesto, el carburo cementado consta de una fase dura de carburo de tungsteno (WC, dureza de aproximadamente HV 2000-2500) y una fase de unión de cobalto (Co, dureza de aproximadamente HV 300). La dureza del carburo cementado suele estar entre HV 1200-1800, y puede aumentarse aún más a HV 2000-2500 mediante la modificación de la superficie (como la carburación, el revestimiento láser). El nivel de dureza determina directamente la durabilidad del carburo cementado en entornos de alta carga y alta fricción, como su rendimiento en el corte, la perforación y la fabricación de moldes.

La naturaleza física de la dureza está estrechamente relacionada con la microestructura del material, lo que se debe principalmente a la alta dureza y al efecto de fortalecimiento del límite de grano de la fase WC, mientras que la fase Co absorbe parte de la energía a través de la deformación plástica y ajusta el rendimiento general.

7.0.1.1 Método para medir la dureza del carburo cementado

La dureza del carburo cementado se puede medir mediante una variedad de métodos de prueba, diferentes métodos son adecuados para diferentes escenarios y requisitos de precisión:

Dureza Vickers (HV)

Rango : HV 1200-1800, hasta HV 2000-2500 después de la modificación de la superficie.

Principio : Utilice un durómetro Vickers, un penetrador de diamante de pirámide cuadrangular (ángulo diagonal de 136°), aplique una carga estándar (generalmente 30 kg) y calcule el valor de dureza midiendo la longitud diagonal de la huella. La fórmula es:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Donde F es la carga (kg) y d es la longitud diagonal de la sangría (mm).

Ventajas : amplio rango de medición, alta precisión, adecuado para pruebas de dureza de carburo cementado y es el método más utilizado .

Aplicación : Se utiliza para evaluar la dureza a granel y la dureza de áreas microscópicas como granos o recubrimientos.

Dureza Rockwell (HRA)

Rango : HRA 80-94 (escala A).

Principio : utilice un probador de dureza Rockwell con un penetrador de cono de diamante (ángulo de cono de 120°) y aplique una carga de 60 kg para medir la profundidad de la sangría.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas : Pruebas rápidas, adecuadas para pruebas a gran escala.

Limitaciones : Precisión ligeramente menor para materiales superduros (como el carburo cementado), a menudo utilizados para evaluación preliminar.

Dureza Brinell (HB)

Rango : HB 1000-1600.

Principio : Utilice un indentador de bola de carburo (10 mm de diámetro), aplique una carga elevada (por ejemplo, 3000 kg) y calcule la dureza a través del área de indentación. La fórmula es:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

7.0.1.2 Factores que afectan la dureza

La dureza del carburo cementado se ve afectada por diversas microestructuras y parámetros del proceso. A continuación, se presenta un análisis detallado de los principales factores:

(1) Tamaño de grano WC

效应: 晶粒尺寸越小, 硬度越高, 遵循 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$), 其中 σ_y 为屈服强度, d 为晶粒尺寸, k 为常数 (约 $0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。硬度与屈服强度近似正比 ($\text{HV} \approx 3\sigma_y$)。

Datos: Cuando el tamaño de grano disminuye de $2 \mu\text{m}$ a $0.5 \mu\text{m}$, la dureza aumenta de HV 1200 a HV 1600, lo que representa un aumento de aproximadamente el 25 % al 30 %. Si el tamaño de grano se reduce aún más a $<0.2 \mu\text{m}$, la dureza puede alcanzar HV 1800, pero la tenacidad puede disminuir debido al deslizamiento del límite de grano.

Mecanismo Los granos pequeños aumentan la densidad del límite de grano ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$), lo que dificulta el movimiento de dislocación y aumenta así la dureza.

(2) Contenido de Co

Efecto : Co es una fase blanda (dureza aproximadamente HV 300) y aumentar su contenido reducirá la dureza del carburo cementado.

Datos : Cuando el contenido de Co es del 6%-8%, la dureza es HV 1600-1800; cuando el contenido de Co es del 12%-15%, la dureza cae a HV 1200-1400.

Mecanismo : Cuando el contenido de Co es alto, la fracción de volumen de WC disminuye (la proporción de WC cae del 90% al 70%) y la resistencia a la deformación de la fase dura disminuye.

(3) Aditivos

Efecto : Los aditivos como VC (carburo de vanadio) o Cr_3C_2 pueden inhibir el crecimiento del grano y aumentar la dureza.

Datos : Agregar 0,2%-0,5% de VC puede aumentar la dureza en un 5%-10%, hasta HV 2000. Si la cantidad agregada es $>0.8\%$, se pueden formar fases frágiles (como VC_x), lo que reducirá el rendimiento.

Mecanismo : el VC inhibe el crecimiento del grano y reduce la tasa de migración del límite del grano ($<10^{-10} \text{ m/s}$) a través del fortalecimiento de la solución sólida y la precipitación (formando

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una capa delgada de VCx con un espesor de <20 nm).

(4) Modificación de la superficie

Efecto : Mejorar la dureza de la superficie mediante técnicas como la carburación, la implantación de iones o el revestimiento láser.

Datos : La carburación forma una capa rica en WC (espesor 10-30 μm) con una dureza de hasta HV 2000-2200; el revestimiento láser forma una capa de alta dureza (espesor 50-100 μm) con una dureza de hasta HV 2500.

Mecanismo : La modificación de la superficie introduce una fase de alta dureza (como WC o CrN) y una tensión de compresión residual (>400 MPa) para mejorar la resistencia a la deformación.

(5) Proceso de sinterización

Efecto : La temperatura de sinterización y la atmósfera afectan el crecimiento del grano y la microestructura.

Datos : Cuando la temperatura de sinterización es de 1400-1500 $^{\circ}\text{C}$ y el grado de vacío es <10⁻² Pa, el tamaño de grano se puede controlar a <0,8 μm y la dureza alcanza HV 1600. Si la temperatura es >1550 $^{\circ}\text{C}$ y el tamaño de grano es >2 μm , la dureza disminuye en un 10%-15%.

Mecanismo : La temperatura alta provoca el crecimiento del grano y reduce el efecto de fortalecimiento del límite del grano.

Mecanismo microscópico de la dureza

El mecanismo microscópico de la dureza del carburo cementado se basa principalmente en los siguientes aspectos:

(1) Alta dureza de la fase WC.

El WC (carburo de tungsteno) es un material superduro con una dureza de hasta HV 2000-2500, derivada de su estructura de enlace covalente (energía de enlace WC ~800 kJ/mol) y su alto módulo ($E \approx 700 \text{ GPa}$). La fase WC representa entre el 70 % y el 90 % de la fracción volumétrica del carburo cementado y es la principal fuente de dureza.

(2) Fortalecimiento del límite de grano (efecto Hall-Petch)

晶粒尺寸减小增加晶界密度, 晶界通过钉扎位错 (Orowan 强化, $\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 阻碍位错运动, 提高硬度和强度。晶界迁移速率 (<10⁻¹⁰ m/s) 受添加剂和烧结温度控制, 迁移能障约为 80-120 kJ/mol。

(3) Efecto regulador de la fase Co

La fase Co (baja dureza, HV ≈ 300) absorbe parte de la energía a través de la deformación plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) y reduce la concentración de tensión, pero un alto contenido de Co reducirá la proporción de la fase WC y reducirá la dureza general.

(4) Efecto de interfaz.

La fuerza de unión de la interfaz (>50 MPa) entre el WC y el Co tiene una influencia importante en

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 dureza. La humectabilidad del Co sobre el WC (ángulo de contacto $<15^\circ$) garantiza una baja energía de interfaz ($<1,5 \text{ J/m}^2$). Sin embargo, si la distribución del Co es desigual (desviación $>1\%$), pueden formarse depósitos de Co (tamaño $>5 \mu\text{m}$), lo que reduce la dureza.

(5) Estabilidad termodinámica

La estabilidad termodinámica del WC de grano fino se evalúa mediante la energía libre de Gibbs ($\Delta G < 0$). Cuando el tamaño de grano es $<0,5 \mu\text{m}$, la energía de la interfaz ($>1,5 \text{ J/m}^2$) predomina en los cambios de propiedades y puede inducir microfisuras (longitud $0,05\text{-}0,1 \mu\text{m}$), lo que afecta la dureza.

7.0.1.4 Importancia de la dureza en la aplicación

La alta dureza del carburo cementado es su principal ventaja en aplicaciones industriales, especialmente en los siguientes escenarios:

herramientas de aviación

Requisitos : Velocidad de corte $> 800 \text{ m/min}$, alta carga y fricción.

Rendimiento : La vida útil de corte de una herramienta WC-10Co con una dureza de HV 1600 puede alcanzar las 15 horas, lo que es un 25% más que la de un material con una dureza de HV 1200.

Mecanismo : La alta dureza reduce la tasa de desgaste de la herramienta ($<0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y prolonga la vida útil de la herramienta.

brocas para minería

Requisitos : Perforación de roca dura (dureza de roca $> 800 \text{ HV}$), alta fricción y resistencia al impacto requerida.

Rendimiento : Broca WC-8Co con dureza HV 1700, distancia de perforación $>1200 \text{ m}$, un aumento del 40%.

Mecanismo : La alta dureza reduce el desgaste abrasivo (ancho de ranura $<10 \mu\text{m}$) y mejora la durabilidad.

Molde resistente al desgaste

Requisitos : Extrusión de alta frecuencia ($>10^6$ veces), resistencia al desgaste y a la deformación.

Rendimiento : matriz WC-12Co con dureza HV 1600, tiempos de extrusión $>10^6$ veces.

Mecanismo : La alta dureza garantiza la capacidad de la superficie del molde para resistir la indentación y prolonga su vida útil.

Condiciones de alta temperatura

Demanda : Corte a alta temperatura ($>800^\circ\text{C}$), como el procesamiento de álabes de turbinas de aviación.

Rendimiento : El carburo con dureza HV 2000 (después de la carburación) tiene una vida útil de 20 horas, un aumento del 30%.

Mecanismo : La alta dureza y la capa de óxido (WO_3 , espesor $\sim 2 \mu\text{m}$) reducen conjuntamente el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desgaste por alta temperatura.

7.0.1.5 Compensación entre dureza y tenacidad

- entre la dureza y tenacidad (K_{Ic}) del carburo cementado:

Una dureza alta ($HV > 1600$) suele ir acompañada de una tenacidad baja ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), lo que puede provocar fácilmente una fractura frágil debido a granos finos ($< 0,2 \mu\text{m}$) o un bajo contenido de Co ($< 6\%$).

Una alta tenacidad ($K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) requiere aumentar el contenido de Co ($> 12\%$) o el tamaño de grano ($1-2 \mu\text{m}$), pero la dureza disminuirá ($HV < 1400$), lo que afectará la resistencia al desgaste.

Las estrategias de optimización incluyen:

de $0,5-1 \mu\text{m}$, el contenido de Co es del $8\%-12\%$, la dureza es HV 1500-1600, K_{Ic} $12-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

La adición de VC/ TaC ($0,2\%-0,5\%$) puede aumentar la dureza entre un 3% y un 5% manteniendo la tenacidad.

Adopta una estructura de gradiente (superficie Co 6% , interna 12%), dureza superficial HV 1600, interna K_{Ic} $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

7.0.1.6 Resumen

La dureza del carburo cementado es el indicador principal de su capacidad para resistir la deformación y el desgaste, con un rango típico de HV 1200-1800 y un máximo de HV 2500. La dureza se debe principalmente a la alta dureza y al refuerzo del límite de grano de la fase WC, y se ve afectada por factores como el tamaño del grano, el contenido de Co, los aditivos y la modificación de la superficie. Al optimizar la microestructura y los parámetros del proceso, el carburo cementado puede demostrar una excelente durabilidad y confiabilidad en campos como la aviación, la minería y la fabricación de moldes. En el futuro, el uso de la IA y la tecnología del Internet Industrial de las Cosas (IIoT) puede mejorar aún más la consistencia de la dureza y la eficiencia de la optimización del rendimiento.

7.0.2. Tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura del carburo cementado (WC-Co) es su capacidad para resistir la propagación de grietas y la fractura, y es un indicador clave para evaluar la fiabilidad de los materiales en condiciones de alta tensión o impacto. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores de influencia, el mecanismo microscópico y la relevancia de su aplicación.

7.0.2.1. Definición de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura (K_{Ic}) es la capacidad del carburo cementado para resistir la propagación de grietas cuando existen grietas o defectos. Su unidad de medida es $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. El rango de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tenacidad a la fractura del carburo cementado suele estar entre 8 y 16 MPa·m^{1/2}, lo que refleja su resistencia a la fractura frágil en condiciones de alta carga o impacto. La tenacidad a la fractura depende principalmente de la capacidad de deformación plástica de la fase de enlace Co y del efecto de refuerzo del límite de grano de la fase WC, lo que refleja el equilibrio entre la dureza y la tenacidad del carburo cementado.

7.0.2.2. Método de medición de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura suele medirse mediante métodos de ensayo estandarizados. Los métodos más comunes son los siguientes:

Viga con entalla de un solo borde (SENB)

Principio: Prefabricar una entalladura en forma de V o de borde recto en la muestra, aplicar una carga de flexión en tres puntos y medir la tensión máxima antes de la expansión de la grieta. La fórmula es:

原理: 在试样上预制 V 型或直边缺口, 采用三点弯曲加载, 测量裂纹扩展前的最大应力。公式为:

$$K_{Ic} = \frac{P \cdot S}{B \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

其中 P 为载荷, S 为支座间距, B 和 W 分别为试样厚度和宽度, a 为裂纹长度, $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为几何修正因子。

Condiciones: El tamaño de la muestra suele ser de 55 × 10 × 10 mm y la profundidad de la muesca es de aproximadamente 2 mm.

Ventajas: Adecuado para la medición precisa de carburo cementado, ampliamente utilizado en estándares industriales.

Método de sangría

de K_{Ic} a partir de la longitud de la grieta de la indentación de dureza Vickers, basada en una fórmula empírica para el crecimiento de la grieta.

Ventajas: No necesita preparación de muestra complicada, adecuado para pruebas rápidas.

Limitaciones: Baja precisión, adecuado para evaluación preliminar.

Otros métodos, como el método de viga voladiza doble (DCB) o el método de tensión compacta (CT), son adecuados para escenarios de investigación específicos.

El método SENB se ha convertido en el método principal para las pruebas de tenacidad a la fractura del carburo cementado debido a su alta precisión y estandarización.

7.0.2.3. Factores que afectan la tenacidad a la fractura del carburo cementado

El nivel de tenacidad a la fractura se ve afectado por una variedad de parámetros microestructurales y de proceso, como se detalla a continuación:

Contenido conjunto

Efecto: El Co, como fase tenaz, absorbe la energía de la fisura mediante deformación plástica. A

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mayor contenido, mayor tenacidad.

Datos: Cuando el contenido de Co es del 6%, K_{Ic} es de aproximadamente $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; cuando el contenido de Co es del 12%-15%, K_{Ic} puede alcanzar $14-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Mecanismo: Aumentar el contenido de Co ($>10\%$) mejora la disipación plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) pero reduce la dureza ($\text{HV} < 1400$).

Tamaño del grano

Efecto: El tamaño del grano tiene un doble efecto sobre la tenacidad y el tamaño moderado optimiza el rendimiento.

Cuando los granos son gruesos (por ejemplo, $1-2 \mu\text{m}$), $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; cuando los granos son demasiado finos (por ejemplo, $< 0,2 \mu\text{m}$), $K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ debido al deslizamiento del límite de grano (velocidad $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$).

Mecanismo: Los granos gruesos reducen la densidad del límite de grano ($< 10^{13} \text{ m}^{-2}$), reduciendo así la resistencia a la propagación de grietas; los granos excesivamente finos aumentan los defectos del límite de grano, lo que puede causar fácilmente microgrietas.

aditivo

Efecto: Los aditivos pueden fortalecer los límites de grano u optimizar la microestructura y mejorar la tenacidad.

Datos: Añadiendo TaC ($0,2\% - 0,5\%$) puede aumentar K_{Ic} en aproximadamente un $5\% - 10\%$; agregar VC ($> 0,8\%$) puede formar una fase frágil y reducir la tenacidad.

Mecanismo: TaC mejora la resistencia de unión de los límites de grano ($> 150 \text{ MPa}$) y reduce la fractura intergranular.

Proceso de sinterización

Efecto: La temperatura y el tiempo de sinterización afectan la distribución de Co y la estabilidad del límite del grano.

Datos: Cuando la temperatura de sinterización es de $1400-1500^\circ\text{C}$ y el tiempo de sinterización es de 1-3 horas, K_{Ic} es estable a $12-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; si es $> 1550^\circ\text{C}$, la tasa de segregación de Co es $> 1\%$ y K_{Ic} disminuye entre un 5% y un 10% .

Mecanismo: La temperatura alta conduce a la formación de una reserva de Co (tamaño $> 5 \mu\text{m}$), lo que reduce la tenacidad.

7.0.2.4. Mecanismo microscópico de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

El mecanismo microscópico de tenacidad a la fractura incluye principalmente los siguientes aspectos:

Deformación plástica de la fase de Co. La fase de Co absorbe la energía de la grieta mediante la deformación plástica (deformación $\sim 0,05\% - 0,1\%$) y retrasa su propagación. Cuando el contenido de Co es del 10% , la disipación plástica es significativa y el K_{Ic} puede alcanzar $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Desviación de grietas en los límites de grano de agua.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los límites de grano de agua ($0,5-1\ \mu\text{m}$) aumentan la longitud del camino de propagación de las grietas y reducen su velocidad ($<10^2\ \text{m/s}$) debido a la desviación de las grietas (ángulo de $20^\circ-40^\circ$). El efecto de la desviación es más pronunciado en granos gruesos ($>1\ \mu\text{m}$).

Unión de la interfaz.

La resistencia de la unión de la interfaz ($>50\ \text{MPa}$) entre el WC y el Co se logra mediante la humectación del Co (ángulo de contacto $<15^\circ$), y la energía de la interfaz es $<1,5\ \text{J/m}^2$. Si existen muchos defectos en la interfaz ($>0,5\%$), la tenacidad disminuye.

de supresión de microfisuras

(como TaC) inhiben la iniciación de microfisuras (longitud $<0,05\ \text{mm}$) a través del fortalecimiento de la solución sólida (espaciado del límite de grano $<0,2\ \mu\text{m}$), aumentando K_{Ic} en un $5\%-10\%$.

7.0.2.5. Importancia de la aplicación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura es crucial en la aplicación práctica del carburo cementado, especialmente en escenarios de alto impacto y carga cíclica:

herramientas de aviación

Requisitos: Velocidad de corte $> 800\ \text{m/min}$, necesidad de soportar alto impacto y carga cíclica.

Rendimiento: Herramienta WC-8Co con $K_{Ic} > 12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, vida útil >15 horas.

Mecanismo: La alta tenacidad reduce el crecimiento de grietas (velocidad $<10^{-6}\ \text{mm/ciclo}$) y extiende la vida útil.

brocas para minería

Requisitos: Perforación de roca dura (frecuencia $> 500\ \text{Hz}$), se requiere alta resistencia al impacto.

Rendimiento: Broca WC-10Co con $K_{Ic} > 13\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, distancia de perforación $>1200\ \text{m}$.

Mecanismo: La alta tenacidad absorbe la energía del impacto ($>18\ \text{J}$) y reduce el riesgo de fractura.

Molde resistente al desgaste

Requisitos: Extrusión de alta frecuencia ($>10^6$ veces), se requiere resistencia a la fractura por fatiga.

Propiedades: matriz WC-12Co con $K_{Ic} > 14\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, tiempos de extrusión $>10^6$.

Mecanismo: La alta tenacidad retrasa el crecimiento de microgrietas (longitud $<0,1\ \text{mm}$).

Condiciones de aguas profundas

Requisitos: Presión $>80\ \text{MPa}$, se requiere resistencia a la corrosión bajo tensión.

Propiedades: Carburo de estructura gradiente con $K_{Ic} > 14\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, vida útil >4 años.

Mecanismo: La alta tenacidad y la protección de la superficie reducen la propagación de grietas por corrosión.

7.0.2.6. Optimización y desarrollo futuro de la tenacidad a la fractura del carburo cementado.

Para mejorar la tenacidad a la fractura, se pueden utilizar las siguientes estrategias:

de grano de $0,5-1\ \mu\text{m}$, un contenido de Co del $10\%-12\%$, K_{Ic} puede alcanzar $12-14\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Control de aditivos: Agregar 0,2%-0,5% de TaC puede aumentar el K_{Ic} en un 5%-10%.

Refuerzo de la superficie: aplicar un revestimiento de TiN (espesor 1-3 μm) para reducir la iniciación de grietas en la superficie y aumentar el K_{Ic} en un 5%-10%.

IA e IIoT : utilice IA para predecir la distribución de Co y la estabilidad del límite de grano (error $<0,2\%$), y combine IIoT para monitorear la propagación de grietas en tiempo real (precisión $\pm 0,02\text{ mm}$) y mejorar la consistencia de la tenacidad (desviación $<0,5\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

La tenacidad a la fractura es el objetivo principal de la optimización del rendimiento del carburo cementado, especialmente en condiciones de trabajo extremas. Al optimizar la microestructura y los parámetros del proceso, el carburo cementado puede satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta demanda, como la aviación, la minería y las aguas profundas. En el futuro, la integración de la IA y las tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) industrial impulsará aún más la mejora de la tenacidad y la expansión de las aplicaciones.

7.0.3. Resistencia a la compresión del carburo cementado

La resistencia a la compresión del carburo cementado (WC-Co) es un importante indicador de propiedades mecánicas que refleja su capacidad para soportar daños bajo cargas de compresión, lo que refleja la capacidad del material para resistir la deformación por compresión y la fractura frágil. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores de influencia, el mecanismo microscópico, la relevancia de la aplicación, la optimización y el desarrollo futuro, y se añaden más detalles y datos para profundizar el análisis.

7.0.3.1. Definición de la resistencia a la compresión del carburo cementado

La resistencia a la compresión es la tensión máxima antes de que el material alcance la falla bajo una carga de compresión unidireccional de carburo cementado, medida en MPa, con un rango típico de 4000-6000 MPa. La resistencia a la compresión es un parámetro clave para el carburo cementado bajo condiciones de carga elevada, principalmente respaldada por el módulo ultraalto (alrededor de 700 GPa) y el efecto de fortalecimiento del límite de grano del carburo de tungsteno de fase dura (WC), mientras que está regulada por las propiedades plásticas de la fase de unión cobalto (Co). El nivel de resistencia a la compresión determina directamente la confiabilidad y durabilidad del carburo cementado en entornos de presión extrema (como aguas profundas o corte a alta velocidad). Por ejemplo, la resistencia a la compresión de la aleación WC-10Co suele estar entre 4500-5000 MPa, y el valor específico varía dependiendo de la microestructura y los parámetros del proceso.

7.0.3.2. Método para medir la resistencia a la compresión del carburo cementado

La resistencia a la compresión se determina mediante una prueba de compresión estandarizada, los siguientes son los métodos específicos y los detalles relevantes:

Prueba de compresión

Principio: Utilice una máquina universal de ensayos de materiales o una máquina especial de ensayos de compresión para aplicar una carga de compresión unidireccional a una muestra cilíndrica o cúbica hasta que experimente deformación plástica o fractura frágil, y registre la tensión máxima.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La fórmula es:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

其中 σ_c 为抗压强度 (MPa) , F 为破坏时的最大载荷 (N) , A 为试样初始截面面积 (mm²) 。

Condiciones de prueba:

Geometría de la muestra: cilíndrica (10 mm de diámetro, 20 mm de altura) o cúbica (10 × 10 × 10 mm), con una relación diámetro-altura típicamente de 1:2 para evitar efectos de barril.

Velocidad de carga: 0,5-1 mm/min, cargue lentamente para garantizar una distribución uniforme de la tensión.

Condiciones ambientales: temperatura ambiente (20-25°C), humedad <50%, evitar interferencias de factores ambientales.

Ventajas: Refleja directamente el límite de carga del material bajo compresión y los resultados de la prueba están altamente correlacionados con los escenarios de aplicación reales.

Limitaciones: La muestra debe estar libre de defectos iniciales (por ejemplo, porosidad <1%), de lo contrario el resultado será bajo; la geometría de la muestra y los efectos de fricción pueden introducir errores, requiriendo la aplicación de lubricantes o factores de corrección.

Tecnología complementaria: La combinación de medidores de tensión para medir las deformaciones transversales y longitudinales y calcular el coeficiente de Poisson ($\nu \approx 0,2-0,25$) verifica aún más el rendimiento de compresión.

El método de prueba de compresión es un método estándar para medir la resistencia a la compresión del carburo cementado y se utiliza ampliamente en la industria y la investigación científica.

7.0.3.3. Factores que afectan la resistencia a la compresión del carburo cementado

La resistencia a la compresión se ve afectada por múltiples factores, como la microestructura, la proporción de la composición y el proceso de preparación. El análisis específico es el siguiente:

Tamaño de grano WC

Efecto: El refinamiento del grano mejora la resistencia a la compresión al aumentar la densidad del límite del grano.

Datos: Cuando el tamaño de grano se refina de 2 μm a 0,2-0,5 μm , la resistencia a la compresión aumenta de 4000 MPa a >4500 MPa, o incluso hasta 5000 MPa; si el tamaño de grano es >2 μm , la resistencia a la compresión cae a 3500-4000 MPa.

Mecanismo: Granos finos (<0,5 μm) según la relación Hall-Petch

机理: 细小晶粒 (<0.5 μm) 依据 Hall-Petch 关系 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, $k \approx 0.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)

Mejora la resistencia al rendimiento, la densidad del límite de grano >10¹³ m⁻² obstaculiza eficazmente el movimiento de dislocación.

Limitación: Los granos demasiado finos (<0,2 μm) pueden provocar la aparición de microfisuras debido al aumento de defectos en los límites de grano (>0,5 %) y la resistencia a la compresión puede disminuir entre un 5 % y un 10 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido conjunto

Efecto: Un contenido demasiado alto de Co debilitará la resistencia a la compresión.

Datos: Cuando el contenido de Co es del 8%-12%, la resistencia a la compresión es estable a 4500-5000 MPa; cuando el contenido de Co es >15%, la resistencia a la compresión cae a <3500 MPa; cuando el contenido de Co es <6%, la resistencia a la compresión puede alcanzar 5000-6000 MPa, pero la tenacidad disminuye ($K_{IC} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Mecanismo: El Co es una fase blanda (dureza HV ≈ 300). Un contenido alto (>15%) reduce la fracción volumétrica de agua (<70%), ablanda el material y reduce la capacidad de carga a compresión. Un bajo contenido de Co aumenta la proporción de fases de agua, pero es propenso a la fractura frágil.

Rango de optimización: Un contenido de Co del 10% se considera el mejor valor para el equilibrio entre la resistencia a la compresión y la tenacidad.

Microestructura

Efecto: La microestructura homogénea mejora significativamente las propiedades de compresión.

Datos: Cuando la densidad del límite de grano es $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$ y la porosidad es <1%, la resistencia a la compresión es >5000 MPa; si la tasa de defectos del límite de grano es >2% o la porosidad es >2%, la resistencia a la compresión disminuye entre un 10% y un 15%.

机理: 均匀分布的 WC 相和 Co 相减少应力集中, 晶界通过 Orowan 强化 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 钉扎位错, 增强抗压能力; 孔隙或缺陷 (如尺寸 $> 5 \mu\text{m}$) 成为应力集中源, 降低强度。

Influencia del proceso: El prensado isostático en frío (CIP, presión 200-300 MPa) puede aumentar la densidad a >99%, mejorando significativamente la resistencia a la compresión.

7.0.3.4. Micromecanismo de la resistencia a la compresión del carburo cementado

El mecanismo microscópico de la resistencia a la compresión involucra los siguientes aspectos:

Alto módulo de la fase WC.

El módulo elástico de la fase WC ($E \approx 700 \text{ GPa}$) proporciona una base de alta resistencia a la compresión y resiste la deformación por compresión. Una fracción volumétrica de WC del 70 % al 90 % es la principal fuente de resistencia a la compresión, y su estructura de enlace covalente (energía de enlace WC $\sim 800 \text{ kJ/mol}$) garantiza un excelente rendimiento de compresión.

Refuerzo del límite de grano:

Una alta densidad del límite de grano ($> 10^{13} \text{ m}^{-2}$) dificulta el movimiento de dislocación a través del mecanismo de refuerzo de Orowan. Cuando el tamaño de grano es $< 0,5 \mu\text{m}$, el efecto de refuerzo es significativo y la resistencia a la compresión puede aumentar entre un 20 % y un 30 %. La velocidad de migración del límite de grano ($< 10^{-10} \text{ m/s}$) está controlada por la temperatura de sinterización (1400-1500 °C).

Regulación plástica de la

fase Co. La fase Co (dureza HV ≈ 300) absorbe la energía de compresión mediante deformación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) y previene la rotura frágil. Con un contenido de Co del 10 %, la disipación plástica optimiza el equilibrio entre la resistencia a la compresión y la tenacidad.

Estabilidad de la interfaz.

La resistencia de unión interfacial ($>50 \text{ MPa}$) entre WC y Co se logra mediante la humectación del Co (ángulo de contacto $<15^\circ$) y una energía interfacial $<1,5 \text{ J/m}^2$. Si existen muchos defectos interfaciales ($>0,5 \%$), como depósitos de Co (tamaño $>5 \mu\text{m}$), la resistencia a la compresión disminuye entre un 10 % y un 15 %.

Efecto de la tensión térmica:

La velocidad de enfriamiento de la sinterización ($3-5 \text{ }^\circ\text{C/min}$) controla la tensión térmica ($<100 \text{ MPa}$). Un enfriamiento demasiado rápido ($>10 \text{ }^\circ\text{C/min}$) puede provocar microfisuras y reducir la resistencia a la compresión entre un 5 % y un 10 %.

7.0.3.5. Importancia de la aplicación de la resistencia a la compresión del carburo cementado

Su alta resistencia a la compresión hace que el carburo cementado sea ampliamente utilizado en entornos extremos y de alta carga. A continuación, se presenta un análisis detallado de escenarios específicos:

herramientas de aviación

Requisitos: Soporta presión local $>4000 \text{ MPa}$ durante el corte, requiriendo alta resistencia a la compresión para mantener la integridad del borde.

Rendimiento: Las herramientas WC-10Co con una resistencia a la compresión de 5000 MPa tienen una vida útil de >15 horas a velocidades de corte $>800 \text{ m/min}$, lo que es un 25 % mayor que los materiales con una resistencia a la compresión de 4000 MPa .

Mecanismo: La alta resistencia a la compresión reduce la deformación por compresión del borde (deformación $<0,1\%$), lo que garantiza la precisión de corte y la durabilidad.

Taladro de aguas profundas

Requisitos: Trabajar en entornos de aguas profundas con presión $>80 \text{ MPa}$, necesidad de resistir altas cargas de compresión y corrosión del agua de mar.

Rendimiento: Broca WC-8Co con resistencia a la compresión de 5500 MPa , distancia de perforación $>1500 \text{ m}$, resistencia a la presión mejorada en un 40% y vida útil extendida a 5 años.

Mecanismo: Alta resistencia a la compresión para soportar altas presiones en aguas profundas ($>80 \text{ MPa}$), combinada con recubrimiento de CrN (espesor $2-4 \mu\text{m}$) para reducir los efectos de la corrosión.

Molde resistente a la presión

Requisitos: La extrusión de alta frecuencia ($>10^6$ veces) debe soportar alta presión local ($>5000 \text{ MPa}$) para evitar deformaciones o roturas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento: matriz WC-12Co con resistencia a la compresión de 6000 MPa, tiempos de extrusión $>10^6$ veces, 30 % más alto que la matriz con resistencia a la compresión de 4500 MPa.

Mecanismo: La alta resistencia a la compresión reduce las hendiduras en la superficie del molde (profundidad $<0,5\text{ }\mu\text{m}$) y extiende la vida útil.

Condiciones de alta temperatura

Requisitos: El corte a alta temperatura ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$) requiere resistencia al estrés térmico, como el procesamiento de álabes de turbinas de aviación.

Rendimiento: carburo cementado con estructura de gradiente (6% Co en la superficie, 12% en el interior) con resistencia a la compresión de 4500 MPa, vida útil >4000 horas a $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 35% más que los materiales ordinarios.

Mecanismo: Alta resistencia a la compresión combinada con una capa de óxido (WO_3 , espesor $\sim 2\text{ }\mu\text{m}$) para resistir la compresión a alta temperatura y reducir el estrés térmico ($<150\text{ MPa}$).

7.0.3.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia a la compresión del carburo cementado.

Para mejorar aún más la resistencia a la compresión, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Optimización de la microestructura:

El tamaño de grano es de $0,2$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$ y la resistencia a la compresión puede alcanzar 5000 a 6000 MPa a través de una molienda de bolas de alta energía (velocidad de 300 a 500 rpm , tiempo de 20 a 40 horas).

El contenido de Co se controla entre un 8% y un 12% para garantizar un equilibrio entre la resistencia a la compresión y la tenacidad ($K_{1c} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Control de aditivos:

La adición de $0,2\%$ - $0,5\%$ de VC o Cr_3C_2 puede aumentar la resistencia del límite de grano en un 5% - 10% y la resistencia a la compresión en un 3% - 5% .

Evitar adiciones $> 0,8\%$ para evitar la formación de fases frágiles (relaciones $> 0,5\%$).

Refuerzo de superficies:

La aplicación de un recubrimiento de CrN (espesor $2-4\text{ }\mu\text{m}$, dureza HV $3000-3500$) puede mejorar la resistencia a la compresión de la superficie y aumentar la resistencia en un 5% - 10% .

El revestimiento láser (potencia $1,5-2,5\text{ kW}$, espesor $50-100\text{ }\mu\text{m}$) forma una capa de alta dureza, que mejora la resistencia a la compresión en un 10% - 15% .

Optimización de procesos:

Temperatura de sinterización $1400-1500^{\circ}\text{C}$, grado de vacío $<10^{-2}\text{ Pa}$, densidad $>99\%$, porosidad $<1\%$.

El prensado isostático en frío (CIP, presión $200-300\text{ MPa}$) aumenta la densidad y la resistencia a la compresión en un 5% - 10% .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

IA e IIoT :

Se utilizó IA para predecir la densidad del límite de grano y la distribución de Co (error < 0,2 %), y los parámetros de molienda de bolas se optimizaron en función de datos históricos (precisión $\pm 0,5$ h).

Combinado con IIoT , se puede lograr un monitoreo en tiempo real de la distribución del estrés (precisión ± 10 MPa) y del tamaño del grano (desviación < 0,005 μm) para mejorar la consistencia de la resistencia a la compresión (desviación < 2%).

El 1 de junio de 2025, el equipo de xAI está desarrollando un modelo de optimización de compresión basado en aprendizaje profundo (DNN), que se espera que aumente la precisión de la predicción de la resistencia a la compresión a ± 50 MPa, lo que ayudará en el diseño de brocas para perforaciones en aguas profundas.

La resistencia a la compresión es el principal rendimiento del carburo cementado en condiciones de alta carga. Mediante la optimización de la microestructura, los parámetros de proceso y las tecnologías emergentes, puede satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta demanda como la aviación, las plataformas marinas y la fabricación de moldes. Con la aplicación a fondo de la IA y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), el rendimiento a la compresión y la eficiencia de producción del carburo cementado se mejorarán aún más, y se espera que se alcancen avances significativos en los próximos 2-3 años.

7.0.4. Resistencia al desgaste del carburo cementado

La resistencia al desgaste del carburo cementado (WC-Co) se refiere a su capacidad para resistir la pérdida de material superficial y el desgaste, y constituye un indicador clave de rendimiento para medir la durabilidad de los materiales en entornos de alta fricción o abrasivos. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores de influencia, el mecanismo microscópico, la relevancia de la aplicación, la optimización y el desarrollo futuro.

7.0.4.1. Definición de la resistencia al desgaste del carburo cementado

La resistencia al desgaste es la capacidad del carburo cementado para resistir el desgaste superficial bajo fricción, abrasión o cargas de contacto, generalmente cuantificada por la tasa de desgaste (unidad: $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) o el volumen de desgaste. El carburo cementado se utiliza ampliamente en entornos de alto desgaste debido a su excelente resistencia al desgaste, que se debe principalmente a la alta dureza (aproximadamente HV 2000-2500) de la fase dura de carburo de tungsteno (WC) y al refuerzo de tenacidad proporcionado por la fase aglutinante de cobalto (Co). La resistencia al desgaste afecta directamente la vida útil del carburo cementado en procesos de corte, taladrado y fabricación de moldes.

7.0.4.2. Método de medición de la resistencia al desgaste del carburo cementado

La resistencia al desgaste suele determinarse mediante pruebas de desgaste estandarizadas. A

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

continuación, se presentan métodos comunes y detalles relevantes:

Prueba de abrasión por flujo de arena (ASTM G65)

Principio: Utilizar el flujo de arena como abrasivo, aplicar una carga para simular el desgaste abrasivo y medir la pérdida de volumen de la muestra tras el desgaste. La fórmula para calcular la tasa de desgaste es la siguiente:

$$W_r = \frac{V}{F \cdot L}$$

Donde W_r es la tasa de desgaste ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), V es el volumen de desgaste (mm^3), F es la carga (N) y L es la distancia de deslizamiento (m).

Condiciones de prueba:

Grano: SiO_2 (dureza $> 800 \text{ HV}$).

Velocidad de deslizamiento: 1-2 m/s, duración 30-60 minutos.

Ambiente: Temperatura ambiente ($20\text{-}25^\circ\text{C}$), humedad $< 50\%$.

Ventajas: Simula condiciones reales de desgaste abrasivo y los resultados de la prueba son muy relevantes para aplicaciones industriales.

Limitaciones: Es necesario controlar el tamaño de las partículas y la uniformidad de la arena, y los resultados de la prueba se ven afectados por el coeficiente de fricción.

Prueba de desgaste del pasador sobre el disco (ASTM G99)

Principio: La muestra actúa como un pasador en contacto con un disco giratorio, se aplica carga y se mide la pérdida de masa o la profundidad después del desgaste.

Ventajas: Adecuado para evaluar el desgaste adhesivo y el desgaste por fatiga superficial.

Limitaciones: Requisitos de alta dureza para el material del disco y necesidad de corregir el efecto del calor por fricción.

Prueba de desgaste de tres cuerpos

Principio: Introducir un tercer abrasivo para simular el desgaste en condiciones de trabajo complejas y medir el ancho y la profundidad de las cicatrices de desgaste.

Ventajas: Más cercano a los escenarios de aplicación reales, como el desgaste de las brocas de minería.

La prueba de desgaste por flujo de arena (ASTM G65) se ha convertido en el método principal para probar la resistencia al desgaste del carburo cementado debido a su fuerte simulación y alto grado de estandarización.

7.0.4.3. Factores que afectan la resistencia al desgaste del carburo cementado

La resistencia al desgaste se ve afectada por múltiples factores, como la microestructura, la proporción de la composición, las condiciones de trabajo y los factores ambientales. El análisis específico es el siguiente:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureza

效应: 硬度越高, 耐磨性越好, 遵循 Archard 磨损公式 ($V = k \cdot F \cdot L / H$, H 为硬度)。

Mecanismo: La alta dureza reduce la profundidad de corte abrasivo y el ancho de la ranura de la superficie.

Limitación: Una dureza demasiado alta puede reducir la tenacidad y aumentar el riesgo de desgaste frágil.

Tamaño del grano

Efecto: El refinamiento del grano generalmente mejora la resistencia al desgaste, pero un refinamiento excesivo del grano puede tener efectos negativos.

Mecanismo: Un tamaño de grano moderado aumenta la densidad del límite de grano y dificulta la invasión de partículas abrasivas; los granos excesivamente finos pueden causar defectos en los límites de grano y dar lugar a microfisuras.

Contenido conjunto

Efecto: La resistencia al desgaste es mejor cuando el contenido de Co es moderado.

Mecanismo: Una cantidad adecuada de Co proporciona soporte plástico y reduce el desgaste adhesivo; cuando es demasiado alta, el Co se ablanda y aumenta la pérdida de material; cuando es demasiado baja, carece de tenacidad y es propenso al desgaste frágil.

Temperatura de funcionamiento

Efecto: Las altas temperaturas reducen la resistencia al desgaste, especialmente cuando predomina el desgaste adhesivo.

Mecanismo: La alta temperatura suaviza la fase Co, aumentando el desgaste del adhesivo y la transferencia de material.

Rugosidad de la superficie

Efecto: La suavidad de la superficie mejora la resistencia al desgaste.

Mecanismo: La baja rugosidad reduce los puntos de desgaste iniciales y reduce la incrustación abrasiva.

Corrosión ambiental

Efecto: El ambiente corrosivo acelera el desgaste.

Mecanismo: El ambiente ácido disuelve la fase Co, formando picaduras de corrosión y aumentando el desgaste.

7.0.4.4. Micromecanismo de la resistencia al desgaste del carburo cementado

El mecanismo microscópico de la resistencia al desgaste involucra los siguientes aspectos:

Alta dureza de la fase WC

La dureza de la fase WC (HV 2000-2500) resiste el corte abrasivo, reduce la pérdida de material de la superficie y es la principal fuente de resistencia al desgaste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fortalecimiento de los límites de grano

Los límites de grano obstaculizan la invasión de partículas abrasivas a través del mecanismo de fortalecimiento de Orowan, y el tamaño de grano moderado (0,5-1 μm) tiene el mejor efecto.

Efecto lubricante de la fase Co

Cuando la cantidad de fase Co es adecuada, proporciona lubricación y amortiguación plástica, reduciendo el desgaste del adhesivo; cuando es demasiado alta, aumenta la transferencia de material.

La capa de óxido de la superficie

forma una capa de óxido WO_3 a alta temperatura para reducir el desgaste, pero un espesor de capa desigual puede provocar descamación.

Tipo de desgaste

Desgaste abrasivo: Las partículas duras cortan la superficie formando ranuras.

Desgaste adhesivo: el ablandamiento a altas temperaturas produce transferencia de material.

Desgaste por fatiga: la propagación de microfisuras bajo carga cíclica intensifica el desgaste.

7.0.4.5. Importancia de la aplicación de la resistencia al desgaste del carburo cementado

La excelente resistencia al desgaste del carburo cementado garantiza un excelente rendimiento en entornos de alta fricción. Sus aplicaciones específicas incluyen:

herramientas de aviación

Requisitos: Velocidad de corte > 800 m/min, necesidad de resistir alta fricción y desgaste abrasivo.

Mecanismo: Alta dureza que reduce el desgaste del filo.

brocas para minería

Requisitos: Perforación de roca dura (dureza de roca > 800 HV), necesidad de resistir el desgaste abrasivo.

Mecanismo: El refinamiento del grano reduce el ancho de la ranura y extiende la vida útil.

Molde resistente al desgaste

Requisitos: Extrusión de alta frecuencia (>10⁶ veces), necesidad de resistir el desgaste de la superficie.

Mecanismo: La baja rugosidad de la superficie reduce el punto de desgaste inicial.

Condiciones de alta temperatura

Demanda: Corte a alta temperatura (>800 °C), como el procesamiento de álabes de turbinas de aviación.

Mecanismo: El recubrimiento de la superficie reduce el desgaste del adhesivo a alta temperatura.

7.0.4.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia al desgaste del carburo cementado.

Para mejorar aún más la resistencia al desgaste, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Optimización de la microestructura:

El tamaño de grano de 0,5-1 μm se selecciona y se logra mediante molienda de bolas de alta energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para optimizar la resistencia al desgaste.

El contenido de Co se controla entre un 8% y un 12% para equilibrar la plasticidad y la dureza.

Control de aditivos:

Agregar una pequeña cantidad de VC o Cr_3C_2 puede mejorar la resistencia del límite del grano y reducir el desgaste.

Evite la adición excesiva para evitar la formación de una fase frágil.

Refuerzo de superficies:

Aplique un recubrimiento CrN para aumentar la dureza de la superficie y reducir la tasa de desgaste.

El revestimiento láser forma una capa de alta dureza para mejorar aún más la resistencia al desgaste.

Optimización de procesos:

Temperatura de sinterización 1400-1500°C, grado de vacío $<10^{-2}$ Pa, garantiza una alta densidad.

Superficie pulida hasta baja rugosidad para reducir el desgaste inicial.

IA e IIoT :

Aproveche la IA para predecir el comportamiento del desgaste y optimizar el diseño de la microestructura.

Combinado con IIoT, el monitoreo en tiempo real del coeficiente de fricción y la condición de la superficie puede mejorar la consistencia de la resistencia al desgaste.

La resistencia al desgaste es el principal rendimiento del carburo cementado en condiciones de alta fricción. Mediante la optimización de la microestructura, el tratamiento superficial y las tecnologías emergentes, puede satisfacer las exigentes exigencias de la aviación, la minería y el procesamiento a alta temperatura. Con la aplicación a fondo de la IA y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), se espera que la resistencia al desgaste y la eficiencia de producción del carburo cementado mejoren significativamente en los próximos 2-3 años.

7.0.5. Resistencia a la fatiga del carburo cementado

La resistencia a la fatiga del carburo cementado (WC-Co) se refiere a su capacidad para resistir el fallo por fatiga y la propagación de grietas bajo cargas cíclicas. Es un importante indicador de propiedades mecánicas para medir la durabilidad de los materiales en uso a largo plazo. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores de influencia, el micromecanismo, la importancia de la aplicación, la optimización y el desarrollo futuro.

7.0.5.1. Definición de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

La resistencia a la fatiga se refiere a la capacidad del carburo cementado para resistir la formación y el crecimiento de grietas por fatiga bajo condiciones repetidas de carga y descarga. Esta resistencia se caracteriza generalmente por la vida útil por fatiga (número de ciclos) o la tasa de crecimiento de grietas (da/dN). Esta resistencia se debe principalmente a la dureza de la fase dura, el carburo de tungsteno (WC), y al refuerzo de tenacidad que proporciona la fase de enlace, el cobalto (Co), lo que resulta adecuado para escenarios de carga cíclica de alta frecuencia, como el uso prolongado de herramientas de corte y brocas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.5.2. Método de medición de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

La resistencia a la fatiga suele determinarse mediante ensayos de fatiga estandarizados. A continuación, se presentan métodos comunes y detalles relevantes:

Ensayo de fatiga por flexión rotatoria (ASTM E466)

Principio: La probeta se somete a cargas de flexión alternas en rotación y se registra el número de ciclos antes de la fractura por fatiga. La vida útil a la fatiga se expresa en ciclos (N).

Condiciones de prueba:

Frecuencia de carga: 10-50 Hz.

($R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$) : 0,1-0,3.

Ambiente: Temperatura ambiente (20-25°C), humedad <50%.

Ventajas: Simula condiciones reales de tensión alterna y es adecuado para evaluar el rendimiento de fatiga de alto ciclo.

Limitaciones: Es necesario controlar la calidad de la superficie de la muestra y los resultados de la prueba se ven afectados por la concentración de tensión.

Prueba de fatiga por carga axial (ASTM E606)

Principio: La muestra se somete a una carga alterna axial y se mide la vida útil por fatiga o la tasa de crecimiento de grietas.

Ventajas: Adecuado para evaluar el comportamiento de fatiga de ciclo bajo y crecimiento de grietas.

Limitaciones: El equipo de prueba tiene altos requisitos y es necesario corregir la distribución del estrés.

Prueba de crecimiento de grietas (ASTM E647)

Principio: Se aplica una carga a una muestra previamente agrietada y se mide la relación entre la tasa de crecimiento de la grieta (da/dN) y el factor de intensidad de tensión (ΔK).

Ventajas: Proporciona datos cuantitativos sobre los mecanismos de crecimiento de grietas.

Tecnología complementaria: Combinada con microscopía óptica (resolución <1 μm) o microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la morfología de la grieta.

La prueba de fatiga por flexión rotatoria se ha convertido en el método principal para probar la resistencia a la fatiga del carburo cementado debido a su fuerte simulación y alto grado de estandarización.

7.0.5.3. Factores que afectan la resistencia a la fatiga del carburo cementado

La resistencia a la fatiga se ve afectada por múltiples factores, como la microestructura, la relación de componentes, las condiciones de carga y los factores ambientales. El análisis específico es el siguiente:

Tamaño del grano

Efecto: El refinamiento del grano generalmente mejora la resistencia a la fatiga.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mecanismo: Los granos finos aumentan la densidad de los límites de grano y dificultan la propagación de grietas; los granos excesivamente gruesos pueden formar puntos de concentración de tensión.

Contenido conjunto

Efecto: El rendimiento antifatiga es mejor cuando el contenido de Co es moderado.

Mecanismo: Una cantidad adecuada de Co proporciona un amortiguador plástico y reduce la concentración de tensiones; cuando es demasiado alta, el Co se ablanda y reduce la resistencia a la fatiga; cuando es demasiado baja, carece de tenacidad y es propenso a agrietarse.

Relación de estrés

Efecto: la relación de tensión afecta la vida por fatiga.

Mecanismo: Una relación de tensión baja ($R < 0,1$) aumenta la vida útil por fatiga; una relación de tensión alta ($R > 0,5$) acelera el crecimiento de grietas.

Humedad ambiental

Efecto: La humedad alta reduce la resistencia a la fatiga.

Mecanismo: Cuando aumenta la humedad, la fase Co puede sufrir una ligera corrosión, formando microfisuras y acelerando la falla por fatiga.

Defectos superficiales

Efecto: La calidad de la superficie afecta la resistencia a la fatiga.

Mecanismo: Las grietas superficiales o la rugosidad ($R_a > 0,2 \mu\text{m}$) se convierten en la fuente de grietas por fatiga, lo que reduce la vida útil.

7.0.5.4. Mecanismo microscópico de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

El mecanismo microscópico de la resistencia a la fatiga involucra los siguientes aspectos:

Alta dureza de la fase WC

La dureza de la fase WC (HV 2000-2500) proporciona una base para la resistencia a la fatiga y resiste la deformación plástica causada por la tensión cíclica.

Fortalecimiento de los límites de grano

Los límites de grano impiden la propagación de grietas a través del mecanismo de fortalecimiento de Orowan, y el tamaño de grano moderado ($0,5-1 \mu\text{m}$) tiene el mejor efecto.

Regulación de la plasticidad de la fase Co

Cuando la cantidad de fase Co es adecuada, absorbe energía a través de la deformación plástica y retrasa la propagación de grietas; cuando es demasiado alta, aumenta el daño por fatiga.

Deflexión de grietas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los límites de grano de WC provocan una desviación de la trayectoria de las grietas, lo que aumenta la resistencia al crecimiento de grietas.

Tipo de daño por fatiga

Iniciación superficial: La tensión cíclica produce microfisuras superficiales (longitud < 0,1 mm).

Extensión interna: La grieta se extiende a lo largo del límite del grano o del depósito de Co.

Fractura: La fractura final ocurre una vez agotada la vida por fatiga.

7.0.5.5. Importancia de la aplicación de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

La excelente resistencia a la fatiga del carburo cementado permite un buen rendimiento en situaciones de carga cíclica. Sus aplicaciones específicas incluyen:

herramientas de aviación

Requisitos: Corte de alta frecuencia (>500 Hz), resistencia a la fatiga cíclica.

Mecanismo: La alta dureza reduce la iniciación de grietas en la superficie y prolonga la vida útil.

brocas para minería

Requisitos: Impacto cíclico (frecuencia > 500 Hz), se requiere resistencia a la fractura por fatiga.

Mecanismo: El fortalecimiento de los límites de grano retrasa la propagación de grietas y mejora la durabilidad.

Molde resistente al desgaste

Requisitos: Extrusión de alta frecuencia (>10⁶ veces), resistencia a la fatiga.

Mecanismo: Los defectos superficiales bajos reducen las fuentes de grietas por fatiga.

Componentes mecánicos

Requisitos: Se requiere carga cíclica a largo plazo y resistencia a la fatiga.

Mecanismo: La cantidad adecuada de Co mejora la tenacidad y retrasa el daño por fatiga.

7.0.5.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia a la fatiga del carburo cementado.

Para mejorar aún más la resistencia a la fatiga, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Optimización de la microestructura:

El tamaño de grano de 0,5 a 1 μm se selecciona y se logra mediante molienda de bolas de alta energía para mejorar el fortalecimiento de los límites de grano.

El contenido de Co se controla entre un 8% y un 12% para equilibrar la tenacidad y la dureza.

Control de aditivos:

Agregar una pequeña cantidad de VC o TaC puede mejorar la resistencia del límite del grano y reducir la propagación de grietas.

Evite la adición excesiva para evitar la formación de una fase frágil.

Refuerzo de superficies:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicar un recubrimiento de TiN o CrN para mejorar la resistencia a la fatiga de la superficie.
Pulir hasta obtener una rugosidad baja ($R_a < 0,1 \mu m$) para reducir las fuentes de grietas por fatiga.

Optimización de procesos:

Temperatura de sinterización 1400-1500°C, grado de vacío $< 10^{-2}$ Pa, garantiza una alta densidad.
Controlar la velocidad de enfriamiento (3-5°C/min) para reducir el estrés térmico.

IA e IIoT :

Utilice IA para predecir la vida útil por fatiga y optimizar el diseño de la microestructura.
Combinado con IIoT, el monitoreo en tiempo real de la distribución del estrés y la propagación de grietas puede mejorar la consistencia de la resistencia a la fatiga.

La resistencia a la fatiga es el principal rendimiento del carburo cementado en condiciones de carga cíclica. Mediante la optimización de la microestructura, el tratamiento superficial y las tecnologías emergentes, puede satisfacer los exigentes requisitos de la aviación, la minería y la fabricación de maquinaria. Con la aplicación exhaustiva de la IA y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), se espera que la resistencia a la fatiga y la eficiencia de producción del carburo cementado mejoren significativamente en los próximos 2-3 años.

7.0.6. Resistencia al impacto del carburo cementado

La resistencia al impacto del carburo cementado (WC-Co) se refiere a su capacidad para resistir la fractura y la deformación bajo altas cargas de impacto, y constituye un importante indicador de rendimiento mecánico para medir la fiabilidad de los materiales en entornos de carga dinámica. A continuación, se detalla la definición, el método de medición, los factores de influencia, el mecanismo microscópico, la relevancia de la aplicación, la optimización y el desarrollo futuro.

7.0.6.1. Definición de la resistencia al impacto del carburo cementado

La resistencia al impacto se refiere a la capacidad del carburo cementado para resistir la formación de grietas y la fractura al ser sometido a un impacto instantáneo de alta energía. Esta resistencia se caracteriza generalmente por la energía de impacto (unidad J) o tenacidad al impacto. Esta resistencia se debe principalmente a la tenacidad proporcionada por el cobalto (Co) como fase aglutinante y al aporte de dureza del carburo de tungsteno (WC) como fase dura, lo que lo hace adecuado para entornos de alto impacto, como perforadoras mineras y herramientas de corte de alta velocidad.

7.0.6.2. Método de medición de la resistencia al impacto del carburo cementado

La resistencia al impacto suele medirse mediante ensayos de impacto estandarizados. A continuación, se presentan los métodos habituales y los detalles relevantes:

Prueba de impacto Charpy (ASTM E23)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principio: La muestra se impacta con un péndulo en un estado de flexión de tres puntos y se mide la energía requerida para la fractura (trabajo de impacto).

Condiciones de prueba:

Dimensiones de la muestra: $55 \times 10 \times 10$ mm, con entalladura en V (profundidad 2 mm).

Velocidad de impacto: 5-5,5 m/s.

Ambiente: Temperatura ambiente (20-25°C).

Ventajas: Simula condiciones de impacto reales y los resultados de la prueba están altamente correlacionados con los escenarios de aplicación.

Limitaciones: La forma de la muesca y el tamaño de la muestra deben controlarse estrictamente y los resultados se ven afectados por la sensibilidad de la muesca.

Prueba de impacto Izod (ASTM E23)

Principio: La muestra se fija en forma de viga voladiza, se somete al impacto de un péndulo y se mide la energía de fractura.

Ventajas: Adecuado para muestras pequeñas, fácil de operar.

Limitaciones: Los resultados de la prueba se ven afectados por la forma en que se sujeta la muestra.

Prueba de impacto de caída de peso

Principio: Un martillo pesado cae libremente desde una altura específica para impactar la muestra y medir la resistencia al impacto del material.

Ventajas: Simula un impacto de alta energía y es adecuado para evaluar el rendimiento dinámico.

Tecnología complementaria: Combine fotografías de alta velocidad (velocidad de cuadro > 1000 fps) para observar el proceso de fractura o utilice microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología de la fractura.

La prueba de impacto Charpy se ha convertido en el método principal para probar la resistencia al impacto del carburo cementado debido a su alto grado de estandarización y fuerte simulación.

7.0.6.3. Factores que afectan la resistencia al impacto del carburo cementado

La resistencia al impacto se ve afectada por múltiples factores, como la microestructura, la proporción de componentes, las condiciones de prueba y los factores ambientales. El análisis específico es el siguiente:

Contenido conjunto

Efecto: Cuanto mayor sea el contenido de Co, mejor será la resistencia al impacto.

Mecanismo: La fase Co absorbe la energía del impacto a través de la deformación plástica y reduce la fractura frágil; cuando el contenido de Co es demasiado bajo, aumenta la fragilidad del material.

Tamaño del grano

Efecto: Un tamaño de grano moderado es beneficioso para la resistencia al impacto.

Mecanismo: Cuando el tamaño del grano es moderado ($0,5-1 \mu\text{m}$), el fortalecimiento del límite de grano y la tenacidad están equilibrados; los granos demasiado finos pueden causar defectos en los límites de grano y los granos demasiado gruesos reducen la resistencia a la propagación de grietas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aditivo

Efecto: Los aditivos pueden mejorar la resistencia al impacto.

Mecanismo: La adición de TaC o Cr₃C₂ mejora la resistencia del límite del grano y reduce la fractura intergranular.

Temperatura de prueba

Efecto: La baja temperatura reduce la resistencia al impacto.

Mecanismo: La baja temperatura reduce la tenacidad de la fase Co y aumenta la tendencia a la fractura frágil.

Defectos superficiales

Efecto: Los defectos superficiales reducen la resistencia al impacto.

Mecanismo: Las grietas o rugosidades superficiales ($R_a > 0,2 \mu\text{m}$) se convierten en puntos de concentración de tensiones, reduciendo la energía del impacto.

7.0.6.4. Mecanismo microscópico de la resistencia al impacto del carburo cementado

El mecanismo microscópico de resistencia al impacto involucra los siguientes aspectos:

Absorción plástica de la fase de Co.

La fase de Co absorbe la energía del impacto mediante deformación plástica, lo que retrasa la propagación de grietas. Una cantidad adecuada de Co mejora la tenacidad al impacto.

Deflexión de grietas en los límites de grano de WC

Los límites de grano de WC provocan una desviación de la trayectoria de la grieta, aumentan la longitud de la trayectoria de la fractura y reducen la velocidad de la fractura.

Fortalecimiento de los límites de grano

Los límites de grano impiden la propagación de grietas a través del mecanismo de fortalecimiento de Orowan, y el tamaño de grano moderado ($0,5-1 \mu\text{m}$) tiene el mejor efecto.

Unión interfacial

La resistencia de la unión interfacial entre WC y Co se logra a través de la humectación del Co, y los defectos interfaciales pueden provocar la iniciación de grietas.

Tipo de fractura por impacto

Fractura intergranular : la grieta se extiende a lo largo del límite del grano de WC, lo que es más común cuando el contenido de Co es bajo.

transgranular : La grieta atraviesa las partículas de WC y es más común en altas energías de impacto.

Fractura mixta: coexisten fracturas intergranulares y transgranulares , lo cual es habitual en las condiciones reales de trabajo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.0.6.5. Importancia de la aplicación de la resistencia al impacto del carburo cementado

Su excelente resistencia al impacto permite que el carburo cementado tenga un buen rendimiento en situaciones de alto impacto. Sus aplicaciones específicas incluyen:

brocas para minería

Requisitos: Impacto de alta frecuencia (>500 Hz), resistencia a la fractura por impacto.

Mecanismo: El alto contenido de Co absorbe la energía del impacto y reduce el riesgo de fractura.

herramientas de aviación

Requisitos: Corte de alta velocidad (>800 m/min), resistencia al impacto dinámico.

Mecanismo: El fortalecimiento de los límites de grano retrasa el crecimiento de grietas y extiende la vida útil.

Matriz de impacto

Requisitos: Estampado de alta frecuencia ($> 10^6$ veces), resistencia a fallas por impacto.

Mecanismo: Los defectos superficiales bajos reducen la iniciación de grietas.

Equipos de aguas profundas

Requisitos: Choque de presión en aguas profundas (>80 MPa), necesidad de resistir carga dinámica.

Mecanismo: La cantidad adecuada de Co y el recubrimiento de la superficie mejoran la resistencia al impacto.

7.0.6.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia al impacto del carburo cementado.

Para mejorar aún más la resistencia al impacto, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Optimización de la microestructura:

El tamaño de grano de $0,5$ a $1\ \mu\text{m}$ se selecciona y se logra mediante molienda de bolas de alta energía para optimizar el equilibrio entre el fortalecimiento de los límites de grano y la tenacidad.

El contenido de Co se controla entre un 8% y un 12% para mejorar la absorción de energía del impacto.

Control de aditivos:

Agregar una pequeña cantidad de TaC o Cr_3C_2 puede mejorar la resistencia del límite del grano y reducir la fractura intergranular.

Evite la adición excesiva para evitar la formación de una fase frágil.

Refuerzo de superficies:

Aplique un recubrimiento de TiN o CrN para mejorar la resistencia al impacto de la superficie.

Pulir hasta obtener una rugosidad baja ($R_a < 0,1\ \mu\text{m}$) para reducir los puntos de concentración de tensión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimización de procesos:

Temperatura de sinterización 1400-1500°C, grado de vacío $<10^{-2}$ Pa, garantiza una alta densidad. Controlar la velocidad de enfriamiento (3-5°C/min) para reducir el estrés térmico.

IA e IIoT :

Utilice IA para predecir el comportamiento de las fracturas por impacto y optimizar el diseño de la microestructura.

Combinado con IIoT, el monitoreo en tiempo real del inicio y propagación de grietas se puede utilizar para mejorar la consistencia de la resistencia al impacto.

La resistencia al impacto es el principal rendimiento del carburo cementado en condiciones de carga dinámica. Mediante la optimización de la microestructura, el tratamiento superficial y las tecnologías emergentes, puede satisfacer las altas exigencias de los equipos de minería, aviación y aguas profundas. Con la aplicación a fondo de la IA y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT), se espera que la resistencia al impacto y la eficiencia de producción del carburo cementado mejoren significativamente en los próximos 2-3 años.

7.0.7. Análisis exhaustivo y aplicación de las propiedades mecánicas del carburo cementado.

Existen interacciones y compensaciones complejas entre las propiedades mecánicas del carburo cementado (WC-Co), que deben considerarse exhaustivamente para satisfacer las necesidades de diferentes escenarios de aplicación. A continuación, se presenta un análisis detallado de las compensaciones de rendimiento, las estrategias de optimización y el desarrollo futuro.

7.0.7.1. Compensación de las propiedades mecánicas del carburo cementado

Existe un cierto equilibrio entre las propiedades mecánicas del carburo cementado, que se refleja en los siguientes aspectos:

Dureza y tenacidad

Relación: Una dureza elevada suele ir acompañada de una tenacidad baja y viceversa. (lograda por granos finos de WC y bajo contenido de Co) mejora la resistencia a la deformación, pero reduce la plasticidad y la tenacidad a la fractura (K_{IC}), lo que puede conducir fácilmente a una fractura frágil; la alta tenacidad (proporcionada por un mayor contenido de Co) absorbe energía a través de la deformación plástica, pero reduce la dureza y debilita la resistencia al desgaste.

Impacto de la aplicación: Las herramientas de aviación requieren alta dureza para resistir el desgaste, mientras que las perforadoras mineras requieren alta tenacidad para resistir el impacto. Ambas deben equilibrarse según las condiciones de trabajo específicas.

Resistencia a la fatiga y a los golpes

Relación: La resistencia a la fatiga y la resistencia al impacto tienen diferentes requisitos en la microestructura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mecanismo: La resistencia a la fatiga depende de la optimización de la microestructura (como un tamaño de grano moderado) para impedir la propagación de grietas; la resistencia al impacto requiere un mayor contenido de Co para mejorar la capacidad de absorción de energía y reducir la fractura instantánea.

Impacto de la aplicación: En cargas cíclicas de alta frecuencia (como herramientas de corte de aviación), la resistencia a la fatiga es más importante; en escenarios de alto impacto (como brocas mineras), la resistencia al impacto tiene prioridad.

Resistencia al desgaste y adaptabilidad ambiental.

Relación: La resistencia al desgaste puede verse comprometida en entornos hostiles, como altas temperaturas o corrosión.

Mecanismo: La temperatura alta ($>800^{\circ}\text{C}$) ablanda la fase Co y aumenta el desgaste adhesivo; el ambiente corrosivo ($\text{pH} < 5$) hace que la fase Co se disuelva, formando picaduras de corrosión y acelerando el desgaste.

Impacto de la aplicación: El procesamiento de álabes de turbinas de aviación debe considerar la resistencia al desgaste a altas temperaturas, y las brocas para aguas profundas deben prestar atención al rendimiento en entornos corrosivos.

7.0.7.2. Estrategias de optimización de las propiedades mecánicas del carburo cementado

Para optimizar el rendimiento integral del carburo cementado, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Regulación de la microestructura

de grano WC de $0,2\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$. Los granos finos ($<0,5\text{ }\mu\text{m}$) mejoran la dureza y la resistencia al desgaste, mientras que los granos más grandes ($1\text{--}2\text{ }\mu\text{m}$) mejoran la tenacidad y la resistencia al impacto.

Contenido de Co: controlado entre el 6 % y el 15 %. Un contenido bajo de Co (6 %-8 %) es adecuado para requisitos de alta dureza, y un contenido alto de Co (12 %-15 %) es adecuado para escenarios de alta tenacidad y resistencia al impacto.

Optimización aditiva

La adición de una pequeña cantidad de VC o TaC mejora la resistencia del límite del grano, mejora la resistencia al desgaste y a la fatiga manteniendo la tenacidad.

Evite la adición excesiva para evitar la formación de una fase frágil.

Tecnología de modificación de superficies

Aplice un recubrimiento de CrN o TiN para aumentar la dureza de la superficie y la resistencia al desgaste y mejorar el rendimiento en entornos corrosivos y de alta temperatura.

La tecnología de revestimiento láser o implantación de iones se utiliza para formar una capa superficial de alta dureza para mejorar la resistencia al impacto y a la fatiga.

7.0.7.3. Escenarios de aplicación de las propiedades mecánicas del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A través de una optimización integral, el carburo cementado puede satisfacer las necesidades de las siguientes aplicaciones exigentes:

herramientas de aviación

Requisitos: Alta dureza y resistencia al desgaste para resistir el desgaste por corte, alta resistencia a la fatiga para soportar cargas cíclicas.

de grano 0,2-0,5 μm , contenido de Co 6%-8%, recubrimiento de superficie CrN .

brocas para minería

Requisitos: Alta tenacidad y resistencia al impacto para soportar el impacto, alta resistencia al desgaste para resistir el desgaste de la roca dura.

Estrategia de optimización: tamaño de grano 1-2 μm , contenido de Co 12%-15%, agregando TaC para fortalecer los límites de grano.

Molde resistente al desgaste

Requisitos: Alta dureza y resistencia al desgaste para resistir el desgaste por extrusión, alta resistencia a la fatiga para extender la vida útil.

de grano 0,5-1 μm , contenido de Co 8%-12%, superficie pulida a baja rugosidad.

7.0.7.4. Desarrollo futuro de las propiedades mecánicas del carburo cementado

En el futuro, el rendimiento integral y la confiabilidad de la aplicación del carburo cementado se pueden mejorar aún más mediante las siguientes tecnologías:

Tecnología de IA: utilice IA para predecir las compensaciones de rendimiento y optimizar el diseño de la microestructura (como el tamaño del grano y el contenido de Co).

Internet industrial de las cosas (IIoT): monitoreo en tiempo real de la distribución del estrés y la propagación de grietas durante el uso para mejorar la consistencia del rendimiento.

Tecnología de fabricación avanzada: Combinando la impresión 3D y la nanotecnología para desarrollar carburo cementado con estructura de gradiente (como alta dureza en la superficie y alta tenacidad en el interior) para satisfacer necesidades multifuncionales.

Un análisis exhaustivo muestra que las propiedades mecánicas del carburo cementado deben evaluarse y optimizarse para cumplir con los requisitos específicos de cada aplicación. Mediante la regulación de la microestructura, los aditivos y la tecnología de modificación de superficies, el carburo cementado puede utilizarse ampliamente en la aviación, la minería y la fabricación de moldes. En el futuro, la aplicación a fondo de la IA y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) impulsará aún más la mejora de su rendimiento y la expansión de sus aplicaciones.

7.1 Equilibrio de dureza y tenacidad del carburo cementado

(1) Dureza del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureza del carburo cementado (WC-Co) se refiere a su capacidad para resistir la deformación y el desgaste, generalmente expresada en dureza Vickers (HV), que oscila entre 1200 y 1800 HV. La dureza se ve afectada por los siguientes factores:

del grano WC

(por ejemplo, 0,2-0,5 μm), mayor será la dureza, pudiendo alcanzar HV 1800 (efecto Hall-Petch).

Contenido de Co

Cuando el contenido de Co es bajo (por ejemplo, 6%-8%), la dureza es mayor (HV 1600-1800); cuando el contenido de Co es alto (por ejemplo, 12%-15%), la dureza disminuye (HV 1200-1400).

Como aditivo

puede inhibir el crecimiento del grano y aumentar la dureza en un 5%-10%, hasta HV 2000.

La modificación de la superficie,

como la carburación o el revestimiento láser, puede aumentar la dureza a HV 2000-2500.

Dureza del carburo cementado

La dureza del carburo cementado (WC-Co) puede expresarse de diversas maneras, según el método de ensayo y el escenario de aplicación. Los métodos de expresión más comunes incluyen:

Rango de dureza Vickers (HV) del

carburo cementado : HV 1200-1800, hasta HV 2000-2500 (tras la modificación de la superficie).

Descripción: Utilice el durómetro Vickers para aplicar una carga estándar (normalmente 30 kg) y calcular el área de indentación. Ventajas: Adecuado para una amplia gama de mediciones de carburo cementado, lo que refleja su capacidad para resistir la deformación.

Dureza Rockwell (HR)

: HRA 80-94 (escala A).

Descripción: Se utiliza un cono de diamante para aplicar una carga de 150 kg y medir la profundidad de la indentación. Ventajas: Prueba rápida, ideal para ensayos a gran escala.

dureza Brinell (HB)

: HB 1000-1600 (requiere una carga grande, por ejemplo, 3000 kg).

Descripción: Utilice una bola de acero o de carburo para presionar y calcular el área de indentación. Limitaciones: Aplicabilidad limitada a materiales de alta dureza (como el carburo); se requiere ajuste de la carga.

Microdureza (HV0.1-HV1)

Rango: HV 1200-1800 (carga pequeña, por ejemplo, 0.1-1 kg).

Descripción: Se utiliza para la medición microscópica de áreas, especialmente indicado para el análisis de granos o recubrimientos. Ventajas: Alta precisión, ideal para la evaluación de propiedades

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

locales.

Estos métodos de representación reflejan la capacidad del carburo cementado para resistir la compresión, la deformación y el desgaste. La dureza Vickers (HV) es la más utilizada debido a su amplia aplicabilidad. El valor real se ve afectado por el tamaño de grano de WC, el contenido de Co y los aditivos (como el VC, que puede aumentar la HV entre un 5 % y un 10 %).

(2) Tenacidad del carburo cementado

La tenacidad del carburo cementado (WC-Co) se caracteriza generalmente por su tenacidad a la fractura (K_{Ic}), que oscila entre 8 y 16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Sus características de tenacidad son las siguientes:

contenido de Co

, mayor será la tenacidad. Con un contenido de Co del 6%, la K_{Ic} es de aproximadamente 8-10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; con un contenido de Co del 12%-15%, la K_{Ic} puede alcanzar los 14-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Cuando el tamaño de grano

es grueso (como 1-2 μm), la tenacidad es mayor ($K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$); cuando el tamaño de grano es demasiado fino (como $< 0,2 \mu\text{m}$), la tenacidad puede disminuir debido al deslizamiento del límite de grano ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Añadiendo TaC (0,2 %-0,5 %) como aditivo

puede fortalecer los límites de grano y aumentar K_{Ic} en aproximadamente un 5 %-10 %.

El método de prueba

utiliza el método de viga con entalla de un solo borde (SENB). Por ejemplo, la K_{Ic} del WC-10Co (grano de 0,5 μm , Co 10%) es de aproximadamente 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo cual es adecuado para brocas de minería. La dureza y la tenacidad deben estar equilibradas, y una tenacidad alta suele ir acompañada de una disminución de la dureza ($\text{HV} < 1400$).

(3) Tipos de tenacidad del carburo cementado

El carburo cementado (WC -Co) se caracteriza principalmente por los siguientes indicadores y métodos, que reflejan su capacidad para resistir la fractura y absorber energía:

Tenacidad a la fractura (K_{Ic}) La tenacidad a la **fractura** (K_{Ic}) es la capacidad del carburo cementado para resistir la propagación de grietas cuando existen grietas, y su unidad es $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. La K_{Ic} del carburo cementado generalmente se determina por el efecto sinérgico del carburo de tungsteno de fase dura (WC) y el cobalto de fase aglutinante (Co), lo que refleja el equilibrio entre la dureza y la tenacidad del material.

El K_{Ic} del carburo cementado (WC-Co) es un índice de propiedad mecánica clave para su resistencia a la propagación de grietas y fracturas, y desempeña un papel vital en la fiabilidad y la vida útil del material. A continuación, se detallan diversos aspectos importantes y factores

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

influyentes.

Importancia de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura (K_{Ic}) es la propiedad principal del carburo cementado para mantener la integridad estructural en condiciones de alta tensión, impacto o defectos. El carburo cementado se usa ampliamente en corte, taladrado y fabricación de moldes debido a su alta dureza (generalmente proporcionada por WC, alrededor de HV 2000-2500), pero esta alta dureza a menudo viene acompañada de una alta fragilidad, lo que hace que el material sea propenso a fracturas irregulares cuando se carga dinámicamente o existen microfisuras. K_{Ic} cuantifica la capacidad del material para resistir dicha fractura frágil y determina directamente si el carburo cementado puede soportar un impacto inesperado o una falla inducida por defectos en el uso real. Por ejemplo, en un entorno de impacto de alta frecuencia o carga cíclica, un K_{Ic} más bajo puede hacer que las microfisuras se expandan rápidamente a macrofracturas, mientras que un K_{Ic} más alto puede extender significativamente la vida útil por fatiga y la resistencia al impacto. Además, el K_{Ic} también afecta la seguridad durante el procesamiento, ya que la fractura repentina de las herramientas de carburo cementado puede causar interrupciones en la producción o daños en el equipo. Por lo tanto, optimizar el K_{Ic} es un objetivo importante para mejorar el rendimiento general y la fiabilidad del carburo cementado en aplicaciones industriales, especialmente en condiciones extremas (como altas temperaturas, altas presiones o entornos corrosivos).

Factores que afectan la tenacidad a la fractura del carburo cementado

La tenacidad a la fractura del carburo cementado se ve afectada por una variedad de microestructuras, relaciones de composición y parámetros del proceso de preparación, como se detalla a continuación:

Contenido conjunto

Función : El Co, como fase enlazante, afecta significativamente al K_{Ic} a través de su capacidad de deformación plástica.

Mecanismo: Al aumentar el contenido de Co, aumenta la proporción de fase tenaz en el material, lo que mejora la capacidad de disipación plástica e inhibe la propagación de grietas. Cuando el contenido de Co es bajo (por ejemplo, 6 % o menos), predomina la fase WC, y aunque la dureza es alta, existe una deficiencia de amortiguación plástica, lo que resulta en un K_{Ic} bajo. Cuando el contenido de Co es alto (por ejemplo, 12 %-15 %), la plasticidad aumenta y el K_{Ic} aumenta significativamente.

Rango y equilibrio : El contenido típico de Co está entre 6% y 15%, y se considera que entre 10% y 12% es el equilibrio óptimo entre tenacidad y dureza.

Limitaciones : Un contenido demasiado alto de Co puede reducir la dureza y la resistencia al desgaste y debe ajustarse según las necesidades específicas.

Tamaño del grano

Efecto : El efecto del tamaño del grano de WC sobre K_{Ic} es doble.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

机制：较细的晶粒（如 0.2-0.5 μm ）通过 Hall-Petch 效应 ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$) 增加晶界密度 ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$)，提高强度，但可能因晶界缺陷（如空隙或微裂纹）降低 K_{1c} ；适中晶粒尺寸（0.5-1 μm ）提供最佳的晶界强化与韧性平衡；较大晶粒 ($>2 \mu\text{m}$) 减少晶界密度，增强裂纹偏转能力， K_{1c} 随晶粒粗大而有所提升，但硬度可能下降。

Influencia del proceso：El tamaño del grano se controla mediante la temperatura de sinterización (1400-1500 $^{\circ}\text{C}$) y el tiempo (1-3 horas). Una sinterización a alta temperatura o prolongada puede provocar fácilmente el crecimiento del grano.

aditivo

Efecto：Aditivos como VC, TaC o Cr_3C_2 pueden mejorar significativamente el K_{1c} .

Mecanismo：Estos aditivos refuerzan los límites de grano mediante solución sólida o precipitación, inhiben el crecimiento del grano de agua (velocidad de migración del límite de grano $<10^{-10} \text{ m/s}$) y mejoran la resistencia de la unión interfacial ($>150 \text{ MPa}$). Por ejemplo, el VC (0,2 %-0,5 %) forma una capa delgada de VC_x para reducir los puntos débiles en los límites de grano; el TaC mejora la tenacidad del límite de grano y reduce la tendencia a la fractura intergranular.

Limitaciones：Una adición demasiado alta (por ejemplo, $>0,8 \%$) puede formar una fase frágil (por ejemplo, VC_x excesivo), que a su vez reduce K_{1c} .

Uniformidad de la microestructura

Efecto：La uniformidad de la microestructura afecta directamente a K_{1c} .

Mecanismo：La distribución uniforme de las fases de WC y Co reduce la concentración de tensiones, y la estructura con baja porosidad ($<1\%$) y pocos defectos en los bordes de grano ($<0,5\%$) mejora la tenacidad. Si el Co se distribuye de forma desigual (como la formación de depósitos de Co con un tamaño $>5 \mu\text{m}$), es probable que las grietas se propaguen a lo largo de las zonas débiles y el K_{1c} disminuye.

Influencia del proceso：El prensado isostático en frío (CIP, presión 200-300 MPa) o la sinterización al vacío pueden mejorar la homogeneidad microestructural.

Proceso de sinterización

Efecto：Los parámetros de sinterización afectan el rendimiento final de K_{1c} .

Mecanismo：La temperatura de sinterización (1400-1500 $^{\circ}\text{C}$) es demasiado alta o el tiempo de sinterización es demasiado largo, lo que resulta en la segregación de granos gruesos y Co, lo que reduce el K_{1c} . Una temperatura y un vacío adecuados ($<10^{-2} \text{ Pa}$) garantizan una estructura densa y optimizan la tenacidad. La velocidad de enfriamiento (3-5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) controla la tensión térmica ($<100 \text{ MPa}$) y evita la formación de microfisuras.

Optimización：La sinterización de varios pasos (como la presinterización a baja temperatura + la sinterización a alta temperatura) puede mejorar la consistencia microestructural.

Estado de la superficie

Efecto：Los defectos superficiales o las tensiones residuales afectan a K_{1c} .

Mecanismo：Las grietas superficiales, la rugosidad ($R_a >0,2 \mu\text{m}$) o la tensión de tracción residual

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(>200 MPa) se convierten en fuentes de iniciación de grietas, reduciendo K_{Ic} ; la tensión de compresión residual (>400 MPa) puede aumentar K_{Ic} mediante la modificación de la superficie (como el granallado).

Influencia del proceso : Pulido a $Ra < 0,1 \mu m$ o tratamiento de recubrimiento (como TiN) para mejorar el estado de la superficie.

Mecanismo microscópico

Disipación plástica de la fase Co: la fase Co sufre una deformación plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} s^{-1}$) bajo impacto o tensión, absorbiendo la energía de la grieta y retrasando la expansión de la grieta.

Desviación y formación de puentes en los límites de grano : los límites de grano de WC provocan una desviación de la grieta (ángulo de 20° a 40°), lo que aumenta la longitud del recorrido; la fase Co forma un efecto de puente en la punta de la grieta, consumiendo energía.

Resistencia de unión de la interfaz : la interfaz WC-Co (resistencia de unión > 50 MPa, ángulo de contacto < 15°) afecta la resistencia a la propagación de grietas y los defectos de la interfaz (como huecos > 0,5 %) reducen K_{Ic} .

Supresión de microgrietas : los aditivos fortalecen los límites de grano, reducen la iniciación de microgrietas (longitud < 0,05 mm) y mejoran la tenacidad general.

La tenacidad a la fractura es el núcleo de la optimización del rendimiento del carburo cementado, que debe equilibrarse ajustando el contenido de Co, el tamaño del grano, los aditivos y el proceso de preparación para satisfacer las necesidades en diferentes condiciones de trabajo.

(4) Tenacidad al impacto del carburo cementado

La tenacidad al impacto del carburo cementado (WC-Co) se define como su capacidad para resistir la fractura y la deformación bajo cargas de impacto de alta energía, y constituye un importante indicador de propiedades mecánicas para medir la fiabilidad de los materiales en entornos de carga dinámica. A continuación, se detalla su definición, importancia, método de medición, factores influyentes y mecanismo microscópico.

Definición de tenacidad al impacto del carburo cementado

La tenacidad al impacto se refiere a la capacidad del carburo cementado para absorber energía y resistir la fractura bajo un impacto instantáneo de alta energía, generalmente caracterizada por la energía de impacto (unidad J) o la energía de fractura en la prueba de impacto. La tenacidad al impacto del carburo cementado se determina principalmente por la capacidad de deformación plástica proporcionada por el cobalto (Co) en la fase aglutinante y la dureza del carburo de tungsteno (WC) en la fase dura, lo que refleja la resistencia a la fractura del material en entornos de alto impacto.

La importancia de la tenacidad al impacto del carburo cementado

La tenacidad al impacto es crucial para el rendimiento del carburo cementado en condiciones dinámicas. El carburo cementado se usa ampliamente en minería, corte y fabricación de moldes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

debido a su alta dureza (proporcionada por WC, aproximadamente HV 2000-2500), pero la alta dureza a menudo viene acompañada de cierta fragilidad, lo que lo hace propenso a fracturas frágiles bajo cargas de alto impacto (como impactos de alta frecuencia o cargas repentinas). La tenacidad al impacto determina directamente si el carburo cementado puede soportar dicha carga instantánea sin fallar. Por ejemplo, en brocas de minería o matrices de estampado, una baja tenacidad al impacto puede hacer que el material se rompa rápidamente bajo un alto impacto, causando daños en el equipo o interrupción de la producción; mientras que una alta tenacidad al impacto puede extender efectivamente la vida útil y mejorar la seguridad. Además, la tenacidad al impacto también afecta la confiabilidad del carburo cementado en entornos extremos (como temperaturas bajas o altas) y es un indicador importante para optimizar el rendimiento integral de los materiales.

Método de medición de la tenacidad al impacto del carburo cementado

La tenacidad al impacto suele determinarse mediante ensayos estandarizados. A continuación, se presentan los métodos habituales y los detalles relevantes:

Prueba de impacto Charpy (ASTM E23)

Principio : La muestra se impacta con un péndulo en un estado de flexión de tres puntos y se mide la energía requerida para la fractura (trabajo de impacto).

Condiciones de prueba :

Dimensiones de la muestra: $55 \times 10 \times 10$ mm, con entalladura en V (profundidad 2 mm).

Velocidad de impacto: 5-5,5 m/s.

Ambiente: Temperatura ambiente (20-25°C).

Ventajas : Simula condiciones de impacto reales y los resultados son muy relevantes para los escenarios de aplicación.

Limitaciones : La forma de la muesca y el tamaño de la muestra deben controlarse estrictamente, y los resultados de la prueba se ven afectados por la sensibilidad de la muesca.

Prueba de impacto Izod (ASTM E23)

Principio : La muestra se fija en forma de viga voladiza, se somete al impacto de un péndulo y se mide la energía de fractura.

Ventajas : Adecuado para muestras pequeñas, fácil de operar.

Limitaciones : Los resultados se ven afectados por el método de sujeción.

Prueba de impacto de caída de peso

Principio : Un martillo pesado cae libremente desde una altura específica para impactar la muestra y medir la resistencia al impacto.

Ventajas : Simula un impacto de alta energía y es adecuado para evaluar el rendimiento dinámico.

Tecnología complementaria : Combine fotografías de alta velocidad (velocidad de cuadro > 1000 fps) para observar el proceso de fractura o utilice microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología de la fractura.

La prueba de impacto Charpy se ha convertido en el método principal para probar la tenacidad al impacto del carburo cementado debido a su alto grado de estandarización y fuerte simulación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Factores que afectan la tenacidad al impacto del carburo cementado

La tenacidad al impacto del carburo cementado se ve afectada por la microestructura, la relación de composición, las condiciones de prueba y los factores ambientales, como se detalla a continuación:

Contenido conjunto

Función : El contenido de Co es el principal factor que afecta la tenacidad al impacto. Cuanto mayor sea el contenido de Co, mejor será la tenacidad al impacto.

Mecanismo : La fase de Co absorbe la energía del impacto mediante deformación plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) y reduce la tendencia a la fractura frágil. Cuando el contenido de Co es bajo (por ejemplo, 6 % o menos), el material es principalmente fase WC, con alta dureza, pero plasticidad insuficiente y baja tenacidad al impacto. Cuando el contenido de Co es alto (por ejemplo, 12 %-15 %), la plasticidad aumenta y la tenacidad al impacto mejora significativamente.

Rango y equilibrio : El contenido de Co está entre 6%-15%, y 10%-12% suele ser el equilibrio óptimo entre tenacidad y dureza.

Limitaciones : Un contenido demasiado alto de Co puede reducir la dureza y la resistencia al desgaste y debe ajustarse según los requisitos de la aplicación.

Tamaño del grano

Efecto : El efecto del tamaño del grano de WC en la resistencia al impacto es doble.

Mecanismo : Un tamaño de grano moderado (0,5-1 μm) proporciona el mejor equilibrio entre el reforzamiento del borde de grano y la tenacidad. La densidad del borde de grano ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$) dificulta la propagación de grietas a través del mecanismo de reforzamiento de Orowan. Si bien los granos más finos ($<0,2 \mu\text{m}$) mejoran la dureza, los defectos en el borde de grano pueden aumentar, reduciendo la tenacidad al impacto. Los granos más grandes ($>2 \mu\text{m}$) aumentan las trayectorias de deflexión de las grietas y mejoran la tenacidad al impacto, pero la dureza disminuye.

Influencia del proceso : El tamaño del grano se controla mediante la temperatura de sinterización (1400-1500 °C) y el tiempo (1-3 horas). Una temperatura demasiado alta produce granos gruesos.

aditivo

Función : Los aditivos como TaC o Cr_3C_2 pueden mejorar la tenacidad al impacto.

Mecanismo : TaC mejora la resistencia del límite de grano ($>150 \text{ MPa}$) y reduce la fractura intergranular; Cr_3C_2 inhibe el crecimiento del grano (tasa de migración del límite de grano $<10^{-10} \text{ m/s}$) y mejora la estabilidad microestructural.

Limitaciones : Una adición demasiado alta (por ejemplo, $>0,8 \%$) puede formar una fase frágil y reducir la tenacidad al impacto.

Temperatura de prueba

Efecto : La temperatura tiene un efecto significativo en la tenacidad al impacto.

Mecanismo : La temperatura baja ($<-40 \text{ }^\circ\text{C}$) reduce la tenacidad de la fase Co y aumenta la tendencia a la fractura frágil; la temperatura alta ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$) puede hacer que la fase Co se ablande y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduzca la capacidad de absorción de energía.

Impacto ambiental : Se debe seleccionar la fórmula de material adecuada según las condiciones de trabajo reales (como corte a baja temperatura o alta temperatura en aguas profundas).

Uniformidad de la microestructura

Función : La uniformidad de la microestructura es crucial para la resistencia al impacto.

Mecanismo : La distribución uniforme de las fases de WC y Co reduce la concentración de tensiones, y las estructuras con baja porosidad (<1%) y pocos defectos en los bordes de grano (<0,5%) mejoran la tenacidad al impacto. Si el Co se distribuye de forma desigual (por ejemplo, formando un depósito de Co con un tamaño >5 μm), es probable que las grietas se propaguen por las zonas débiles, lo que reduce la tenacidad al impacto.

Influencia del proceso : El prensado isostático en frío (CIP, presión 200-300 MPa) o la sinterización al vacío pueden mejorar la uniformidad.

Estado de la superficie

Efecto : Los defectos superficiales o la tensión residual afectan la tenacidad al impacto.

Mecanismo : Las grietas superficiales, la rugosidad ($R_a > 0,2 \mu m$) o la tensión de tracción residual ($> 200 MPa$) se convierten en puntos de concentración de tensión, lo que reduce la tenacidad al impacto; la tensión de compresión residual ($> 400 MPa$) puede mejorar la resistencia al impacto mediante la modificación de la superficie (como el granallado).

Influencia del proceso : Pulido a $R_a < 0,1 \mu m$ o tratamiento de recubrimiento (como TiN) para mejorar el estado de la superficie.

(5) Mecanismo microscópico de tenacidad al impacto del carburo cementado

Absorción plástica de la fase Co

La fase Co absorbe la energía del impacto mediante deformación plástica y retrasa la propagación de grietas. Una cantidad adecuada de Co mejora la tenacidad al impacto.

Deflexión de grietas en los límites de grano de WC

Los límites de grano de WC provocan una desviación de la trayectoria de la grieta (ángulo de 20° a 40°), aumentan la longitud de la trayectoria de la fractura y reducen la velocidad de la fractura.

Fortalecimiento de los límites de grano

晶界强化: 晶界通过 Orowan 强化机制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu m$) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 效果最佳。

Unión de interfaz

La resistencia de unión interfacial ($> 50 MPa$) entre WC y Co se logra mediante la humectación del Co (ángulo de contacto $< 15^\circ$) y los defectos interfaciales (por ejemplo, huecos $> 0,5 \%$) pueden inducir la iniciación de grietas.

Tipo de fractura por impacto

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

Fractura intergranular : la grieta se extiende a lo largo del límite del grano de WC, lo que es más común cuando el contenido de Co es bajo.

Transgranular fractura : La grieta atraviesa las partículas de WC y es más común en energías de alto impacto.

Fractura mixta : coexisten fracturas intergranulares y transgranulares , lo cual es habitual en las condiciones reales de trabajo.

La tenacidad al impacto es el rendimiento clave del carburo cementado en entornos de carga dinámica. Puede optimizarse ajustando la microestructura y los parámetros del proceso para satisfacer las necesidades de diferentes condiciones de trabajo.

(6) Relación entre dureza y tenacidad del carburo cementado

Existe una cierta relación entre la dureza y la tenacidad (generalmente expresada como dureza Vickers HV y tenacidad a la fractura K_{Ic}) del carburo cementado (WC-Co). La relación básica es la siguiente:

La dureza (HV 1200-1800) y la tenacidad (K_{Ic} 8-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) suelen mostrar una tendencia inversa. Una dureza alta (como HV 1600-1800) suele ir acompañada de una tenacidad menor (K_{Ic} 8-10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) , mientras que una tenacidad alta (K_{Ic} 14-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) suele conducir a una disminución de la dureza (HV 1200-1400). Esto se debe a que la dureza y la tenacidad dependen de diferentes micromecanismos : la dureza se debe principalmente a la alta dureza de la fase WC, mientras que la tenacidad depende de la capacidad de deformación plástica de la fase Co.

La dureza (HV 1200-1800) y la tenacidad a la fractura (K_{Ic} 8-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) del carburo cementado son sus propiedades mecánicas fundamentales, que afectan directamente su confiabilidad en cargas elevadas (>4000 MPa), entornos de impacto (>500 Hz) y altas temperaturas (>800°C).

(7) El equilibrio entre dureza y tenacidad es un desafío clave en el diseño de carburo cementado.

Una dureza alta (HV > 1600) suele ir acompañada de una tenacidad baja (K_{Ic} < 10 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) , lo que puede provocar fácilmente una fractura frágil; mientras que una tenacidad alta (K_{Ic} > 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) reducirá la dureza (HV < 1400) y debilitará la resistencia al desgaste. Para equilibrar ambas, es necesario optimizar la microestructura, incluyendo el tamaño de grano de WC (0,2-2 μm) y el contenido de fase aglutinante de Co (6 %-15 %), para satisfacer las necesidades de aplicaciones exigentes como herramientas de aviación (vida útil de corte > 15 horas) y brocas de minería (perforación > 1200 m).

Esta sección analiza el mecanismo de regulación del equilibrio dureza-tenacidad desde tres aspectos: efecto del tamaño de grano (basado en la relación Hall-Petch), optimización del contenido de la fase enlazante de Co y tecnologías avanzadas (como la tecnología de nanocompuestos y el diseño de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estructuras de gradiente). Combina modelos mecánicos (Hall-Petch: $\sigma_y \sim d^{-1/2}$, reforzamiento de Orowan), termodinámica (energía de interfaz $<1,5 \text{ J/m}^2$) y parámetros de proceso (temperatura de sinterización $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$, grado de vacío $<10^{-2} \text{ Pa}$).

7.1.1 Efecto del tamaño del grano (relación Hall-Petch)

7.1.1.1 Efecto del tamaño de grano.

El efecto del tamaño de grano se refiere a los cambios regulares en las propiedades mecánicas (como dureza, resistencia y tenacidad) de materiales como el carburo cementado, con cambios en el tamaño de grano. Según la relación de Hall-Petch, una disminución del tamaño de grano (por ejemplo, de $2 \mu\text{m}$ a $0,5 \mu\text{m}$) aumentará la densidad del límite de grano ($>10^{13} \text{ m}^{-2}$), dificultará el movimiento de dislocación y, por lo tanto, aumentará la dureza (en aproximadamente un 25 %-30 %, como HV de 1200 a 1600) y la resistencia.

Principio y tecnología del efecto del tamaño del grano

El tamaño del grano es un factor clave para regular la dureza y tenacidad del carburo cementado, siguiendo la relación Hall-Petch ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$, donde σ_y es el límite elástico, d es el tamaño del grano y k es aproximadamente $0,3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Reducir el tamaño del grano WC ($0,2\text{-}2 \mu\text{m}$) puede aumentar significativamente la dureza (HV 1200-1800) y la resistencia a la compresión ($>4000 \text{ MPa}$). Por ejemplo, después de refinar el tamaño del grano de $2 \mu\text{m}$ a $0,5 \mu\text{m}$, la dureza aumenta de HV 1200 a HV 1600 y la vida útil de corte de las herramientas de aviación aumenta de 12 horas a 15 horas. Sin embargo, los granos demasiado pequeños ($<0,2 \mu\text{m}$) pueden inducir microfisuras debido al deslizamiento del límite de grano (velocidad de $\sim 10^{-9} \text{ m/s}$), lo que resulta en una disminución de la tenacidad ($K_{IC} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Por lo tanto, optimizar el tamaño de grano requiere un equilibrio entre el refuerzo del límite de grano y la estabilidad de la interfaz.

El tamaño del grano se regula mediante molienda de bolas de alta energía (velocidad $300\text{-}500 \text{ rpm}$, tiempo $20\text{-}40$ horas), añadiendo inhibidores de grano (como VC $0,2\%\text{-}0,5\%$, Cr_3C_2 $0,1\%\text{-}0,3\%$) y optimizando el proceso de sinterización (temperatura $1400\text{-}1500^\circ\text{C}$, grado de vacío $<10^{-2} \text{ Pa}$). En los últimos años, los carburos cementados de grano ultrafino ($<0,5 \mu\text{m}$) y nanocristalinos ($<100 \text{ nm}$) se han convertido en un foco de investigación, y su dureza puede alcanzar HV 2000, pero el problema de la estabilidad del límite de nanogranos necesita ser resuelto (tasa de migración del límite de grano $<10^{-10} \text{ m/s}$).

7.1.1.2 Mecanismo de Hall-Petch y análisis mecánico

¿Qué es la relación Hall-Petch ?

La relación de Hall-Petch es un principio fundamental muy importante en la ciencia de los materiales, que describe la relación entre el tamaño de grano de un material policristalino y su límite elástico. Esta relación fue descubierta y formulada independientemente por EO Hall (1951) y NJ Petch (1953), por lo que recibe su nombre en honor a ellos. En términos simples, en la relación de Hall-Petch :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cuanto más finos sean los granos, mayor será la resistencia (especialmente el límite elástico) del material.

Esta relación se puede expresar matemáticamente de la siguiente manera:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$$

en:

σ_y : **Resistencia a la fluencia** del material.

σ_0 : representa la resistencia al rendimiento del material **monocristalino**, de **manera** más general, la resistencia al movimiento de dislocación dentro del grano (tensión de fricción reticular).

k: **La pendiente de Hall-Petch** es una **constante** cuyo valor depende del propio material (como la estructura cristalina y las características de las dislocaciones) y de las propiedades del límite de grano (como la energía y la resistencia al deslizamiento del límite de grano). Cuanto mayor sea el valor k, mayor será el efecto de refuerzo del límite de grano.

d: **diámetro medio de grano** del material.

Mecanismo físico central: los límites de grano obstaculizan el movimiento de dislocación

Dislocación y deformación plástica

La deformación plástica de los materiales metálicos se logra principalmente a través del deslizamiento de dislocaciones (defectos lineales en los cristales) dentro de los granos.

Los límites de grano como barreras

Los límites de grano son interfaces entre granos adyacentes. Debido a las diferentes orientaciones cristalinas de los granos adyacentes, es difícil que las dislocaciones se deslicen directamente de un grano al grano adyacente a través del límite de grano.

Acumulación de dislocaciones

Bajo la acción de la tensión externa, se activan las fuentes de dislocación y se generan dislocaciones. Estas dislocaciones se desplazan a lo largo del plano de deslizamiento hasta que son bloqueadas por el límite de grano, formando una acumulación de dislocaciones frente a este.

Concentración de tensiones y activación de fuentes de dislocación en granos adyacentes

Los grupos de dislocación acumulados producirán una gran concentración de tensión local en el límite de grano. Cuando esta tensión concentrada alcanza la tensión necesaria para activar la fuente de dislocación en el grano adyacente, la deformación plástica puede propagarse al siguiente grano y el material cede a gran escala.

Refinamiento de grano

Cuanto más finos sean los granos (menor es d), mayor será el área del límite de grano por unidad de volumen y menor será la trayectoria libre media de deslizamiento de las dislocaciones. Las dislocaciones encontrarán obstáculos en el límite de grano a menor distancia, y se requiere una mayor tensión externa para formar un grupo de acumulación de dislocaciones suficientemente fuerte en los granos (lo que genera una concentración de tensión suficientemente alta) como para activar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la fuente de dislocación de los granos adyacentes. Por lo tanto, el límite elástico σ_y y del material aumenta con la disminución del tamaño de grano d .

Importancia de la relación Hall-Petch

Uno de los mecanismos de refuerzo más importantes

El refinamiento de grano es uno de los métodos más eficaces y comúnmente utilizados para mejorar la resistencia de los materiales metálicos y, por lo general, no reduce significativamente la tenacidad del material (incluso puede mejorar la tenacidad, que es donde es superior a otros mecanismos de fortalecimiento, como el fortalecimiento por solución sólida y el fortalecimiento por precipitación).

Diseño de material de orientación

Proporciona una base teórica y herramientas cuantitativas para optimizar las propiedades mecánicas de los materiales mediante el control de su microestructura (especialmente el tamaño de grano). Uno de los objetivos principales de los procesos metalúrgicos (como el laminado controlado, el tratamiento térmico, etc.) es el refinamiento de los granos.

Entendiendo el efecto del tamaño

Explica por qué los materiales nanocristalinos tienen una resistencia extremadamente alta.

La relación Hall-Petch es **muy válida en el rango de tamaño de grano desde micrómetro hasta submicrómetro**. (generalmente de $1\ \mu\text{m}$ a $0,1\ \mu\text{m}$). Cuando el tamaño de grano disminuye a **escala nanométrica** ($<100\ \text{nm}$), otros mecanismos (como el deslizamiento de los límites de grano, la absorción o emisión de dislocaciones en los límites de grano) pueden volverse dominantes, y en ocasiones incluso se observa el "efecto Hall-Petch inverso", es decir, la intensidad disminuye a medida que se reduce aún más el tamaño de grano.

El tipo de material se aplica principalmente a **metales y aleaciones**. Se observan relaciones similares en la cerámica y algunos polímeros, pero los mecanismos de refuerzo pueden ser diferentes.

La relación Hall-Petch muestra que cuanto menor sea el tamaño de grano, mayor será la densidad del límite de grano ($>10^{13}\ \text{m}^{-2}$), se obstaculiza el movimiento de dislocación y la resistencia y dureza mejoran significativamente. La dureza (HV) es aproximadamente proporcional al límite elástico ($\text{HV} \sim 3\sigma_y$). Cuando el tamaño de grano disminuye de $2\ \mu\text{m}$ a $0,5\ \mu\text{m}$, la dureza aumenta en aproximadamente un 25%-30% (de HV 1200 a 1600). Sin embargo, si el tamaño de grano es demasiado pequeño ($<0,2\ \mu\text{m}$), el deslizamiento del límite de grano se intensifica, lo que resulta en una disminución de la tenacidad (K_{IC} cae de $12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $<8\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). El mecanismo se basa en el fortalecimiento de los límites de grano y la mecánica de fracturas: los límites de grano mejoran el rendimiento fijando dislocaciones (fortalecimiento de Orowan, $\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1\ \mu\text{m}$), pero la alta densidad de límites de grano aumenta la energía interfacial ($>1,5\ \text{J/m}^2$) e induce fácilmente microfisuras (longitud $0,05\text{-}0,1\ \mu\text{m}$).

El análisis de la dinámica del límite de grano muestra que la tasa de migración del límite de grano

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(10^{-10} m/s) está controlada por la temperatura de sinterización (1400-1500 °C) y los aditivos (VC 0,2%-0,5%), y la barrera de migración es de 80-120 kJ/mol. La estabilidad termodinámica del WC de grano fino se evalúa mediante la energía libre de Gibbs ($\Delta G < 0$). Cuando el tamaño de grano es $< 0,5 \mu\text{m}$, la energía de la interfaz domina el cambio de rendimiento. Por ejemplo, WC-10Co (grano de $0,5 \mu\text{m}$) tiene una dureza de HV 1600 y una K_{1c} de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, que es adecuada para el corte de alta velocidad ($> 800 \text{ m/min}$).

7.1.1.3 Análisis de los factores que afectan el efecto del tamaño de grano

El efecto del tamaño de grano se ve afectado por los siguientes factores:

Tamaño inicial de partícula de polvo

El tamaño de partícula del polvo WC es de $0,5$ a $1 \mu\text{m}$ para garantizar un refinamiento uniforme; si es $> 2 \mu\text{m}$, la dureza es < 1400 ; si es $< 0,2 \mu\text{m}$, la tasa de aglomeración es $> 15\%$.

Tiempo de molienda de bolas

La molienda de bolas durante 20 a 40 horas (velocidad de rotación 300-500 rpm) puede refinar los granos a $0,5 \mu\text{m}$; si son < 15 horas, el tamaño del grano es $> 1 \mu\text{m}$; si son > 50 horas, la tasa de rotura del grano es $> 3\%$.

Temperatura de sinterización

$1400-1500 \text{ }^\circ\text{C}$ pueden controlar el crecimiento del grano ($< 0,8 \mu\text{m}$); si es $> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$, el tamaño del grano es $> 2 \mu\text{m}$ y la dureza disminuye entre un 10% y un 15% .

aditivo

La adición de VC del $0,2\%$ al $0,5\%$ puede inhibir el crecimiento del grano ($< 0,5 \mu\text{m}$) y aumentar la dureza entre un 5% y un 10% . Si es $> 0,8\%$, se forma una fase frágil, lo que resulta en una $K_{1c} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Contenido conjunto

Un contenido de Co del $8\%-12\%$ puede equilibrar la tenacidad; si $< 6\%$, $K_{1c} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$; si $> 15\%$, dureza < 1200 .

Atmósfera de sinterización: Un grado de vacío $< 10^{-2} \text{ Pa}$ puede evitar la oxidación (contenido de $\text{O}_2 < 0,5 \text{ ppm}$); el uso de una atmósfera de Ar (pureza $> 99,99\%$) puede reducir los defectos en los límites de grano ($< 0,2\%$).

Tasa de enfriamiento

Controlar la velocidad de enfriamiento a $3-5 \text{ }^\circ\text{C/min}$ puede reducir el estrés térmico ($< 100 \text{ MPa}$); si es $> 10 \text{ }^\circ\text{C/min}$, la tasa de microfisuras es $> 0,5\%$.

Ventajas, desventajas y requisitos técnicos de la relación Hall-Petch

El refinamiento del grano mejora significativamente la dureza y la resistencia (HV 1600, $\sigma > 4500$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta carga (como herramientas de aviación). Los granos demasiado pequeños ($<0,2 \mu\text{m}$) darán lugar a una menor tenacidad ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y el coste de preparación del WC nanocristalino será mayor (un aumento de alrededor del 20%-25%).

Condiciones técnicas de la relación Hall-Petch

Se requieren equipos de molienda de bolas de alta precisión (precisión de velocidad $\pm 5 \text{ rpm}$), monitoreo de grano en línea (desviación $<0,02 \mu\text{m}$) y horno de sinterización de alta temperatura y alta presión (desviación de temperatura $<\pm 10^\circ\text{C}$, desviación de presión $<\pm 10^{-3} \text{ Pa}$).

Estrategia de optimización

para la relación Hall-Petch Para lograr una dureza alta (HV 1600) y una tenacidad moderada ($K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), se recomienda la siguiente estrategia:

Seleccione polvo de WC con un tamaño de partícula de $0,5-1 \mu\text{m}$ y realice una molienda de bolas de alta energía durante 20 a 40 horas (velocidad de rotación 300-500 rpm).

La temperatura de sinterización se controla a $1400-1500^\circ\text{C}$, el grado de vacío es $<10^{-2} \text{ Pa}$ y el tamaño de grano es $<0,8 \mu\text{m}$.

La adición de 0,2%-0,5% de VC puede inhibir el crecimiento del grano y aumentar la dureza entre un 5% y un 10%.

El contenido de Co se establece entre el 8% y el 12% para garantizar que $K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ con monitoreo de tamaño de partícula en línea (desviación $<0,02 \mu\text{m}$).

El tamaño del grano se verificó mediante análisis TEM (resolución $<0,1 \text{ nm}$) y la tensión del límite del grano ($<100 \text{ MPa}$) se evaluó mediante XRD (desviación del ancho de pico $<0,2^\circ$).

Tecnología avanzada: Pruebe la tecnología nanocompuesta para formar una estructura de modo dual (distribución del tamaño de grano: $0,2 \mu\text{m}$ y $1 \mu\text{m}$) agregando nanopartículas WC ($<50 \text{ nm}$), la dureza aumenta a HV 1800 y el K_{Ic} alcanza $13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Práctica de aplicación de la ingeniería de la relación Hall-Petch

El carburo cementado de grano fino funciona bien en una variedad de escenarios:

herramientas de aviación

de grano $0,5 \mu\text{m}$, dureza HV 1600) tiene una vida útil de 15 horas y una mejora del rendimiento del 25% en el corte a alta velocidad ($>800 \text{ m/min}$).

brocas para minería

WC-8Co (tamaño de grano $0,8 \mu\text{m}$, $K_{Ic} > 13 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) tiene una vida útil de 1.200 m en perforación de roca dura, un aumento del 40 %.

Molde resistente al desgaste

WC-12Co (tamaño de grano $0,5 \mu\text{m}$, dureza HV 1600), vida útil $>10^6$ veces en extrusión.

Álabes de turbinas de aviación

de grano $0,4 \mu\text{m}$, VC 0,3%), dureza HV 1700, $K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, en corte a alta temperatura ($>800^\circ\text{C}$, velocidad $>250 \text{ m/s}$), la vida útil alcanza las 20 horas, un aumento del 30%.

Molde de batería de nueva energía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de grano $0,3\ \mu\text{m}$, dureza HV 1800), en extrusión de alta frecuencia ($>500\ \text{Hz}$), vida útil $>10^6$ veces, un aumento del 50

7.1.2 Optimización del contenido de la fase de unión de carburo cementado

Relación entre el tipo, el contenido y la tenacidad de la fase de unión del carburo cementado

La tenacidad del carburo cementado (representado por WC-Co) está estrechamente relacionada con el tipo y el contenido de la fase aglutinante y la estructura de la fase dura. La optimización del contenido de la fase aglutinante (especialmente el contenido de cobalto) es fundamental para equilibrar la dureza y la tenacidad del material, y su rango de control típico se sitúa entre el 6 % y el 15 %. A continuación, se presenta un análisis sistemático:

7.1.2.1 El papel central de la fase de vinculación y la reglamentación técnica

El rendimiento del carburo cementado está determinado por la fase dura (carburos como WC) y la fase de unión del metal (principalmente Co).

Funciones principales de Co:

Portador de deformación plástica: Cuando la grieta se propaga (la velocidad de deformación es de aproximadamente $10^{-3}\ \text{s}^{-1}$), absorbe energía a través de la deformación plástica y contribuye directamente a la tenacidad (K_{1c} 8-16 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Interfaz de unión: Excelente mojabilidad al WC (ángulo de contacto $<15^\circ$, energía de interfaz $<1,5\ \text{J/m}^2$), formando una interfaz de unión de alta resistencia ($>50\ \text{MPa}$).

Coordinador de tensiones: alivia la concentración de tensiones entre las partículas de WC y evita la fractura frágil.

Principio técnico de optimización de contenido

El contenido debe controlarse con precisión dentro del rango del 6% al 15%.

Bajo Co ($<6\%$): La dureza mejora significativamente (HV >1600), pero la tenacidad disminuye drásticamente ($K_{1c} < 10\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y es propenso a producirse fractura frágil.

Alto Co ($>15\%$): Mayor tenacidad ($K_{1c} > 14\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), pero dureza insuficiente (HV <1200) y fácil formación de un depósito de Co (tamaño $>5\ \mu\text{m}$), lo que resulta en una disminución del 10%-15% en la resistencia.

Punto de equilibrio óptimo (8%-12%): Lograr sinergia entre dureza HV 1500 y tenacidad K_{1c} 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ para cumplir con escenarios de alta demanda como herramientas de aviación.

Tecnología de implementación:

Control de la uniformidad de la distribución de Co (desviación $<0,5\ \%$) mediante la relación de polvo de Co de alta pureza ($>99,9\ \%$) $\rightarrow$ prensado isostático en frío (CIP, 200-300 MPa) $\rightarrow$ sinterización en fase líquida (1400-1500 $^\circ\text{C}$, 1-3 horas). La tecnología más innovadora de los últimos años es el diseño de estructura de gradiente: al regular la velocidad de difusión de Co ($<10^{-9}\ \text{cm}^2/\text{s}$), el contenido superficial de Co se reduce al 6 % (dureza HV 1600) y el contenido interno aumenta al 12 % (tenacidad K_{1c} 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), logrando una superficie dura y una estructura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

interna tenaz.

7.1.2.2 Efecto cuantitativo del contenido de aglutinante sobre la tenacidad

El contenido de Co está correlacionado positivamente con la tenacidad, pero debe evitarse el punto de inflexión del rendimiento:

Mecanismo de mejora de la tenacidad: aumento del contenido de Co (6%→12%) → engrosamiento de la capa de metal → expansión del

espacio de deformación plástica → la propagación de grietas debe pasar a través de una zona plástica más gruesa, aumentando K_{IC} de $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ($K_{IC} \propto \text{Co}^{1/2}$).

Riesgo de fallo crítico:

Cuando el contenido de Co es $>15\%$, la fracción de volumen de la fase dura es demasiado baja (WC representa $<85\%$) y la dureza cae por debajo de HV 1200;

Cuando la temperatura de sinterización es $>1550^\circ\text{C}$ o la desviación de la distribución de Co es $>1\%$, se forma un depósito de Co ($>5 \mu\text{m}$), que se convierte en la fuente de grietas y la tenacidad disminuye entre un 10% y un 15%.

Soporte de modelo mecánico:

Modelo de Voigt de materiales compuestos:

$$E = V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$$

Propiedades cuantitativas: Dureza teórica de la aleación WC-10Co HV 1500, $K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

7.1.2.3 Relación jerárquica entre el tipo de fase de enlace y la tenacidad

Cobalto (Co) - El estándar de oro:

La alta energía de dislocación proporciona una excelente capacidad de deslizamiento por dislocación, un efecto de endurecimiento por trabajo significativo y el sistema WC-Co tiene la mejor tenacidad.

Aleaciones a base de níquel (Ni): alternativas resistentes a la corrosión:

Se utiliza en TiC - Ni - Mo, Cr_3C_2 - NiCr y otros sistemas, pero está limitado por el esqueleto de carburo, la tenacidad es significativamente menor que la de WC-Co con el mismo contenido (como la aleación a base de TiC K_{IC} suele ser $<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Deficiencia de tenacidad de los sistemas especiales:

Aunque las aleaciones basadas en carburos metálicos (como los esqueletos continuos de TiC y Cr_3C_2) pueden mejorar la tenacidad hasta cierto punto al aumentar el contenido de Ni, están limitadas esencialmente por:

Fragilidad intrínseca de los carburos;

La plasticidad de la fase metálica está limitada por el esqueleto;

La fuerza de unión de la interfaz es más débil que la de Co-WC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1.2.4 Estrategia de optimización colaborativa y de equilibrio fuerte

Naturaleza contradictoria

Contenido de CO↑ → tenacidad↑↑ pero dureza↓↓. Los materiales homogéneos tradicionales tienen dificultades para cumplir con requisitos extremos.

Camino de avance

Refinamiento de grano:

Controlar el tamaño de partícula de WC a 0,5-1 μm (si >2 μm , K_{1c} disminuye entre un 5% y un 10% y se utiliza un refuerzo de grano fino para mejorar tanto la resistencia como la tenacidad.

Diseño de estructura de gradiente:

Bajo Co (6%) en la superficie: logra alta dureza (HV 1600) y resiste el desgaste;
de Co (12%): garantiza una alta tenacidad (K_{1c} 14 MPa ·m^{1/2}) , y resistencia a la fractura por impacto;

Tecnología clave: Agregar 0,2%-0,5% de VC para inhibir la difusión de Co, combinado con sinterización en capas para controlar el gradiente de composición.

Control de precisión de procesos:

Sinterización: 1400-1500 °C/grado de vacío <10⁻² Pa, tiempo 1-3 horas (si >4 horas, tasa de segregación de Co >1%);

Moldeo: Presión CIP 200-300 MPa, garantizar una densidad > 99% (si < 150 MPa, porosidad > 1%);

Inspección de calidad: Se utilizó EDS/EBSD (resolución <0,5 μm) para analizar la distribución de Co, con una desviación de <0,5%.

7.1.2.5 Verificación de prácticas de ingeniería

El diseño optimizado de la fase de unión funciona bien en condiciones de trabajo extremas:

Escenario de aplicación	Sistema material	Parámetros de rendimiento	Mejora de la esperanza de vida
Herramientas de acabado para aviación	WC-10Co (0,5 μm)	HV 1500, K _{1c} 12 MPa·m ^{1/2}	>15 horas (+25%)
Taladro de aguas profundas	Gradiente WC-Co (6% en la superficie/12% en el interior)	Tabla HV 1600/K _{1c} interna c 14 MPa·m ^{1/2}	>1500 m (+50%)
Molde de pastillas de freno para rieles de alta velocidad	gradiente de WC-10Co	Fricción a alta temperatura > 600 °C	>4×10 ⁵ veces (+60%)
Broca de impacto para minería	WC-8Co	K _{1c} 13 MPa·m ^{1/2}	>1200 m (+40%)

7.1.2.6 Reconocimiento final

El contenido de Co es el núcleo del control de tenacidad: se optimiza con precisión dentro del rango de 6% - 15%, y 8% - 12% es el punto dorado del equilibrio entre resistencia y tenacidad;

El proceso determina el límite superior de rendimiento:

Basándose en materias primas de alta pureza (Co>99,9%), sinterización de precisión (control de

temperatura $\pm 2^{\circ}\text{C}$) y pruebas no destructivas (desviación de rayos X/EDS $<0,2\%$);

La estructura de gradiente es una tecnología revolucionaria que rompe el equilibrio entre resistencia y tenacidad, pero el costo aumenta entre un 15% y un 20%;

Diseño orientado a aplicaciones:

Escenarios de alta tenacidad (minería, aguas profundas) $\rightarrow$ contenido de Co medio a alto (10%-15%) o diseño de gradiente;

Escenario de alta dureza (acabado) $\rightarrow$ bajo Co (6%-8%) + WC de grano fino ($0,5\ \mu\text{m}$) + aditivos VC;

Resistencia a la corrosión/escenario de alta temperatura $\rightarrow$ Las aleaciones de fase de unión a base de níquel requieren un compromiso en la tenacidad.

La tenacidad del carburo cementado se debe esencialmente al efecto sinérgico del contenido, tipo y microestructura de la fase aglutinante. Gracias a la optimización científica del contenido de Co (6%-15%), un diseño innovador en gradientes y un control preciso del proceso, puede superar los límites tradicionales de rendimiento y satisfacer las necesidades más exigentes, desde el corte micrométrico hasta la perforación kilométrica.

7.2 Resistencia a la fatiga y al impacto del carburo cementado

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga del carburo cementado (WC-Co) se refiere a su capacidad para resistir la iniciación y expansión de grietas por fatiga bajo cargas cíclicas, lo que refleja la durabilidad del material en uso a largo plazo. Se basa principalmente en la optimización de la microestructura (como el tamaño de grano de $0,5\text{-}1\ \mu\text{m}$) para reducir la tasa de crecimiento de grietas, el contenido moderado de Co (8%-12%) proporciona un amortiguador plástico y el fortalecimiento del límite de grano dificulta el crecimiento de grietas. Métodos de medición como la prueba de fatiga por flexión rotatoria (ASTM E466) pueden evaluar su vida útil por fatiga.

al impacto

es la capacidad del carburo cementado para resistir la fractura bajo cargas de impacto de alta energía, lo que refleja su fiabilidad bajo cargas dinámicas. Se basa en un alto contenido de Co (10-15 %) para absorber la energía del impacto, un tamaño de grano moderado ($0,5\text{-}1\ \mu\text{m}$) para equilibrar la tenacidad y la resistencia, y aditivos (como el TaC) para reforzar los límites de grano. La prueba de impacto Charpy (ASTM E23) es un método de medición común.

La resistencia a la fatiga se centra en la uniformidad de la microestructura y la resistencia a la propagación de grietas, mientras que la resistencia al impacto depende más de la absorción de energía plástica de la fase Co. Ambas deben equilibrarse mediante la optimización de la microestructura para cumplir con los requisitos de diferentes condiciones de trabajo.

La resistencia a la fatiga y al impacto del carburo cementado bajo carga cíclica ($>10^5$ veces) y alto impacto ($>500\ \text{Hz}$) determina directamente su confiabilidad en minería (perforación $>1200\ \text{m}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aviación (vida útil de la herramienta >15 horas) y matriz (extrusión >10⁶ veces). La resistencia a la fatiga se caracteriza por la tasa de crecimiento de grietas (da/dN~10⁻⁶ mm/ciclo), y la resistencia al impacto se evalúa por la energía de impacto (10-30 J). La optimización debe comenzar desde la microestructura (tamaño de partícula WC 0,5-2 μm , contenido de Co 6%-15%) y las propiedades mecánicas (factor de intensidad de tensión ΔK<25 MPa·m^{1/2}).

Esta sección analiza el mecanismo de regulación de la resistencia a la fatiga y al impacto desde tres perspectivas: propagación de grietas bajo carga cíclica (basada en la ley de Paris), ensayos de tenacidad al impacto (Charpy e Izod) y tecnología de ensayo avanzada (como el ensayo de fatiga SEM in situ). Combinando la mecánica de fractura (ley de Paris: da/ dN = C·ΔK^m), normas experimentales y prácticas de aplicación, esta sección analiza el mecanismo de regulación de la resistencia a la fatiga y al impacto.

7.2.1 Crecimiento de grietas en carburo cementado bajo carga cíclica (ley de Paris)

¿Qué es la Ley de París?

La Ley de Paris es un modelo teórico básico que describe el comportamiento del crecimiento de grietas por fatiga. Se utiliza principalmente para predecir la relación entre la velocidad de crecimiento de grietas y el rango del factor de intensidad de tensión de materiales sometidos a cargas cíclicas. Se utiliza ampliamente en el análisis de fatiga de metales, materiales compuestos y carburos cementados (como el WC-Co).

Expresión de la ley de París

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

en:

$\frac{da}{dN}$: 裂纹扩展速率 (mm/循环), 表示每循环裂纹长度的增量。

ΔK : 应力强度因子范围 (MPa·m^{1/2}), $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$, 其中 $K_{\max}$ 和 $K_{\min}$ 分别为最大和最小应力强度因子。

C 和 m : 材料常数, 依赖于材料类型、微观结构及环境条件。

Para el carburo cementado, mmm generalmente está en el rango de 2 a 4 y CCC es más pequeño (~10⁻¹⁰ a 10⁻⁸).

Ley de París

La ley de París es aplicable a la etapa estable de crecimiento de grietas por fatiga (es decir, etapa II), es decir, la tasa de crecimiento de grietas tiene una relación de ley de potencia con ΔK:

Estadio I (zona umbral): ΔK< ΔK_{th} (umbral), la grieta no se extiende.

Etapa II (zona de extensión estable): La grieta se extiende según la ley de París.

Etapa III (zona de fractura rápida): ΔK→K_c (tenacidad a la fractura), inestabilidad de la grieta.

Aplicación de la Ley de París en el carburo cementado

La resistencia a la fatiga del carburo cementado (WC-Co) se puede analizar mediante la ley de París:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Micromecanismo : La propagación de grietas se ve afectada por los límites de grano de WC y la fase de Co, y la desviación del límite de grano y la energía de absorción plástica de Co reducen d_a / d_N .

Factores que afectan la ley de París

Contenido de Co: Un mayor contenido de Co (10%-15%) aumenta la plasticidad y reduce mmm.

Tamaño de grano: Los granos moderados (0,5-1 μm) reducen d_a / d_N a través del fortalecimiento de los límites de grano.

Medio ambiente: Los entornos corrosivos (por ejemplo, $\text{pH} < 5$) pueden aumentar el CCC.

Medición: Mediante ensayo de crecimiento de grietas (ASTM E647), registrar la relación d_a / d_N con ΔK , ajustando CCC y mmm.

significado

La ley de Paris proporciona una base teórica para predecir la vida útil a la fatiga del carburo cementado. Permite optimizar la microestructura (como el tamaño de grano y el contenido de Co) y prolongar la vida útil a la fatiga. Es adecuada para escenarios de carga de alto ciclo, como herramientas de aviación y brocas de minería.

Principio de la ley de París y descripción técnica

La resistencia a la fatiga se caracteriza por la tasa de crecimiento de grietas (da / dN , unidad: mm/ciclo), que sigue la ley de París: $da / dN = C \cdot \Delta K^m$

m, donde ΔK es la amplitud del factor de intensidad de tensión ($10^{-25} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), C es $10^{-9} - 10^{-10}$ y m es 3-4.

Bajo carga cíclica (relación de tensiones $R = 0,1$, frecuencia de 5 a 15 Hz), la velocidad de crecimiento de grietas del carburo cementado debe controlarse a $< 10^{-6} \text{ mm/ciclo}$ para garantizar una vida útil de más de 10^5 veces. La optimización se logra mediante el refinamiento del grano (concentración de agua de 0,5 a 1 μm), el contenido de Co (8 %-12 %) y la modificación de la superficie (como la implantación de iones).

de grieta (precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$) bajo flexión en tres puntos (carga de 500-1000 N). En los últimos años, los ensayos de fatiga SEM in situ (resolución $< 0,2 \mu\text{m}$) se han convertido en un foco de investigación clave, ya que permiten observar las trayectorias de propagación de grietas (relación transgranular /intergranular $< 30 \%$) y defectos microscópicos (tamaño de poro $< 2 \mu\text{m}$) en tiempo real.

Ley de Paris - Mecanismo y análisis mecánico

La Ley de Paris describe el comportamiento del crecimiento constante de grietas (etapa II):

Cálculo de ΔK : $\Delta K = \Delta \sigma \cdot \sqrt{(\pi a)}$, donde $\Delta \sigma$ es la amplitud de la tensión y a es la longitud de la grieta ($\sim 0,1-0,5 \text{ mm}$). Cuando $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, $d_a / d_N < 10^{-7} \text{ mm/ciclo}$.

Parámetros C y m: C es $10^{-9} - 10^{-10}$, m es 3,2-3,8, lo que refleja la resistencia al agrietamiento del material. Cuando el contenido de Co es del 10 %, C disminuye entre un 15 % y un 20 %.

Micromecanismo : La fase Co disipa la energía de la grieta a través de la deformación plástica (deformación $\sim 0,05\%-0,1\%$) y el límite de grano WC (0,5 μm) dificulta la propagación de la grieta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(velocidad $<10^{-6}$ mm/ciclo).

Fatiga por alta temperatura: a 800 °C, la tasa de crecimiento de grietas es $<10^{-5}$ mm/ciclo y la capa de óxido (WO_3 , espesor $\sim 2 \mu m$) puede reducir da/dN en aproximadamente un 5%-10%.

El análisis SEM in situ muestra que la trayectoria de propagación de grietas es principalmente transgranular (ratio $> 50\%$), y cuando el ángulo de deflexión del límite de grano es de 20° a 40°, la relación d_a/d_N disminuye entre un 10 % y un 15 %. Por ejemplo, la velocidad de crecimiento de grietas del WC-10Co ($\Delta K = 15 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$) es de aproximadamente 10^{-7} mm/ciclo, lo que cumple con los requisitos de las herramientas de aviación.

Análisis de los factores que afectan la propagación de grietas

La propagación de grietas se ve afectada por los siguientes factores:

Tamaño de grano: 0,5-1 μm puede reducir da/dN ($<10^{-7}$ mm / ciclo); si $>2 \mu m$, $da/dN >10^{-6}$ mm/ciclo.

Contenido de Co: 10% puede optimizar K_{Ic} ($>12 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$); si $<6\%$, da/dN aumenta en un 20%-30%.

Relación de tensiones: Cuando $R=0,1$, $da/dN <10^{-7}$ mm/ciclo; si $R>0,5$, da/dN aumenta en un 40%-50%.

Aditivos: La adición de VC de 0,2%-0,5% puede mejorar la resistencia del límite de grano ($>150 \text{ MPa}$); si es $>0,8\%$, la relación de fase frágil es $>0,5\%$.

Cuando $Ra<0,1 \mu m$, el tiempo de iniciación de la grieta es $>10^4$ veces; si $>0,2 \mu m$, la vida útil disminuye entre un 15% y un 20%.

Microdefectos: Cuando la porosidad es $<1\%$, $da/dN <10^{-7}$ mm/ciclo; si $>2\%$, da/dN aumenta en un 30%-40%.

Humedad ambiente: Cuando la humedad relativa es $<50\%$, $da/dN <10^{-7}$ mm/ciclo; si es $>80\%$, la fatiga por corrosión hace que da/dN aumente entre un 20% y un 25%.

El carburo cementado presenta una excelente resistencia a la fatiga (vida útil $>10^5$ veces) y es adecuado para cargas cíclicas de alta frecuencia (como brocas de minería). En un entorno corrosivo (humedad $>80\%$), la vida útil por fatiga disminuye entre un 15% y un 20%, por lo que se requieren recubrimientos superficiales (como TiN, espesor de 1-3 μm) para mejorar la resistencia a la corrosión. Se requiere un comprobador de fatiga de alta precisión (desviación de frecuencia $<0,2 \text{ Hz}$), un microscopio electrónico de barrido (MEB) in situ (resolución $<0,2 \mu m$) y una caja de control ambiental (precisión de humedad $\pm 2\%$).

Estrategia de optimización de la Ley de París

Para reducir la tasa de crecimiento de grietas ($<10^{-7}$ mm/ciclo), se recomiendan las siguientes estrategias:

El tamaño de grano de WC se selecciona entre 0,5 y 1 μm y el contenido de Co es del 10%.

Agregar entre un 0,2 % y un 0,5 % de VC puede mejorar la resistencia del límite del grano y reducir da/dN en aproximadamente un 15 % y un 20 %.

La superficie está pulida a $Ra<0,1 \mu m$ y el tiempo de iniciación de grietas es $>10^4$ veces.

Controlar la relación de tensiones $R=0,1$ para garantizar $\Delta K < 20 \text{ MPa} \cdot m^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dN < 5 %), se utiliza el monitoreo de grietas en línea (precisión $\pm 0,02$ mm) .

Densidad sinterizada >99,5%, porosidad <1%, combinado con máquina de prueba de fatiga (desviación de frecuencia <0,2 Hz).

Tecnología avanzada: La aplicación de un recubrimiento de TiN (espesor 1-3 μm , dureza HV 2500-3000) reduce los efectos de la fatiga por corrosión y reduce da/ dN en un 10%-15%.

El rendimiento del carburo cementado resistente a la fatiga después de la optimización **en la aplicación de ingeniería de la Ley de París es excelente:**

Broca minera: WC-10Co (tasa de crecimiento de grietas $\sim 10^{-7}$ mm/ciclo), vida útil $> 10^5$ veces en impacto cíclico, distancia de perforación >1200 m.

Herramientas de aviación: WC-8Co ($K_{1c} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , vida útil por fatiga $> 10^5$ veces, vida útil de corte > 15 horas.

Molde resistente al desgaste: WC-12Co ($\Delta K < 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , tiempos de extrusión $> 10^6$ veces, aumentado en un 25%.

Engranajes ferroviarios de alta velocidad: WC-10Co (tamaño de grano 0,5 μm , Recubrimiento de TiN de 2 μm) , en ciclos de alta frecuencia (> 100 Hz), la tasa de crecimiento de grietas es de $\sim 10^{-8}$ mm/ciclo y la vida útil es $> 10^6$ veces, un aumento del 40% .

7.2.2 Ensayo de tenacidad al impacto del carburo cementado (Charpy e Izod)

Descripción general del principio y la tecnología de la prueba de tenacidad al impacto de carburo cementado

La tenacidad al impacto es la capacidad de una aleación dura (WC-Co) para resistir la fractura bajo cargas de impacto de alta energía y es un indicador clave de su fiabilidad en entornos de carga dinámica (como impactos de alta frecuencia o cargas transitorias). La tenacidad al impacto se caracteriza por la capacidad de absorber la energía del impacto, generalmente expresada en energía de impacto (unidad: J), que se determina principalmente por la capacidad de deformación plástica de la fase aglutinante cobalto (Co) y la dureza de la fase dura carburo de tungsteno (WC). La prueba de tenacidad al impacto está diseñada para simular condiciones de trabajo reales (como el impacto de alta frecuencia de brocas mineras o la carga dinámica de herramientas de aviación) para evaluar la resistencia a la fractura del material en entornos de alta tensión.

Descripción general del método de ensayo:

La tenacidad al impacto del carburo cementado se mide principalmente mediante dos métodos de ensayo estandarizados: Charpy e Izod. Ambos métodos utilizan un péndulo para impactar la muestra y registrar la energía necesaria para la fractura (trabajo de impacto), pero existen diferencias significativas en el método de fijación de la muestra, el modo de carga y la distribución de la tensión.

Equipo de prueba:

Energía del péndulo: La energía del péndulo del equipamiento estándar es de 300 J.

Velocidad de impacto: 4-5 m/s.

Control ambiental: La temperatura ambiente (20-25 °C) es la condición de prueba estándar. Las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pruebas a baja o alta temperatura requieren dispositivos especiales de control de temperatura.

Pruebas de alta velocidad de deformación:

En los últimos años, las pruebas de alta velocidad de deformación (velocidad de deformación $> 10^3 \text{ s}^{-1}$) se han convertido en un foco de investigación, ya que permiten simular con mayor realismo condiciones de trabajo extremas, como impactos explosivos (velocidad $> 50 \text{ m/s}$) o cortes a alta velocidad. A altas velocidades de deformación, los materiales muestran una mayor sensibilidad a la velocidad de deformación y la tenacidad al impacto puede disminuir, lo que requiere la optimización de la microestructura para mejorar el rendimiento.

Detalles de la prueba de impacto Charpy

Concepto y principio:

El ensayo de impacto Charpy (ASTM E23) es un método clásico de ensayo de tenacidad al impacto. Utiliza un método de carga de flexión de tres puntos para medir la energía necesaria para la fractura mediante el impacto de la muestra con un péndulo. La muestra tiene una sección transversal rectangular, generalmente con una entalla en V para simular los puntos de concentración de tensiones que pueden existir en condiciones reales de trabajo. La energía de impacto refleja la capacidad del material para absorber energía y resistir la propagación de grietas, y es un indicador importante de la resistencia al impacto del carburo cementado.

Muestra y método de carga:

Especificaciones de muestra:

Tamaño estándar: $55 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ (largo $\times$ ancho $\times$ alto).

Tipo de muesca: Muesca en V, profundidad 2 mm, radio inferior de la muesca 0,25 mm, ángulo de muesca 45° .

Efecto de entalla: Se forma una concentración de tensión en la punta de la entalla, lo que induce la iniciación de grietas, lo que facilita la cuantificación de la sensibilidad del material a los defectos.

Método de carga:

La muestra se coloca horizontalmente sobre dos puntos de apoyo y el péndulo cae libremente desde cierta altura, impactando el centro de la muestra (la parte posterior de la entalla) a una velocidad de 4-5 m/s. La muestra se somete a una tensión de flexión en tres puntos, y la grieta comienza en la punta de la entalla y se expande hasta romperse.

Distribución de tensiones:

En el modo de flexión de tres puntos, la tensión de tracción se genera en la entalla de la muestra, la tensión de tracción máxima se concentra en la parte inferior de la entalla y el factor de concentración de tensiones (K_t) es de aproximadamente 2-3. La energía de impacto incluye la energía de iniciación y la energía de extensión de la grieta, siendo esta última la predominante.

Proceso de prueba:

Procesamiento de la muestra: Las muestras se procesan de acuerdo con dimensiones estándar y las muescas se procesan mediante corte con alambre o herramientas especiales para garantizar la precisión del procesamiento ($\pm 0,02 \text{ mm}$).

Control ambiental: La muestra se coloca a una temperatura específica (por ejemplo, temperatura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ambiente 20-25 °C o temperatura baja -40 °C) y se regula en una cámara de control de temperatura. Carga de impacto: suelte el péndulo, impacte la muestra, registre la diferencia de altura de la oscilación del péndulo y calcule el trabajo de impacto:

$$\text{冲击功} = m \cdot g \cdot (h_{\text{初}} - h_{\text{终}})$$

en m es la masa del péndulo, g es la aceleración debida a la gravedad, h inicial y h final son las alturas inicial y final respectivamente .

Características y aplicabilidad:

La prueba Charpy simula el estado de tensión de flexión de tres puntos en condiciones de trabajo reales (como la tensión local cuando la broca impacta la roca).

Es adecuado para evaluar la resistencia a la fractura del carburo cementado en entornos de alto impacto, especialmente el rendimiento de tenacidad en presencia de defectos (muescas).

Los resultados de la prueba se ven afectados en gran medida por la geometría de la muesca, el tamaño de la muestra y la temperatura, y las condiciones experimentales deben controlarse estrictamente.

Detalles de la prueba de impacto Izod

Concepto y principio:

La prueba de impacto Izod (ASTM E23) es otro método estandarizado de prueba de tenacidad al impacto. Utiliza la carga de una viga en voladizo para medir la energía necesaria para la fractura mediante el impacto del extremo libre de la muestra con un péndulo. Generalmente, se entalla la muestra para evaluar la resistencia del material a la concentración de tensiones y la propagación de grietas. En comparación con la prueba Charpy, el modo de fuerza de la prueba Izod se asemeja más a algunas condiciones de trabajo reales (como el impacto de una estructura en voladizo).

Muestra y método de carga:

Especificaciones de muestra:

Tamaño estándar: 75 × 10 × 10 mm (largo × ancho × alto).

Tipo de muesca: Muesca en V, profundidad 2 mm, radio inferior de la muesca 0,25 mm, ángulo de muesca 45°.

Posición de la muesca: La muesca está ubicada cerca del extremo fijo de la muestra, a unos 22 mm del extremo de sujeción.

Método de carga:

Un extremo de la muestra se fija al soporte y el otro se suspende para formar una estructura de viga en voladizo. El péndulo golpea el extremo libre de la muestra (la parte posterior de la entalla) a una velocidad de 4-5 m/s. La muestra se somete a una tensión compuesta de flexión y cizallamiento. La grieta se origina en la punta de la entalla y se expande hasta romperse.

Distribución de tensiones:

En el modo de viga en voladizo, la entalla produce una superposición de tensiones de tracción y de cizallamiento. La tensión de tracción máxima se encuentra en la parte inferior de la entalla, y la tensión de cizallamiento se distribuye a lo largo del espesor de la muestra. El factor de concentración de tensiones (K_t) es de aproximadamente 2,5-3,5, ligeramente superior al del ensayo Charpy. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

trayectoria de propagación de la grieta se ve afectada por la tensión de cizallamiento y puede propagarse a lo largo de la interfaz WC-Co o a través de la fibra.

Proceso de prueba:

Procesamiento de muestras: Las muestras se procesan de acuerdo con dimensiones estándar y la precisión del procesamiento de muescas se controla dentro de $\pm 0,02$ mm.

Sujeción de la muestra: La muestra se fija en el dispositivo, garantizando que el extremo de sujeción no se deslice ni se afloje.

Carga de impacto: se suelta el péndulo para impactar el extremo libre de la muestra, se registra la diferencia de altura del péndulo y se calcula la energía de impacto (la fórmula es la misma que la de la prueba Charpy).

Características y aplicabilidad:

La prueba Izod simula las condiciones de tensión de una estructura de viga en voladizo (por ejemplo, un componente de una máquina sometido a un impacto lateral).

Es adecuado para evaluar la resistencia al impacto del carburo cementado bajo estados de tensión complejos, especialmente en escenarios donde domina la tensión cortante.

Debido al complejo método de fijación de la muestra y a la distribución de la tensión, los resultados de la prueba pueden ser ligeramente inferiores a los de la prueba Charpy y son sensibles a las condiciones de sujeción.

Comparación de las pruebas Charpy e Izod

Modo de tensión: La

prueba Charpy es una prueba de flexión de tres puntos, que se ve afectada principalmente por la tensión de tracción; la prueba Izod es una prueba de viga en voladizo, donde la tensión de tracción y la tensión cortante se superponen, y la trayectoria de propagación de grietas es más complicada.

Fijación de la muestra:

Las muestras de prueba Charpy se sostienen en ambos extremos, lo que hace que la fijación sea sencilla; las muestras de prueba Izod se sujetan en un extremo, lo que impone mayores requisitos al accesorio.

Diferencia de energía de impacto:

debido al mayor componente de esfuerzo cortante de la prueba Izod, se disipa más energía de crecimiento de grietas y la energía de impacto suele ser ligeramente inferior a la de la prueba Charpy.

Escenarios de aplicación: La

prueba Charpy es más adecuada para simular impactos simétricos (como cuando una broca golpea de frente); la prueba Izod es más adecuada para simular impactos laterales (como piezas mecánicas en voladizo).

Base teórica y análisis de mecanismos

la mecánica de fracturas. La energía de impacto está relacionada con la tenacidad a la fractura (K_{Ic}), que puede estimarse indirectamente mediante la tasa de liberación de energía (G_c):

$$K_{Ic} \approx \sqrt{E \cdot G_c}$$

donde E es el módulo elástico (aproximadamente 550-650 GPa para WC-Co) y G_c

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

G_c es la energía de fractura (contribuida por la plasticidad de la fase Co y la resistencia al crecimiento de grietas).

Mecanismo de ensayo Charpy:

La muestra se somete a un impacto de flexión en tres puntos, la tensión se concentra en la entalla y la grieta se propaga a lo largo de su punta. El límite de grano de WC (tamaño de grano: 0,5-1 μm) aumenta la resistencia a la propagación al desviar la trayectoria de la grieta (ángulo de deflexión: 20°-40°), y la fase de Co absorbe energía mediante deformación plástica (deformación: 0,05%-0,1%) .

Mecanismo de ensayo Izod:

En el modo de fuerza de viga en voladizo, la trayectoria de propagación de la grieta se ve afectada por la tensión cortante y puede extenderse a lo largo de la interfaz WC-Co o a través de la fibra. La disipación plástica de la fase Co y el efecto de obstrucción del límite de grano WC son similares a los del ensayo Charpy, pero la tensión cortante complica la deflexión de la grieta.

Mecanismo microscópico:

Disipación plástica de la fase Co: La fase Co absorbe la energía del impacto mediante deformación plástica y retrasa la propagación de grietas. Cuando el contenido de Co es del 10 %, la velocidad de deformación es de aproximadamente 10^{-3} s^{-1} y la disipación plástica es significativa.

WC 晶界阻碍: WC 晶界通过 Orowan 强化机制 ($\tau \sim Gb/\lambda$, $\lambda < 1 \mu\text{m}$) 阻碍裂纹扩展, 适中晶粒尺寸 (0.5-1 μm) 效果最佳。

Morfología de la fractura: el análisis SEM muestra que la fractura está compuesta principalmente por hoyuelos (tamaño $< 2 \mu\text{m}$), lo que indica que la fractura plástica es dominante y la deformación plástica de la fase Co es el principal mecanismo de absorción de energía .

Impacto ambiental:

Propiedades a baja temperatura: A -40 °C, la tenacidad de la fase Co disminuye ligeramente, pero el contenido de Co apropiado (10 %) aún mantiene la tenacidad al impacto a través de la disipación plástica.

Alta tasa de deformación: cuando la tasa de deformación es $> 10^3 \text{ s}^{-1}$, la tasa de crecimiento de grietas aumenta (aproximadamente un 15%-20%) porque el material no tiene tiempo para deformarse plásticamente por completo.

Análisis de factores influyentes

La tenacidad al impacto se ve afectada por los siguientes factores:

Co-contenido:

Efecto: El aumento del contenido de Co ($> 10\%$) mejora la tenacidad al impacto debido a su mayor capacidad de deformación plástica.

Mecanismo: Cuando el contenido de Co es $< 6\%$, la fragilidad del material aumenta; cuando es $> 15\%$, la dureza disminuye, lo que afecta la resistencia al desgaste.

Recomendación: Un contenido de Co del 10%-12% es el punto de equilibrio entre tenacidad y dureza.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tamaño del grano:

Función: El tamaño de grano moderado ($0,5-1\ \mu\text{m}$) optimiza la tenacidad al impacto.

Mecanismo: Los granos demasiado finos ($< 0,2\ \mu\text{m}$) reducen la tenacidad debido al aumento de defectos en los límites de grano; los granos demasiado gruesos ($>2\ \mu\text{m}$) reducen la densidad de los límites de grano y reducen la resistencia a la propagación de grietas.

aditivo:

Función: La adición de VC o TaC mejora la tenacidad al impacto.

Mecanismo: El VC ($0,2\%-0,5\%$) inhibe el crecimiento del grano y fortalece los límites del grano; una cantidad excesiva ($>0,8\%$) forma una fase frágil y reduce la tenacidad.

Profundidad de muesca:

Efecto: La profundidad de la entalla aumenta y la concentración de tensión se intensifica.

Mecanismo: Cuando la profundidad de la entalla es $>3\ \text{mm}$, el factor de concentración de tensión aumenta y la tenacidad al impacto disminuye.

Estándar: $2\ \text{mm}$ es la profundidad de prueba estándar.

Densidad sinterizada:

Función: La alta densidad mejora la tenacidad al impacto.

Mecanismo: Cuando la densidad es $<98\%$, la porosidad aumenta ($>2\%$) y los poros se convierten en fuentes de grietas, lo que reduce la tenacidad.

Recomendado: densidad $>99\%$, porosidad $<1\%$.

Temperatura de prueba:

Efecto: La baja temperatura reduce la tenacidad al impacto.

Mecanismo: Cuando la temperatura es inferior a $-60\ ^\circ\text{C}$, la tenacidad de la fase Co disminuye significativamente y la proporción de fractura frágil aumenta.

Tasa de deformación:

Efecto: Una alta tasa de deformación reduce la tenacidad al impacto.

Mecanismo: Cuando la velocidad de deformación es $>10^3\ \text{s}^{-1}$, el material no tiene tiempo suficiente para la deformación plástica y se acelera la propagación de grietas.

Estrategia de optimización

Para mejorar la tenacidad al impacto del carburo cementado, se pueden adoptar las siguientes estrategias:

Optimización de la microestructura:

de $0,5-1\ \mu\text{m}$, equilibrando tenacidad y dureza.

Control de aditivos:

La adición de $0,2\%-0,5\%$ de VC o TaC puede mejorar la resistencia del límite del grano y mejorar la tenacidad al impacto.

Control de procesos:

Densidad sinterizada $>99\%$, porosidad $<1\%$, lograda mediante sinterización al vacío ($1400-1500^\circ\text{C}$, vacío $<10^{-2}\ \text{Pa}$).

Precisión de la prueba:

La precisión de mecanizado de la profundidad de la entalla es de $\pm 0,02\ \text{mm}$ y la desviación de la energía del péndulo es $<0,5\ \text{J}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento mejorado a bajas temperaturas:

La adición de Ni (1%-3%) como fase de unión auxiliar mejora la tenacidad a baja temperatura y mantiene una alta tenacidad al impacto a -60 °C.

Análisis fractográfico:

por SEM (resolución <0,2 μm) . El tamaño del hoyuelo fue <2 μm , lo que indica que la fractura plástica fue dominante.

Práctica de aplicación de la ingeniería

El carburo cementado de alta tenacidad al impacto funciona bien en una variedad de escenarios:

Brocas para minería: WC-10Co (contenido de Co 10%), con microestructura optimizada para cumplir con los requisitos de impacto de alta frecuencia (>500 Hz).

Herramientas de aviación: WC-8Co, adecuadas para carga dinámica en corte de alta velocidad (>800 m/min).

Matriz resistente al desgaste: WC-12Co, soporta estampado de alta frecuencia (>10⁶ veces).

Válvula de aguas profundas: WC-10Co, funciona bien en impactos de alta presión (>80 MPa) en aguas profundas.

Molde de pala de turbina eólica: WC-10Co (Ni 2%), estable a baja temperatura (-60°C) y alta velocidad de deformación (>10³ s⁻¹) .

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

Prueba de tenacidad al impacto de carburo cementado (Charpy e Izod): comparación de tablas

A continuación se presenta una comparación directa de los métodos de prueba de tenacidad al impacto Charpy e Izod en carburo cementado (WC-Co) en forma de tabla, que cubre los conceptos, las especificaciones de la muestra, los métodos de carga, la distribución del estrés, el proceso de prueba, las características y aplicabilidad, los micromecanismos y los factores influyentes.

proyecto	Prueba de impacto Charpy (ASTM E23)	Prueba de impacto Izod (ASTM E23)
concepto principio	Se adopta el método de carga de flexión de tres puntos, y el péndulo impacta la probeta para medir la energía necesaria para la fractura (trabajo de impacto). La probeta cuenta con una entalla en V para simular la concentración de tensiones y evaluar la resistencia a la fractura.	Se adopta el método de carga de viga en voladizo, y el péndulo impacta el extremo libre de la probeta para medir la energía de fractura. Se entalla la probeta para evaluar la resistencia a la concentración de tensiones y la propagación de grietas.
Muestra Especificación	- Dimensiones: 55 × 10 × 10 mm (largo × ancho × alto). - Muesca: en forma de V, profundidad 2 mm, radio inferior 0,25 mm, ángulo 45°.	- Dimensiones: 75 × 10 × 10 mm (largo × ancho × alto). - Muesca: en forma de V, 2 mm de profundidad, radio inferior de 0,25 mm, ángulo de 45°, a unos 22 mm del extremo de sujeción.
carga Forma	La muestra se coloca horizontalmente sobre dos puntos de apoyo y el péndulo golpea el centro de la muestra (la parte posterior de la muesca) a una velocidad de 4-5 m/s, formando una fuerza de flexión de tres puntos.	Un extremo de la muestra se fija al soporte y el otro se suspende formando una viga voladiza. El péndulo golpea el extremo libre de la muestra (la parte posterior de la muesca) a una velocidad de 4-5 m/s.
estrés repartido	La tensión de tracción se genera en la entalla, y la tensión máxima se concentra en la parte inferior de la entalla, con un factor de concentración de tensiones (K_t) de aproximadamente 2-3. La energía de impacto se debe principalmente a la energía de extensión de la grieta.	tensión de tracción y la tensión de corte se superponen en la entalla. La tensión de tracción máxima se localiza en la parte inferior de la entalla, y la tensión de corte se distribuye a lo largo del espesor. El factor de concentración de tensiones (K_t) es de aproximadamente 2,5-3,5.
prueba proceso	1. Procese la muestra y la entalla (precisión ±0,02 mm). 2. Colóquela a una temperatura específica (p. ej., 20-25 °C o -40 °C). 3. Impacte con un péndulo, registre la diferencia de altura y calcule la energía de impacto: Energía de impacto = $m \cdot g \cdot (h_{inicial} - h_{final})$.	1. Procese la muestra y la muesca (precisión ±0,02 mm). 2. Fije un extremo de la muestra para asegurar que no esté suelto. 3. El péndulo golpea el extremo libre, registra la diferencia de altura y calcula la energía de impacto (la fórmula es la misma que la del método Charpy).
Características aplicabilidad	- Simula la tensión de flexión de tres puntos (como el impacto frontal de un taladro). - Adecuado para evaluar la resistencia a la fractura del carburo cementado bajo un impacto simétrico. - Los resultados se ven muy afectados por la geometría de la entalla y la temperatura.	- Simula fuerzas de viga en voladizo (por ejemplo, impacto lateral en piezas mecánicas). - Adecuado para evaluar la resistencia al impacto del carburo cementado bajo estados de tensión complejos. - Los resultados son sensibles a las condiciones de sujeción.
Micro mecanismo	- Disipación plástica de la fase Co: La fase Co absorbe energía a través de la deformación plástica (deformación 0,05%-0,1%), retrasando la propagación de grietas. - Obstáculo del límite de grano WC: La trayectoria de	- Disipación plástica de la fase Co: Similar al Charpy, la fase Co absorbe energía plásticamente. - Obstrucción del límite de grano WC: La trayectoria de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proyecto	Prueba de impacto Charpy (ASTM E23)	Prueba de impacto Izod (ASTM E23)
	grano WC: Los límites de grano (0,5-1 μm) aumentan la la grieta es más complicada y puede extenderse a la resistencia al desviar las grietas (ángulo 20°-40°). - Morfología de largo de la interfaz WC-Co o a través del grano bajo la la fractura: Predominan los hoyuelos (tamaño <2 μm) , lo que influencia del esfuerzo cortante. - Morfología de la indica una fractura plástica.	fractura: Principalmente hoyuelos, pero el esfuerzo cortante puede aumentar la proporción de fractura intergranular.
Influencia factor	- Contenido de Co: 10%-12% equilibra tenacidad y dureza. - - Contenido de Co: igual que Charpy, 10%-12% es Tamaño de grano: 0,5-1 μm es óptimo, demasiado fino o bueno. - Tamaño de grano: 0,5-1 μm es el mejor. - demasiado grueso reduce la tenacidad. - Aditivos: VC (0,2%- Aditivos: VC (0,2%-0,5%) tiene el mismo efecto. - 0,5%) refuerza los límites de grano, excesivo (>0,8%) forma fases Profundidad de entalla: >3 mm reduce la tenacidad. - frágiles. - Profundidad de entalla: >3 mm La concentración de Densidad sinterizada: >99%, porosidad <1%. - tensión se intensifica y reduce la tenacidad. - Densidad Temperatura: <-60 °C reduce la tenacidad. - Velocidad sinterizada: >99%, porosidad <1%. - Temperatura: <-60 °C La de deformación: >10 ³ s ⁻¹ acelera el crecimiento de tenacidad disminuye. - Velocidad de deformación: >10 ³ s ⁻¹ grietas, el efecto es ligeramente mayor que Charpy acelera el crecimiento de grietas (aproximadamente 15%-20%). debido al esfuerzo cortante.	

7.3 Análisis del mecanismo de falla del carburo cementado

El carburo cementado es propenso a fallas por desgaste (tasa de desgaste > 0,1 mm³ / N·m) y desconchado por fractura (longitud de grieta > 0,05 mm) en condiciones de trabajo severas (alta fricción > 800 MPa, impacto > 500 Hz, alta temperatura > 800 ° C) , lo que provoca fallas en herramientas de aviación (vida útil < 10 horas), taladros de minería (perforación < 1000 m) y matrices (extrusión < 10⁶ veces). El análisis del mecanismo de falla revela la causa de la degradación del rendimiento a través del modelo de desgaste (fórmula de Archard), la mecánica de fracturas (factor de concentración de tensión K_t > 1,5) y técnicas de análisis avanzadas (como la microtomografía de rayos X), lo que proporciona una base para la optimización.

Esta sección analiza el mecanismo de falla desde tres perspectivas: falla por desgaste (desgaste abrasivo, desgaste adhesivo), fractura y desconchado (concentración de tensiones y microfisuras) e influencia ambiental (alta temperatura, corrosión). Combina análisis microscópico (MEB , microtomografía de rayos X), modelo mecánico (K_{1c} 10-14 MPa·m^{1/2}) y casos.

7.3.1 Falla por desgaste del carburo cementado (desgaste abrasivo, desgaste adhesivo)

Principio de falla por desgaste y descripción general de la tecnología del carburo cementado La falla por desgaste es la principal forma de falla del carburo cementado, incluido el desgaste abrasivo (corte de partículas duras, tasa de desgaste ~0,1 mm³ / N · m) y el desgaste adhesivo (transferencia de material, profundidad de desgaste >5 μm) . El desgaste abrasivo es común en minería (dureza de roca >800 HV), y el desgaste adhesivo es más común en corte (temperatura >600 °C). Con base en la fórmula de Archard (V = k·F·S /H), la optimización

requiere mejorar la dureza (HV 1500) y la calidad de la superficie ($R_a < 0,1 \mu m$).

Las pruebas de desgaste se basan en un flujo de arena de 200-400 g/min y una carga de 100-150 N. En los últimos años, la microtomografía de rayos X (resolución $< 1 \mu m$) se ha convertido en un foco de investigación, ya que puede reconstruir la morfología de la cicatriz de desgaste en tres dimensiones (ancho de ranura $< 10 \mu m$).

Mecanismo de falla por desgaste y análisis del carburo cementado

Desgaste abrasivo

Las partículas duras (SiO_2 , dureza > 800 HV) cortan el WC (profundidad de $0,5-2 \mu m$), formando ranuras (ancho de $5-15 \mu m$). Con una dureza de HV 1500, la tasa de desgaste es $< 0,1 mm^3/N \cdot m$; con una dureza < 1200 , la tasa de desgaste aumenta entre un 20 % y un 30 %.

Desgaste del adhesivo

A altas temperaturas ($> 600^\circ C$), la fase Co se ablanda (HV ~ 300) y el material se transfiere a la superficie de contacto (espesor $2-5 \mu m$). El tamaño de grano WC de $0,5 \mu m$ reduce la adhesión (tasa de desgaste $< 0,12 mm^3 / N \cdot m$).

Desgaste por alta temperatura

A $800^\circ C$, la tasa de desgaste es $< 0,15 mm^3 / N \cdot m$ y se forma una capa de óxido (WO_3 , espesor $\sim 2 \mu m$), lo que reduce el desgaste en un 5%-10%.

Corrosión y desgaste

En un ambiente ácido ($pH < 5$), la tasa de desgaste aumenta entre un 15% y un 20%, siendo la disolución de la fase Co (tasa $\sim 10^{-10} g/cm^2 \cdot s$) la principal razón.

La microtomografía de rayos X muestra que el desgaste abrasivo es principalmente acanalado, mientras que el desgaste adhesivo se acompaña de picaduras de desgarro (diámetro de $\sim 5-10 \mu m$). Por ejemplo, la tasa de desgaste del WC-10Co (grano de $0,5 \mu m$) es $< 0,1 mm^3/N \cdot m$, lo que cumple con los requisitos de la minería.

Análisis de los factores que afectan la falla por desgaste

del carburo cementado La falla por desgaste se ve afectada por los siguientes factores:

Dureza: Cuando HV 1500, la tasa de desgaste es $< 0,1 mm^3 / N \cdot m$; si < 1200 , la tasa de desgaste aumenta en un 20%-30%.

Tamaño de grano: cuando es de $0,5-1 \mu m$, la tasa de desgaste es baja; si es $> 2 \mu m$, la tasa de desgaste aumenta entre un 15% y un 20%.

Contenido de Co: Cuando es del 10%, el desgaste adhesivo es menor; si es $> 15\%$, la tasa de desgaste aumenta entre un 10% y un 15%.

Rugosidad de la superficie: cuando $R_a < 0,1 \mu m$, la tasa de desgaste es baja; si $> 0,2 \mu m$, la tasa de desgaste aumenta entre un 20% y un 25%.

Temperatura de funcionamiento: $> 600^\circ C$, el desgaste del adhesivo aumenta entre un 40% y un 50%.

Tamaño de partícula abrasiva: cuando $< 50 \mu m$, la tasa de desgaste es $< 0,1 mm^3 / N \cdot m$; si $> 100 \mu m$, la tasa de desgaste aumenta en un 30%-40%.

Corrosión ambiental: cuando el $pH < 5$, la tasa de desgaste aumenta en un 15%-20%; si el $pH > 7$, la tasa de desgaste cambia en $< 5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para reducir

la tasa de desgaste ($<0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), se recomiendan las siguientes estrategias:

El tamaño de grano WC se selecciona entre $0,5$ y $1 \mu\text{m}$ y la dureza es HV 1500.

El contenido de Co es del 10% para reducir el desgaste del adhesivo.

La superficie se pule a $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ y la tasa de desgaste se reduce entre un 15% y un 20%.

Agregar entre un 0,2% y un 0,5% de VC puede aumentar la dureza entre un 3% y un 5%.

Utilizando refrigerante (temperatura $< 500^\circ\text{C}$), el desgaste adhesivo se reduce entre un 20% y un 30%.

El Cr_3C_2 (0,1 % -0,3 %) en condiciones de alta temperatura forma una capa de Cr_2O_3 (espesor $\sim 1 \mu\text{m}$) y la tasa de desgaste disminuye entre un 5 % y un 10 %.

Protección del recubrimiento: La aplicación de un recubrimiento de CrN (espesor 2-4 μm , dureza HV 3000-3500) reduce la tasa de desgaste a $<0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Práctica de aplicación de ingeniería de fallas por desgaste de carburo

El carburo cementado de bajo desgaste tiene un buen desempeño:

Broca minera: WC-10Co (tasa de desgaste $<0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), distancia de perforación $>1200 \text{ m}$, un aumento del 40%.

Herramientas de aviación: WC-8Co (dureza HV 1500), bajo desgaste adhesivo, vida útil > 15 horas.

Matriz resistente al desgaste: WC-12Co ($Ra < 0,1 \mu\text{m}$), tasa de desgaste $<0,12 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, tiempos de extrusión $>10^6$ veces.

Álabes de turbina de aviación: WC-10Co (tamaño de grano $0,5 \mu\text{m}$, Recubrimiento de CrN $3 \mu\text{m}$), en desgaste a alta temperatura ($>800^\circ\text{C}$), tasa de desgaste $<0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, vida útil >4000 horas, un aumento del 40%.

7.3.2 Fractura y desconchado del carburo cementado (concentración de tensiones y microfisuras)

Resumen de principios y tecnología

La fractura y el desconchado se inician por la concentración de tensión ($K_t > 1,5$) y microfisuras (longitud $>0,05 \text{ mm}$), que son comunes en herramientas de aviación (vida útil de corte <10 horas) y brocas de minería (perforación $<1000 \text{ m}$). La fractura se basa en la mecánica de fractura (K_{Ic} 10-14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), y el desconchado implica un fallo de la interfaz (resistencia de unión $<40 \text{ MPa}$). La optimización requiere aumentar K_{Ic} y la energía de la interfaz ($<1,5 \text{ J/m}^2$).

Análisis de fallos. Se detectaron grietas mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) (resolución $< 0,2 \mu\text{m}$), tomografía computarizada (precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$) y tecnología de emisión acústica (rango de frecuencia de 20 kHz a 500 kHz). Por ejemplo, las herramientas de WC-10Co tuvieron una vida útil de < 10 horas debido al desconchado causado por microfisuras.

Mecanismo y análisis

Fractura: La concentración de tensión (K_t es 1,8-2,0) desencadena el crecimiento de la grieta (velocidad 10^2 m/s) y la fractura se produce cuando $K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (longitud de la grieta $> 0,5 \text{ mm}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el desgarro de la fase Co (profundidad ~5-10 μm) y la resistencia de unión es <40 MPa.

Trayectoria de la grieta: La fractura transgranular (ruptura del grano de agua, tamaño de 0,5 μm) y la fractura intergranular (desprendimiento del límite de grano, ancho de 0,05-0,1 μm) coexisten. Cuando el ángulo de deflexión de la grieta es de 20°-40°, la tasa de expansión disminuye entre un 5% y un 10%.

Impacto ambiental: En un entorno corrosivo (concentración de NaCl 3,5%), la tasa de crecimiento de grietas aumenta entre un 20% y un 25% y la corrosión bajo tensión (SCC) es la causa principal. 3 veces por adelantado). Por ejemplo, la tasa de fractura de WC-10Co (K_{Ic} 12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) es <0,2%, lo que cumple con los requisitos de la herramienta.

Análisis de factores influyentes

La fractura y el desconchado se ven afectados por los siguientes factores:

K_{Ic} : Cuando $K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, la tasa de fractura es <0,2%; si $< 10 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, la tasa de fractura aumenta en un 40%-50%.

Tamaño de grano: cuando es de 0,5-1 μm , la grieta se propaga lentamente; si es $> 2 \mu\text{m}$, la tasa de fractura aumenta entre un 20% y un 30%.

Contenido de Co: Cuando es del 10%, la tasa de pelado es menor; si es $< 6\%$, la tasa de pelado aumenta entre un 15% y un 20%.

Defectos superficiales: cuando la longitud de la grieta es $> 0,05 \text{ mm}$, la tasa de fractura aumenta entre un 40% y un 50%.

Concentración de tensiones: cuando $K_t > 2$, la tasa de desconchado aumenta entre un 30% y un 40%.

Corrosión ambiental: cuando la concentración de NaCl es $> 3,5\%$, la tasa de crecimiento de grietas aumenta entre un 20% y un 25%.

Temperatura: A $> 600^\circ\text{C}$, la tensión térmica ($> 150 \text{ MPa}$) provoca un aumento del 15 % al 20 % en la tasa de desconchado.

Estrategia de optimización

Para reducir la fractura y el desconchado ($< 0,2\%$), se recomiendan las siguientes estrategias:

El contenido de Co es del 10% y el tamaño de grano de WC es de 0,5-1 μm para hacer que $K_{Ic} > 12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Agregar entre un 0,2% y un 0,5% de VC puede aumentar la resistencia del límite del grano entre un 5% y un 10%.

La superficie se pule a $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ y la iniciación de grietas se reduce en un 20%-25%.

Diseñe las esquinas redondeadas (radio $> 0,5 \text{ mm}$) de modo que $K_t < 1,5$.

Para detectar microfisuras se utilizaron tomografías computarizadas (precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$) y emisión acústica (rango de frecuencia 20 kHz-500 kHz).

Protección contra la corrosión: La aplicación de un recubrimiento de Al_2O_3 (espesor 1-3 μm , dureza HV 2500-3000) reduce el impacto de la corrosión bajo tensión y la tasa de fractura se reduce a $< 0,1\%$.

Práctica de aplicación de ingeniería:

el carburo cementado con baja tasa de fractura tiene un buen rendimiento:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Herramientas de aviación: WC-10Co ($K_{1c} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), tasa de fractura $< 0,2\%$, vida útil > 15 horas.

Broca de minería: WC-8Co (tasa de extracción $< 0,2\%$), distancia de perforación $> 1200 \text{ m}$, un aumento del 40% .

Molde resistente al desgaste: WC-12Co ($K_{1c} < 1,5$), tiempos de extrusión $> 10^6$ veces, aumentado en un 25% .

Broca para PCB: WC-10Co (grano de $0,5 \mu\text{m}$, revestimiento de Al_2O_3 de $2 \mu\text{m}$), en perforaciones con alta tensión ($> 10^4$ agujeros), la tasa de fractura es $< 0,1\%$ y la vida útil es $> 10^5$ agujeros, lo que se mejora en un 80% .

7.4. Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado

7.4.1 Estrategia de mejora del rendimiento del carburo cementado: refinamiento del grano del carburo cementado

Descripción general del principio y la tecnología de refinamiento del grano de carburo cementado

El refinamiento de grano del carburo cementado (WC-Co) es una tecnología de optimización microestructural que controla con precisión el tamaño de grano del carburo de tungsteno (WC) a menos de $0,5 \mu\text{m}$. Este proceso mejora significativamente la dureza y la resistencia del material, sentando una base sólida para la aplicación del carburo cementado en condiciones de trabajo rigurosas. El refinamiento de grano se basa en el efecto Hall-Petch ($\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$), que indica que a medida que disminuye el tamaño de grano, la densidad del límite de grano aumenta significativamente (hasta $> 10^{13} \text{ m}^{-2}$), mejorando así la resistencia del material a la deformación plástica y al crecimiento de grietas. Esta tecnología de refinamiento puede aumentar la dureza a HV 1600-1800 y la resistencia a más de 4500 MPa , lo que hace que el carburo cementado se destaque en herramientas de alta resistencia y componentes resistentes al desgaste.

El proceso principal para lograr el refinamiento del grano incluye la molienda de bolas de alta energía durante 20 a 40 horas, utilizando medios de molienda rotatorios de alta velocidad (como bolas de carburo de tungsteno) para triturar mecánicamente y mezclar uniformemente las materias primas. Posteriormente, se realiza la sinterización al vacío (rango de temperatura de 1400 a 1500°C , con un grado de vacío estrictamente controlado a $< 10^{-2} \text{ Pa}$) para garantizar la estabilidad del tamaño del grano y evitar un crecimiento excesivo. En los últimos años, los avances tecnológicos han impulsado la introducción de aditivos multicomponentes (como VC+TaC+ZrC) para optimizar aún más el efecto de refinamiento del grano. Estos aditivos se agregan en una proporción baja de $0,1\%$ - $0,3\%$, lo que puede mantener el tamaño de grano en el rango ultrafino de $0,2$ - $0,5 \mu\text{m}$, lo que aumenta la dureza a HV 1800-2000, al tiempo que aumenta la tenacidad a la fractura (K_{1c}) a $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, lo que brinda más posibilidades para aplicaciones de alta gama.

Mecanismo y análisis del refinamiento del grano de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El refinamiento del grano mejora significativamente las propiedades mecánicas del carburo cementado al reducir el tamaño del grano de WC ($<0,5\text{ }\mu\text{m}$). El mecanismo puede analizarse en profundidad a nivel microscópico:

Fortalecimiento de los límites de grano

de WC se reduce a $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, la densidad del límite de grano aumenta significativamente ($>10^{13}\text{ m}^{-2}$). Según el efecto Hall-Petch, la dureza del material aumenta entre un 25 % y un 30 % (alcanzando una HV de 1600-1800) y la resistencia aumenta aproximadamente entre un 20 % y un 25 %. Esta red de alta densidad del límite de grano inhibe eficazmente el movimiento de dislocación y mejora la capacidad del material para resistir la deformación.

Mejora de Orowan

Cuando la separación entre granos λ se reduce a $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, el factor de refuerzo $\tau \sim Gb/\lambda$ (donde G es el módulo de corte y b es el vector de Burgers) aumenta significativamente, y las dislocaciones se fijan en los límites de grano, mejorando aún más la capacidad antideslizante. Este mecanismo es especialmente evidente en granos finos.

Uniformidad microscópica

Los granos finos se distribuyen uniformemente, lo que reduce los puntos de concentración de tensión local, mejora el equilibrio entre dureza y tenacidad y hace que el material sea menos propenso a fracturas frágiles bajo alta tensión.

Tomando como ejemplo la aleación WC-10Co, al refinar el tamaño de grano a $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, la dureza puede alcanzar HV 1700 y la tenacidad a la fractura K_{IC} es de aproximadamente $12-13\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Esta combinación de propiedades la hace especialmente adecuada para herramientas de alta resistencia, como brocas para minería y herramientas de corte para aviación.

Análisis de factores influyentes

El efecto del refinamiento del grano se ve afectado por una combinación de parámetros del proceso y la composición del material, que incluyen:

Tamaño del grano

Cuando el tamaño de grano se controla a $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, la dureza puede superar los 1600 HV; sin embargo, si el tamaño de grano supera $1\text{ }\mu\text{m}$, la densidad del límite de grano disminuye, la dureza cae a $<1500\text{ HV}$ y la ventaja de rendimiento se pierde gradualmente.

Tiempo de molienda de bolas

La molienda de bolas de alta energía durante 20 a 40 horas puede refinar eficazmente el tamaño de grano a $<0,5\text{ }\mu\text{m}$; si el tiempo de molienda de bolas es inferior a 15 horas, el tamaño de grano puede superar $1\text{ }\mu\text{m}$, lo que da como resultado un efecto de refinamiento insatisfactorio.

Temperatura de sinterización

El rango de temperatura de 1400 a 1500 °C puede mantener los granos estables y evitar un crecimiento excesivo; si la temperatura supera los 1550 °C, los granos pueden crecer a $>1\text{ }\mu\text{m}$ y el rendimiento disminuirá.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido conjunto

Cuando el contenido de Co es del 10%, la tenacidad a la fractura K_{Ic} puede alcanzar $>12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, lo que proporciona un amortiguador plástico suficiente; si el contenido de Co es inferior al 6%, la tenacidad disminuye significativamente ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), lo que limita el rango de aplicación del material.

Estrategia de optimización

Para alcanzar los objetivos de alto rendimiento (dureza HV 1700, tenacidad a la fractura $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), se recomiendan las siguientes estrategias de optimización:

un tamaño de grano WC $< 0,5 \mu\text{m}$ y se logró mediante molienda de bolas de alta energía durante 20 a 40 horas para garantizar que las materias primas estuvieran completamente trituradas y mezcladas de manera uniforme.

La temperatura de sinterización está estrictamente controlada a 1400-1500 °C y el vacío se mantiene a $< 10^{-2} \text{ Pa}$ para evitar el crecimiento del grano y la reacción de oxidación.

El contenido de Co se mantiene en 10% y el equilibrio entre tenacidad y dureza se optimiza ajustando la proporción.

utilizando un analizador de tamaño de partículas láser (desviación de medición $< 0,02 \mu\text{m}$) para garantizar una distribución uniforme y evitar granos locales de gran tamaño que afecten el rendimiento.

Práctica de aplicación de la ingeniería

El carburo cementado de grano refinado exhibe un excelente desempeño en una variedad de aplicaciones de ingeniería:

brocas para minería

de grano $< 0,5 \mu\text{m}$, con una dureza de HV 1700, puede extender significativamente la distancia de perforación a $> 1500 \text{ m}$, un aumento del 50% con respecto a los procesos tradicionales, mejorando efectivamente la eficiencia de la minería.

herramientas de aviación

de grano $< 0,5 \mu\text{m}$, a través del refinamiento del grano, la vida útil se extiende a > 15 horas, un aumento del 25%, satisfaciendo las necesidades de corte de alta precisión.

Molde resistente al desgaste

de grano $< 0,5 \mu\text{m}$, los tiempos de extrusión superan 10^6 veces, mejora del rendimiento del 25%, adecuado para operaciones de estampado de alta frecuencia.

7.4.2 Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado, aditivos de carburo cementado (VC, TaC)

Principio y descripción técnica

El rendimiento del carburo cementado se mejora introduciendo aditivos (como VC, TaC) para optimizar la microestructura, mejorar significativamente la resistencia del límite de grano e inhibir el crecimiento de granos de WC, mejorando así el rendimiento integral del material. La cantidad de adición de VC y TaC generalmente se controla en 0,2%-0,5%. A través del fortalecimiento de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

solución sólida y la modificación del límite de grano, la dureza se incrementa a HV 1600-1800 y la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) se incrementa a $10-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. El flujo del proceso incluye molienda de bolas de alta energía para mezclar uniformemente los aditivos con las materias primas y luego solidificarlos en un entorno de sinterización al vacío a 1400-1500 °C. En los últimos años, el desarrollo de multiaditivos (como VC+TaC+ ZrC, con una proporción de 0,1%-0,3%) se ha convertido en un foco de investigación. El efecto sinérgico de estos aditivos eleva la dureza a HV 1800-2000 y K_{Ic} a $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, ofreciendo nuevas posibilidades para la aplicación del carburo cementado en condiciones de trabajo extremas.

Mecanismo y análisis

Los aditivos mejoran el rendimiento del carburo cementado a través de los siguientes mecanismos específicos:

Añadir VC

La adición de 0,2%-0,5% de VC formará una fase VCx (espesor <20 nm) en el límite del grano, lo que puede aumentar la dureza en aproximadamente un 10%-15% al inhibir el crecimiento de los granos de WC (tasa de crecimiento $<10^{-10} \text{ m/s}$) mientras mantiene la estabilidad de la microestructura.

Adición de TaC

La adición de 0,2%-0,5% de TaC mejora significativamente la resistencia del límite del grano (>150 MPa) y aumenta la tenacidad a la fractura K_{Ic} en un 5%-10% a través del fortalecimiento de la solución sólida, mejorando efectivamente la resistencia del material al crecimiento de grietas.

Multiaditivos

VC+TaC+ZrC (relación total 0,1%-0,3%) puede lograr un aumento adicional del 3%-5% en la dureza a través del fortalecimiento de la solución sólida con un espaciado de límite de grano de $<0,2 \mu\text{m}$, y K_{Ic} alcanza $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, logrando una doble optimización de dureza y tenacidad.

Modelo mecánico

Combinado con el fortalecimiento de Orowan ($\tau \sim Gb/\lambda$) y el refuerzo del límite de grano inhiben eficazmente el movimiento de dislocación y mejoran significativamente la resistencia a la deformación. Por ejemplo, tras añadir VC+TaC al 0,3%, la dureza de la aleación WC-10Co alcanza HV 1700 y K_{Ic} es de $13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, lo que cumple con los requisitos de las brocas de alto rendimiento.

Análisis de factores influyentes

El impacto de los aditivos en la mejora del rendimiento está limitado por muchos factores:

Contenido aditivo

El VC y TaC es de 0,2% a 0,5%, y el rendimiento es óptimo dentro de este rango; si supera el 0,8%, la relación de fase frágil puede superar el 0,5%, lo que resulta en una disminución de la tenacidad.

Relación multiaditiva

VC:TaC :ZrC = 1:1:1, el aumento de dureza es el mayor (>1800); si la relación no está equilibrada (como 1:2:1), la relación de fase frágil puede superar el 1%, lo que afecta la estabilidad del material.

Tiempo de molienda de bolas

Entre 20 y 40 horas de molienda de bolas garantizan que los aditivos se distribuyan de manera

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

uniforme; si son menos de 15 horas, los aditivos se dispersan de manera desigual y el efecto es limitado.

Temperatura de sinterización

1400-1500 °C mantiene la estabilidad química y el efecto de fortalecimiento del límite de grano del aditivo; si supera los 1550 °C, el aditivo puede volatilizarse o tener reacciones secundarias, lo que resulta en una degradación del rendimiento.

Estrategia de optimización

Para alcanzar los objetivos de alto rendimiento (dureza HV 1700, tenacidad a la fractura K_{IC} 13 MPa·m^{1/2}), se recomiendan las siguientes estrategias de optimización:

La adición de VC/ TaC / ZrC (relación total 0,1%-0,3%, relación 1:1:1) puede aumentar la dureza entre un 3% y un 5% mediante el fortalecimiento de la solución sólida.

La molienda de bolas de alta energía dura entre 20 y 40 horas para garantizar que los aditivos y las materias primas estén completamente mezclados y distribuidos de manera uniforme.

La temperatura de sinterización se controla a 1400-1500 °C y el grado de vacío es $<10^{-2}$ Pa para evitar la volatilización de aditivos.

Se utilizó microscopía electrónica de transmisión (TEM, resolución $<0,1$ nm) para verificar el efecto de modificación del límite de grano y asegurar la distribución microscópica de los aditivos.

Práctica de aplicación de la ingeniería

Los carburos cementados optimizados con aditivos destacan en aplicaciones de ingeniería:

brocas para minería

WC-10Co (VC +TaC 0.3%), con una dureza de HV 1700, puede extender la distancia de perforación a >1500 m, un aumento del 50%, mejorando significativamente la eficiencia de la minería.

herramientas de aviación

WC-8Co (TaC 0,3%), vida útil extendida a >15 horas, un aumento del 25%, para satisfacer las necesidades de corte de alta precisión.

Nuevo electrolizador de energía

WC-10Co (VC +TaC+ZrC 0,2%), con una dureza superior a 1800, tiene una vida útil de $>10^3$ horas bajo choque electroquímico ($>10^3$ veces), un aumento del 40%.

7.4.3 Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado y fortalecer su superficie

Descripción general de los principios y tecnologías del refuerzo de superficies con carburo cementado

mejora significativamente la dureza superficial y la resistencia al desgaste mediante métodos como la carburación, la implantación de iones y el revestimiento láser, lo que proporciona una garantía para el uso a largo plazo del carburo cementado en entornos de alto desgaste y carga dinámica. El proceso de carburación forma una capa rica en WC (espesor 10-30 μ m , dureza >2000) en una atmósfera de CH₄ a 850-950 °C, la implantación de iones introduce una tensión de compresión residual (>400 MPa) a través de iones N⁺ (dosis 10^{16} - 10^{17} cm⁻², energía 80-120 keV), y el revestimiento láser utiliza 1,5-2,5 kW de potencia láser para generar una capa de alta dureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(espesor 50-100 μm , dureza >2500). Estas tecnologías juntas reducen la tasa de desgaste a $<0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. En los últimos años, la implantación iónica mejorada con plasma (PIII, dosis $10^{17} - 10^{18} \text{ cm}^{-2}$) se ha convertido en un foco de investigación. Su efecto de refuerzo profundo puede alcanzar $>0,5 \mu\text{m}$, mejorando significativamente la durabilidad de la superficie.

Mecanismo y análisis del fortalecimiento superficial del carburo cementado

El mecanismo específico de fortalecimiento de la superficie es el siguiente:

carburación

Los átomos de carbono se difunden (velocidad de difusión de $\sim 10 \text{ cm}^2/\text{s}$) para formar una capa rica en WC (espesor de 10-30 μm) sobre la superficie con una dureza superior a 2000 HV. La tasa de desgaste se reduce a $<0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, lo que mejora eficazmente la resistencia al desgaste de la superficie.

Implantación de iones

La profundidad de implantación de iones N^+ es de 0,1-0,3 μm , formando una estructura sólida reforzada con solución con tensión de compresión residual $>400 \text{ MPa}$, aumentando la tenacidad a la fractura K_{IC} en un 5 %-10 % y mejorando la resistencia al crecimiento de grietas superficiales.

Revestimiento láser

se forma una capa de alta dureza (>2500) con un espesor de 50-100 μm , lo que reduce aún más la tasa de desgaste a $<0,07 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, a la vez que mejora la resistencia a la fatiga. Por ejemplo, la aleación WC-10Co alcanza una dureza HV 2000 y una tasa de desgaste de $<0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ con una capa carburizada de 20 μm , lo que cumple plenamente los requisitos de alto rendimiento de las herramientas de aviación.

Análisis de los factores que afectan el fortalecimiento de la superficie del carburo cementado

El efecto de refuerzo de la superficie se ve afectado por varios parámetros del proceso y propiedades del material:

Temperatura de carburación

A 850-950 $^{\circ}\text{C}$, el espesor de la capa de carbono se mantiene estable entre 10 y 30 μm ; si la temperatura supera los 1000 $^{\circ}\text{C}$, la capa de carbono puede ser demasiado gruesa ($>50 \mu\text{m}$) , lo que aumenta el riesgo de desconchado.

Dosis de implantación de iones

Entre 10^{16} y 10^{17} cm^{-2} , la tensión residual es $>400 \text{ MPa}$. Si la dosis supera los 10^{18} cm^{-2} , la tasa de daño superficial puede alcanzar $>5\%$, lo que afecta la vida útil.

Potencia del láser

A 1,5-2,5 kW, la capa de revestimiento es uniforme y densa; si la potencia supera los 3 kW, la tensión térmica puede superar los 200 MPa, provocando microfisuras.

Tamaño del grano

Si el tamaño del grano es $<0,5 \mu\text{m}$, el efecto de fortalecimiento de la superficie es mejor; si es $>2 \mu\text{m}$, el aumento de dureza es inferior al 10 % y se reduce la eficiencia de fortalecimiento.

Rugosidad de la superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$R_a < 0,1 \mu\text{m}$, la capa de refuerzo está firmemente adherida al sustrato; si $> 0,2 \mu\text{m}$, la tasa de desgaste puede aumentar entre un 15% y un 20%.

Estrategia de optimización para el refuerzo de superficies de carburo cementado

Para alcanzar los objetivos de alta dureza y resistencia al desgaste (dureza HV 2000, tasa de desgaste $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) , se recomiendan las siguientes estrategias de optimización:

La temperatura de carburación se controla a $850-950^\circ\text{C}$ y el espesor de la capa de carbono se mantiene con precisión entre 10 y $30 \mu\text{m}$ para garantizar un endurecimiento uniforme de la superficie.

La dosis de implantación de iones se fijó en $10^{16} - 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ y la energía en $80-120 \text{ keV}$ para generar una tensión de compresión residual estable.

La potencia del revestimiento láser se ajustó a $1,5-2,5 \text{ kW}$ y el espesor de la capa de revestimiento se controló a $50-100 \mu\text{m}$.

Seleccione WC con tamaño de grano $< 0,5 \mu\text{m}$ y pule la superficie a $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ para reducir las fuentes de desgaste.

utilizando análisis de difracción de rayos X (resolución $< 1 \mu\text{m}$) para garantizar una distribución de tensión y un espesor consistentes.

Práctica de aplicación de ingeniería de refuerzo de superficies de carburo cementado

El carburo cementado endurecido superficialmente tiene un buen rendimiento en aplicaciones de ingeniería:

herramientas de aviación

de $20 \mu\text{m}$) , la dureza alcanza HV 2000, la vida útil se extiende a > 15 horas, un aumento del 25%, satisfaciendo las necesidades de corte de alta precisión.

brocas para minería

WC-8Co (ion implantado $\text{N}^+ 10^{17} \text{ cm}^{-2}$) , tasa de desgaste $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, la distancia de perforación supera los 1500 m , un aumento del 50%, mejorando significativamente la eficiencia de la minería.

Molde resistente al desgaste

WC-12Co (capa de revestimiento láser de $80 \mu\text{m}$) , dureza > 2500 , tiempos de extrusión más de 10^6 veces, un aumento del 25%, adecuado para operaciones de estampado de alta frecuencia.

7.4.4 Estrategia de mejora del rendimiento del carburo cementado: tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado (impresión 3D)

Principio y descripción técnica de la tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado

y se utiliza el proceso de fusión selectiva por láser (SLM) o moldeo por chorro de aglutinante para controlar con precisión la distribución del material para optimizar la dureza (HV 1500-1800), tenacidad ($K_{IC} 10-14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y resistencia a la fatiga ($> 10^5$ veces) . El proceso SLM utiliza una potencia láser de $200-300 \text{ W}$ y un espesor de capa de $20-50 \mu\text{m}$. La tecnología de moldeo por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

chorro de aglutinante logra una impresión de alta resolución ($<50\text{ }\mu\text{m}$) a través de la inyección de aglutinante. En los últimos años, la tecnología de nanoimpresión 3D (espesor de capa $<10\text{ }\mu\text{m}$) se ha convertido en un punto de acceso de vanguardia, capaz de fabricar estructuras de gradiente de alta precisión, con una dureza aumentada a >1800 y K_{Ic} superior a $13\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo que proporciona un nuevo camino para el diseño de componentes complejos.

Mecanismo y análisis de la tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado.

Los mecanismos por los cuales la impresión 3D mejora el rendimiento incluyen:

Estructura de gradiente

Al ajustar la distribución del material, se logra una alta dureza en la superficie ($HV > 1800$) mientras se mantiene una alta tenacidad en el interior ($K_{Ic} > 13\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo que reduce efectivamente la concentración de tensión y mejora la confiabilidad general.

Microcontrol

Un espesor de capa $<50\text{ }\mu\text{m}$ garantiza una densidad $>99\%$, la porosidad se reduce a $<0,5\%$ y se mejora la resistencia del material al crecimiento de grietas.

Efecto del tratamiento térmico

La temperatura de postratamiento de $800\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ elimina la tensión residual ($<100\text{ MPa}$), mejorando aún más la resistencia a la fatiga y la estabilidad estructural.

Por ejemplo, la aleación WC-10Co preparada por SLM tiene una dureza de HV 1700, una K_{Ic} de $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y una vida útil a la fatiga de más de 10^5 veces, mostrando un excelente rendimiento integral.

Análisis de los factores que afectan a la tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado

Los resultados de la impresión 3D se ven afectados por una variedad de parámetros del proceso:

Potencia del láser

A $200\text{--}300\text{ W}$, el baño de fusión se forma de manera estable y los materiales se fusionan de manera uniforme; si supera los 350 W , la tensión térmica puede alcanzar $>150\text{ MPa}$, lo que afecta la calidad de las piezas.

Espesor de la capa

$20\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$, la densidad es $>99\%$; si el espesor de la capa supera los $100\text{ }\mu\text{m}$, la porosidad puede aumentar a $>1\%$, reduciendo el rendimiento.

Velocidad de impresión

$10\text{--}20\text{ mm/s}$ garantiza la fuerza de unión entre capas; si la velocidad supera los 30 mm/s , la fuerza de unión entre capas disminuye, lo que afecta la fuerza general.

Temperatura de posprocesamiento

$800\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ optimiza la microestructura; si supera los 1100°C , los granos pueden crecer y el rendimiento puede degradarse.

Estrategia de optimización de la tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado

Para alcanzar los objetivos de alto rendimiento (dureza HV 1700, tenacidad a la fractura $K_{Ic} > 12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), se recomiendan las siguientes estrategias de optimización:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La potencia del láser se controló a 200-300 W y el espesor de la capa se ajustó a 20-50 μm para garantizar la estabilidad y la densidad del baño fundido.

La velocidad de impresión se mantuvo entre 10 y 20 mm/s y la temperatura de posprocesamiento fue de 800 a 1000 $^{\circ}\text{C}$ para eliminar la tensión residual.

Optimice el contenido de Co al 10% para mejorar el equilibrio entre tenacidad y dureza.

Utilice tomografía computarizada (TC, resolución $<10\ \mu\text{m}$) para detectar defectos internos y garantizar la calidad de impresión.

Práctica de aplicación de ingeniería de tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado

El carburo impreso en 3D destaca en aplicaciones de ingeniería:

herramientas de aviación

WC-8Co (proceso SLM), dureza HV 1700, vida útil extendida a >15 horas, un aumento del 25%, para satisfacer las necesidades de procesamiento de alta precisión.

Molde resistente al desgaste

WC-12Co (proceso de inyección de aglutinante), los tiempos de extrusión superan 10^6 veces, un aumento del 25%, adecuado para moldes de formas complejas.

Piezas complejas

WC-10Co (impresión 3D nano), tenacidad a la fractura $K_{IC} >13\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, vida útil por fatiga $>10^5$ veces, un aumento del 30%, adecuado para componentes personalizados de alto rendimiento.

7.5 Tendencias de desarrollo futuro: Aplicación de IA + IIoT en la optimización del rendimiento del carburo cementado

La inteligencia artificial (IA) y el Internet industrial de las cosas (IIoT) han supuesto cambios revolucionarios en la optimización del rendimiento y la aplicación industrial del carburo cementado (WC-Co). Gracias a las capacidades de modelado basadas en datos de la IA y a las capacidades de percepción y control en tiempo real del IIoT, el carburo cementado ha logrado mejoras inteligentes en el diseño de microestructuras, la monitorización del rendimiento, la predicción de fallos y la optimización de procesos. A continuación, se analizan sistemáticamente las perspectivas de aplicación de la IA y el IIoT en la optimización del rendimiento del carburo cementado desde cuatro dimensiones: optimización de la microestructura, monitorización del rendimiento en tiempo real, predicción de fallos y mantenimiento inteligente, optimización de procesos y fabricación inteligente, todo ello en combinación con las últimas investigaciones y datos.

7.5.1 Optimización de la microestructura: diseño de precisión impulsado por IA

La tecnología de IA, a través de algoritmos como el aprendizaje automático (ML), el aprendizaje profundo (DL) y el aprendizaje de refuerzo (RL), combinado con el análisis de big data, puede predecir con precisión la compleja relación entre los parámetros de la microestructura del carburo cementado (como el tamaño del grano, el contenido de Co, la proporción de aditivos) y el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento (dureza, tenacidad), logrando así un diseño óptimo de la microestructura.

Optimización del tamaño del grano

Los algoritmos de IA, como las máquinas de vectores de soporte (SVM) y las redes neuronales profundas (DNN), pueden predecir el efecto del tamaño del grano en la dureza basándose en datos históricos del proceso (por ejemplo, tiempo de molienda de bolas, temperatura de sinterización), con una precisión de predicción del 92%-96% (Instituto Fraunhofer, Alemania, 2024).

En 2024, el Instituto Fraunhofer de Alemania desarrolló un sistema de optimización de grano con IA basado en gemelos digitales. Mediante la simulación de la microestructura de WC-Co (método Monte Carlo), la desviación del tamaño de grano se controló a $\pm 0,01 \mu\text{m}$ y la consistencia de la dureza se mejoró entre un 12 % y un 15 % (HV 1650-1800). Por ejemplo, al optimizar el tamaño de grano de $0,5 \mu\text{m}$ a $0,3 \mu\text{m}$, la dureza aumentó un 10 % (HV 1700 a 1870) y la tenacidad (K_{IC}) se mantuvo entre 12 y 13 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (durometría Vickers y método de viga con entalla de un solo borde).

Optimización del contenido y distribución de Co

En 2024, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desarrolló un sistema de optimización del contenido de Co asistido por IA, que combinó la optimización bayesiana y la simulación de Monte Carlo para controlar la desviación de la distribución de Co a $< 0,1 \%$ (análisis de espectroscopia de fluorescencia de rayos X) y mejoró la consistencia del rendimiento entre un 15 % y un 18 %.

Mediante aprendizaje de refuerzo (RL), la IA ajusta dinámicamente el contenido de Co (6%-10%), controla la desviación de la tenacidad a la fractura (K_{IC}) a $< 0,4 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ y mejora la consistencia de la tenacidad (K_{IC} 20 %, rango de prueba 12-14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Tras la optimización, la dureza del carburo cementado WC-10Co se estabiliza en HV 1680-1750 y la tenacidad se mejora en un 10% (K_{IC} de 12,5 a 13,8 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Optimización de la relación aditiva

El efecto de la proporción de aditivos (como VC, TaC) en el rendimiento, mediante el algoritmo de árbol de refuerzo de gradiente (GBDT), optimiza la adición de VC (0,2%-0,4%) con una precisión del 95% y aumenta la dureza entre un 5% y un 8% (HV 1750-1850). En 2025, un estudio de la Universidad de Uppsala (Suecia) demostró que, tras optimizar mediante IA la proporción de VC+TaC (1:1, 0,3% de adición total), la tasa de crecimiento del grano disminuyó un 6% ($< 10^{-9} \text{ m/s}$, medición TEM), y la dureza alcanzó un HV de 1900-1950.

7.5.2 Monitoreo del rendimiento en tiempo real: percepción de alta precisión del IIoT

IIoT permite el monitoreo en tiempo real de los parámetros de rendimiento del carburo cementado a través de sensores integrados, computación de borde y redes 5G, lo que garantiza la estabilidad del proceso y la consistencia del rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Monitoreo de parámetros clave

Tamaño del grano

El analizador de tamaño de nanopartículas láser (precisión $\pm 0,005 \mu\text{m}$) monitorea el cambio de tamaño de grano en tiempo real y la desviación se controla a $< 0,01 \mu\text{m}$ (Universidad RWTH de Aachen, Alemania, 2024).

Contenido conjunto

Un sensor de metaanálisis de rayos X (precisión $\pm 0,05\%$) monitoriza la tasa de difusión de Co ($< 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$) y asegura la homogeneidad de la distribución (desviación $< 0,3\%$).

Distribución de tensiones

Los sensores de deformación (precisión $\pm 0,5 \text{ MPa}$) controlan los cambios de tensión térmica con una desviación ΔK_{1c} de $< 0,4 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ y una fluctuación de dureza de $\leq \pm 1,8\%$ (HV 1650-1680).

Ajuste dinámico del proceso

El IIoT transmite datos en tiempo real a la plataforma en la nube a través de la red 5G (retardo $< 5 \text{ ms}$) y se combina con algoritmos de IA para ajustar dinámicamente el tiempo de molienda de bolas (desviación $\pm 0,3$ horas) y la temperatura de sinterización (desviación $\pm 3^\circ\text{C}$). Por ejemplo, la desviación del tamaño de grano se reduce de $0,05 \mu\text{m}$ a $0,02 \mu\text{m}$ y la consistencia del rendimiento se mejora en un 15% (desviación de dureza $< 0,5\%$).

Monitoreo de mejora de superficies

de revestimiento láser, El IIoT utiliza sensores de temperatura infrarrojos (precisión de $\pm 1,5^\circ\text{C}$) para monitorizar los cambios de tensión térmica (desviación $< 8 \text{ MPa}$) y optimizar la calidad de la capa de revestimiento. En 2024, la Universidad RWTH de Aachen (Alemania) desarrolló un sistema de IA+IIoT. El sistema de revestimiento láser ajusta la potencia del láser ($1,5\text{-}2,5 \text{ kW}$) en tiempo real para aumentar la dureza de la capa de revestimiento a HV 2600-2700, con una desviación de espesor de $< 5 \mu\text{m}$ (medición SEM).

7.5.3 Predicción de fallos y mantenimiento inteligente: aplicación colaborativa de IA + IIoT

La IA y el IIoT mejoran significativamente la predicción de fallas y las capacidades de mantenimiento inteligente del carburo cementado, extendiendo su vida útil y reduciendo la tasa de fallas.

Predicción del crecimiento de grietas y fallas por fatiga

La IA utiliza redes neuronales recurrentes (RNN) para predecir la tasa de crecimiento de grietas (da/dN) con una precisión de $> 92\%$ (Universidad de Tokio, Japón, 2024).

IIoT está equipado con sensores de emisión acústica (precisión de frecuencia $\pm 1,5 \text{ kHz}$) para monitorear señales de iniciación de grietas en tiempo real (avance $> 10^3$ veces) a través de la red 5G.

En 2024, la Universidad de Tokio en Japón desarrolló un sistema de predicción de vida útil por fatiga con IA que predice la tasa de crecimiento de grietas (precisión $\pm 10^{-10} \text{ mm/ciclo}$), aumentando la vida útil de las brocas mineras en un 15% - 20% (de 1500 m a 1800 m de distancia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

perforación).

La tasa de fallos se ha reducido del 0,15% a <0,08% (datos de pruebas de campo).

Predicción de la tenacidad al impacto

En 2024, la Universidad de Lund (Suecia) desarrolló un sistema de predicción de IA que combina el análisis de elementos finitos (FEA) y redes neuronales (NN) para predecir la tenacidad al impacto (K_{Ic}) con una precisión de $\pm 0,2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Tras la optimización, la resistencia al impacto de las brocas de minería aumentó un 22 % (K_{Ic} de 12,0 a 14,6 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y la vida útil se prolongó entre un 20 % y un 25 % (prueba de campo).

Predicción de fallas por desgaste

Mejora la resistencia al desgaste de las brocas mineras entre un 20 % y un 25 % mediante la monitorización en tiempo real de la morfología de las marcas de desgaste (precisión de predicción del ancho de ranura de $\pm 0,4 \mu\text{m}$, medida al microscopio). La tasa de desgaste se reduce de 0,1 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ a 0,075 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (prueba ASTM G65).

Detección de grietas y predicción del tiempo de fallo

En 2024, la Universidad de Cambridge (Reino Unido) desarrolló un sistema de detección de grietas con IA que combina datos de emisión acústica (EA) y TC (resolución $< 5 \mu\text{m}$) para mejorar la precisión de la predicción de fallos a $\pm 0,8$ horas. El tiempo de predicción se incrementó de 10^3 a $10^{3/2}$ veces, lo que redujo la tasa de tiempos de inactividad inesperados en un 30 % (datos de aplicaciones industriales).

7.5.4 Optimización de procesos y fabricación inteligente: colaboración eficiente de IA + IIoT

La IA y el IIoT en la fabricación de carburo cementado han mejorado significativamente la eficiencia del proceso, la estabilidad del rendimiento y la inteligencia de producción.

Optimización de la relación aditiva

La IA utiliza algoritmos genéticos (AG) para optimizar la proporción de aditivos VC/ TaC / ZrC (adición total 0,1%-0,3%) con un error de <0,04% y una desviación de consistencia de dureza de <1,5% (Universidad Nacional de Seúl, Corea del Sur, 2024). En 2024, la Universidad Nacional de Seúl (Corea del Sur) desarrolló un sistema de optimización de aditivos con IA que aumenta la dureza a HV 1900-2000 y mantiene la tenacidad a K_{Ic} 12-13 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ mediante la monitorización en tiempo real de la tasa de crecimiento del grano ($< 10^{-9}$ m/s, medición TEM).

Optimización de parámetros de proceso

El IIoT utiliza sensores (precisión de tamaño de grano $\pm 0,004 \mu\text{m}$) para supervisar el proceso de molienda de bolas y sinterización en tiempo real. La IA ajusta parámetros como el tiempo de molienda de bolas (20-40 horas, desviación $\pm 0,4$ horas) y la temperatura de sinterización (1400-1450 °C, desviación ± 2 °C) mediante un algoritmo de descenso de gradiente. La eficiencia de producción aumentó entre un 18 % y un 22 % (la producción de un solo lote aumentó de 100 a 120 piezas/hora, según datos industriales).

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

Optimización de la mejora de la superficie

La IA predice el espesor de la capa carburizada ($10\text{-}30\text{ }\mu\text{m}$, error $<4\text{ }\mu\text{m}$) y la dosis de implantación iónica ($10^{16}\text{-}10^{17}\text{ cm}^{-2}$, error $<5\%$), y la consistencia de la dureza se mejora a $<1,8\%$ (HV 2000-2500). El IIoT monitoriza la temperatura de la capa carburizada en tiempo real ($850\text{-}950\text{ }^{\circ}\text{C}$, desviación $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) para optimizar la calidad de la capa carburizada.

Inspección de calidad y mantenimiento inteligente

La IA+IIoT utiliza datos de rendimiento de la superficie (dureza, tasa de desgaste) para lograr una inspección de calidad automatizada, con una tasa de éxito del $98,5\%$ (datos industriales). La IA predice el tiempo de fallo (error <4 horas) y el IIoT optimiza las estrategias de mantenimiento, reduciendo el tiempo de inactividad entre un 32% y un 35% y la tasa de accidentes entre un 30% y un 35% (pruebas de campo).

7.5.5 El primer año de IA en la industria del tungsteno de China

CTIA GROUP LTD definió inicialmente el año 2025 como el "primer año de la IA en la industria del tungsteno de China", lo que marca una nueva etapa en la que la industria del carburo cementado de China avanza hacia la fabricación inteligente. Este concepto no solo refleja la profunda aplicación de las tecnologías de IA e Internet Industrial de las Cosas (IIoT) en la industria del tungsteno, sino que también destaca el objetivo estratégico de China de liderar la tecnología en la industria global del carburo cementado. A continuación, se detalla la importancia práctica, la alta entropía del carburo cementado y la importancia de la dosificación de grado de carburo cementado.

7.5.5.1 La importancia práctica del concepto de “el primer año de IA en la industria del tungsteno de China”

CTIA GROUP LTD propuso por primera vez el concepto de "2025 es el primer año de IA en la industria del tungsteno de China" el 3 de enero de 2025, lo que refleja las necesidades de transformación tecnológica y la presión competitiva de la industria del tungsteno de China en el mercado global de carburo cementado.

Necesidades de modernización de la industria

China es el mayor productor de carburo cementado del mundo, representando más del 60% de la producción global en 2024 (datos de la Asociación de la Industria del Tungsteno de China), pero ha dependido durante mucho tiempo de los procesos de fabricación tradicionales (como el prensado y la sinterización), y existe una brecha en la eficiencia de la producción y la consistencia del rendimiento con los países europeos y americanos (como Sandvik y Kennametal) (desviación de la consistencia de la dureza del $5\%\text{-}8\%$ frente al $2\%\text{-}3\%$). La introducción de AI+IIoT optimiza los parámetros del proceso (como la desviación de la temperatura de sinterización $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) a través de datos, lo que aumenta la eficiencia de la producción en un $18\%\text{-}22\%$ (la producción de un solo lote aumentó de 100 piezas a 120 piezas/hora) y reduce la desviación de la consistencia de la dureza a $<2\%$, reduciendo la brecha con el nivel avanzado internacional.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Autonomía tecnológica

Anteriormente, la fabricación de carburo cementado en China dependía de equipos y tecnología importados (como el sistema de revestimiento láser de Alemania). En 2025, CTIA GROUP LTD y la Universidad de Tsinghua desarrollaron conjuntamente un sistema nacional de optimización de IA, que optimizó la relación aditiva (relación VC/ TaC 1:1, error <0,03%) mediante un algoritmo genético (GA), y la dureza se incrementó a HV 1950-2000, logrando un control independiente de la tecnología. La propuesta del primer año de IA marca la transformación de China de un seguidor de la tecnología a un líder. Se espera que la tasa de aplicación de equipos nacionales aumente del 40% en 2024 al 65% en 2026 (pronóstico de la industria).

Mejora de la competitividad global

La IA+IIoT promueve la optimización del rendimiento del carburo cementado (como el aumento de K_{IC} a 13-15 MPa·m^{1/2}), lo que aumenta la competitividad de los productos chinos de carburo cementado en los sectores aeroespacial (como las herramientas de aviación) y minero (la vida útil de las brocas aumentó un 20%). En 2025, se espera que las exportaciones chinas de carburo cementado aumenten un 15 % (unos 5000 millones de dólares estadounidenses, según las previsiones del Ministerio de Comercio), consolidando aún más su posición en el mercado global.

7.5.5.2 Importancia del tratamiento de alta entropía del carburo cementado

Los metales duros de alta entropía propuestos por CTIA GROUP LTD se refieren a la formación de metales duros basados en aleaciones de alta entropía (HEA) mediante la introducción de múltiples elementos (como W, Ti, Ta, Nb, Cr) para mejorar la diversidad y la estabilidad del rendimiento.

Avance en el rendimiento

Existe una contradicción entre la dureza y la tenacidad del carburo cementado WC-Co tradicional (cuando la dureza es HV 1800, K_{IC} suele ser <10 MPa·m^{1/2}). La alta entropía mejora significativamente el rendimiento general a través del efecto sinérgico de múltiples elementos. En 2025, CTIA GROUP LTD planea desarrollar un carburo cementado de alta entropía (W-Ti-Ta-Nb-Co) con una dureza de HV 2100-2200 y una tenacidad de K_{IC} 14-16 MPa·m^{1/2} (prueba del método de viga con entalla de un solo lado), que es un 20%-30% más alta que el WC-Co tradicional.

Optimización de la microestructura

El tratamiento de alta entropía utiliza algoritmos de IA (como aprendizaje profundo, DL) para predecir la relación de elementos (W:Ti : Ta:Nb = 1:1:1:1, error <0,05 %), formando una fase uniforme de alta entropía (tamaño de grano 0,3-0,5 μm, medición TEM), reduciendo los defectos en los límites de grano (<0,1 %). La resistencia de unión de los límites de grano aumenta en un 25 % (>180 MPa, prueba de nanoindentación) y la resistencia a la fatiga mejora significativamente (vida útil >1,5 × 10⁵ veces, prueba de fatiga por flexión rotatoria).

Desarrollo de aplicaciones

El carburo cementado de alta entropía presenta una excelente resistencia a altas temperaturas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(dureza > HV 1800 a 800 °C), ideal para herramientas de corte de álabes de turbinas de motores de aviación, con un aumento de la vida útil del 30 % (de 12 a 15,6 horas, en pruebas de campo). La resistencia a la corrosión se incrementa un 20 % (pH < 4 en entornos ácidos, velocidad de corrosión < 0,05 mm/año, en pruebas electroquímicas), ideal para equipos de minería en aguas profundas.

7.5.5.3 La importancia de la dosificación del grado de carburo

La dosificación de grados de carburo cementado propuesta por CTIA GROUP LTD se refiere a la gestión digital de productos de carburo cementado a lo largo de su ciclo de vida a través de la tecnología AI+IIoT , estableciendo una base de datos de números de lote de grado y logrando trazabilidad del rendimiento y producción personalizada.

Trazabilidad del rendimiento

Cada lote de productos de carburo cementado registra parámetros de producción (como temperatura de sinterización 1400 °C, contenido de Co 10%) mediante sensores IIoT , genera un número de lote único y lo almacena en la plataforma en la nube (capacidad de datos >1 TB, 2025). Los usuarios pueden consultar datos de rendimiento (como dureza HV 1750, K_{1c} 13 MPa·m^{1/2}) a través del número de lote para garantizar la consistencia del rendimiento (desviación <1,5%).

Producción personalizada

Ajusta automáticamente la fórmula de grado (como WC-12Co + 0,3 % TaC) según las necesidades del cliente (por ejemplo, las brocas de minería requieren K_{1c} >14 MPa·m^{1/2}), lo que acorta el ciclo de producción en un 25 % (de 8 a 6 días). La numeración de lotes permite la personalización de lotes pequeños para satisfacer las diversas necesidades de la industria aeroespacial (herramientas de alta tenacidad) y las nuevas energías (moldes de baterías).

Mejora de la gestión de la calidad

La dosificación de marca utiliza IA para analizar datos históricos (más de 100 000 lotes), identificar procesos anormales (como una desviación del tamaño de grano superior a 0,02 μm) , optimizar parámetros y mejorar significativamente la tasa de aprobación. La eficiencia del análisis de fallos se mejora en un 30 %, y la trazabilidad del número de lote permite localizar rápidamente los lotes con problemas (en menos de una hora), lo que reduce los costes de retirada entre un 20 % y un 25 %.

7.5.6 Perspectivas futuras y desafíos para mejorar el rendimiento del carburo cementado

Perspectivas futuras para la mejora del rendimiento del carburo cementado

Fabricación inteligente

La IA+IIoT promoverá aún más la transformación de la fabricación de carburo cementado en fábricas inteligentes, y se espera que la eficiencia de la producción aumente entre un 30% y un 40% en 2027 (pronóstico de McKinsey).

Optimización de múltiples materiales

La IA puede predecir el rendimiento de carburos cementados compuestos multifásicos (como WC-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co- TiC) , con una dureza que se espera que supere HV 2000 y una tenacidad que alcance $K_{IC} \geq 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Gestión del ciclo de vida completo

El IIoT permitirá el seguimiento del rendimiento desde las materias primas hasta las aplicaciones y aumentará la predicción de fallas a 10^5 veces de anticipación.

Desafíos para mejorar el rendimiento del carburo

Calidad de los datos

Los modelos de IA se basan en datos de alta calidad. Los datos industriales actuales presentan un alto nivel de ruido (desviación $> 10\%$) y es necesario mejorar la precisión de los sensores.

costo

IIoT (sensores, módulos 5G) son costosos de implementar y tienen un ROI bajo en el corto plazo ($< 5\%$).

Seguridad

La transmisión de la red 5G tiene el riesgo de fuga de datos y es necesario fortalecer la tecnología de cifrado (estándar AES-256).

La IA+IIoT ofrece un nuevo camino para optimizar el rendimiento del carburo cementado. Mediante la optimización de la microestructura (desviación del tamaño de grano $< 0,01 \mu\text{m}$, mejora de la consistencia de la dureza en un 15%), la monitorización del rendimiento en tiempo real (desviación de la dureza $< 1,8\%$), la predicción de fallos (cantidad de avance $> 10^4$ veces, tasa de fallos $< 0,08\%$) y la optimización del proceso (mejora de la eficiencia de producción entre un 18% y un 22%), la consistencia del rendimiento, la fiabilidad y la eficiencia de producción del carburo cementado se han mejorado significativamente. En el futuro, la IA+IIoT impulsará el desarrollo de la fabricación de carburo cementado hacia una gestión inteligente y completa del ciclo de vida, y proporcionará soluciones más eficientes y fiables para la aviación, la minería, las nuevas energías y otros sectores.

7.6 Normas nacionales e internacionales pertinentes

Las siguientes son normas nacionales e internacionales relacionadas con las propiedades mecánicas del carburo cementado, que cubren las normas chinas, ISO, estadounidenses y europeas, para garantizar que los lectores puedan comprender completamente la base de prueba y evaluación:

relacionado con las propiedades mecánicas del carburo cementado :

para las propiedades del carburo cementado": especifica los métodos de prueba de dureza (HV), tenacidad a la fractura (K_{IC}) y resistencia a la compresión.

GB/T 3849-2008 Método de prueba para dureza Vickers de carburo cementado: aplicable a pruebas de dureza (HV 1200-2000).

GB/T 7997-2010 Método de prueba para tenacidad a la fractura de carburo cementado: basado en el método de viga con entalla de un solo borde (SENB) para probar K_{IC} .

GB/T 3488-2008 “Métodos de prueba para la microestructura del carburo cementado”: se utiliza para el análisis del tamaño del grano y la microestructura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

relacionado con las propiedades mecánicas del carburo cementado :

ISO 28079:2009 “Método de ensayo para tenacidad a la fractura de probetas de carburo con forma de palma”: Ensayo K_{Ic} (8-16 MPa·m^{1/2}).

ISO 6507-1:2018 “Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos”: Aplicable al ensayo de dureza de carburo cementado.

ISO 3327:2009 Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión del carburo cementado: Ensayo de resistencia a la compresión (4000-6000 MPa).

ISO 3738-1:2010 Métodos de ensayo para desgaste de carburos cementados: Basado en pruebas de desgaste abrasivo (similar a ASTM G65).

Normas americanas relacionadas con las propiedades mecánicas del carburo cementado:

Método de prueba ASTM E399-20 para tenacidad a la fractura de materiales metálicos: Prueba K_{Ic} , aplicable a carburo cementado.

ASTM E647-15 "Método de prueba de tasa de crecimiento de grietas por fatiga": Tasa de crecimiento de grietas de prueba (da/dN).

ASTM E23-18 "Método de prueba de impacto de muestra con entalla": Energía de impacto de prueba Charpy e Izod.

Método de prueba de desgaste de rueda de caucho/arena seca ASTM G65-16: prueba la resistencia al desgaste del carburo cementado (tasa de desgaste <0,1 mm³/N·m).

Normas europeas relacionadas con las propiedades mecánicas del carburo cementado:

EN ISO 6507-1:2018 “Ensayo de dureza Vickers”: consistente con la norma ISO 6507-1.

EN 843-1:2006 Método de ensayo de tenacidad a la fractura de cerámicas avanzadas: aplicable al ensayo K_{Ic} de carburo cementado.

EN 1071-3:2005 “Métodos de ensayo de desgaste de materiales cerámicos”: Aplicable al ensayo de resistencia al desgaste del carburo cementado.

EN ISO 6892-1:2019 "Ensayos de tracción de materiales metálicos": se puede utilizar para ensayos de resistencia del carburo cementado.

Referencias

- [1] Norma nacional. GB/T 18376-2001 “Método de prueba para propiedades de carburo cementado”.
- [2] Norma nacional. GB/T 7997-2010 “Método de prueba para tenacidad a la fractura de carburo cementado”. [3] Norma nacional. GB/T 3488-2008 “Método de prueba para microestructura de carburo cementado”. [4] Li Ming, et al. (2020). “Efecto de la temperatura de sinterización en la microestructura de carburo cementado”. “Tratamiento térmico de metales”, 45(3), 12-18.
- [5] Zhang Wei, et al. (2021). “Efecto del aditivo VC en las propiedades de carburo cementado”. “Tecnología de metalurgia de polvos”, 39(4), 45-50.
- [6] Liu Yang, et al. (2022). “ Efecto del contenido de Co en las propiedades mecánicas del carburo cementado ”. “ Journal of Materials Research”, 36(5), 321-327.
- [7] Chen Lei, et al. (2023). " Efecto de la atmósfera de sinterización en los defectos del límite de grano en carburo cementado ". Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 33(6), 89-95.
- [8] Zhao Gang, et al. (2024). " Efecto de la velocidad de enfriamiento en la tensión térmica del

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

carburo cementado ". Materials Science and Technology, 52(2), 101- 108.

[9] Wang Qiang, et al. (2023) . " Efecto de la molienda de bolas de alta energía en el refinamiento del grano de WC ". Journal of Materials Science and Engineering, 41(3), 234-240.

[10] Li Qiang, et al. (2025) . "Optimización del rendimiento del carburo cementado para álabes de turbinas de aviación". Revista de Materiales Aeronáuticos, 45(1), 15-22.

[11] ISO 3327:2009. Metales duros — *Determinación de la resistencia a la compresión* .

[12] ASTM E647-15. Método de prueba estándar para la medición de *las tasas de crecimiento de grietas por fatiga* .

[13] ASTM G65-16. Método de prueba estándar para prueba *de abrasión de rueda de caucho/arena seca* .

/ Upadhyaya, GS (1998) . Carburos cementados : producción, propiedades y pruebas . Prensa Wiley.

[15] Konyashin , I., et al. (2015). "Microestructura y propiedades de carburos cementados de WC-Co ". Revista Internacional *de Metales Refractarios y Materiales Duros*, 49, 203-211 .

[16] Prakash, LJ (2016). "Modificación de la superficie de carburos cementados: una revisión " . *Revista de Ciencia de Materiales* , 51(10) , 4657-4671.

[17] Hall, EO (1951). "La deformación y el envejecimiento del acero dulce: III. Análisis de los resultados". Actas de *la Sociedad de Física* , 64(381) . 747-753 .

[18] Schiotz, J., et al. (1998) . " Ablandamiento de metales en tamaños de grano muy pequeños " . *Nature*, 391 (6667) , 561-563.

RM (1996). Teoría y práctica de la sinterización. Wiley Press.

[20] Sandvik Coromant .

(2023) . "Datos de rendimiento de herramientas de corte de alta velocidad".

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

Cronograma:

El equilibrio entre dureza y tenacidad del carburo cementado: principales parámetros de rendimiento

actuación	Rango de parámetros	Escenario de aplicación	Observación
Dureza (HV)	15002500±30	Herramientas de aviación, brocas para minería, moldes resistentes al desgaste.	Una dureza alta (HV>2000±30) puede conducir fácilmente a una disminución de la tenacidad y requiere equilibrio y optimización.
Tenacidad (K _{1c})	820 MPa·m ^{1/2} ± 0,5	Herramientas de aviación, brocas para minería, moldes resistentes al desgaste.	Una alta tenacidad (K _{1c} >15 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) suele ir acompañada de una disminución de la dureza, lo que afecta la resistencia al desgaste.
Resistencia a la compresión	>4000 MPa ± 100 MPa	Condiciones de alta carga	Está estrechamente relacionado con el tamaño del grano y el contenido de Co.
Cortando la vida	>20 horas ±1 hora	Herramientas de aviación (corte a alta velocidad > 1000 m/min)	WCCo de grano fino (0,5 μm ± 0,01 μm, Co 10 % ± 1 %), dureza HV 1800 ± 30, vida útil prolongada.
Distancia de perforación	>1500 m ± 100 m	brocas para minería	Co 8% ± 1% optimiza la tenacidad y mejora la eficiencia de perforación.
Número de apretones	>10 ⁶ veces ±10 ⁵ veces	Molde resistente al desgaste	El refinamiento del grano (0,5 μm ± 0,01 μm) mejora la durabilidad.

Factores que afectan el tamaño del grano y su efecto en el equilibrio entre dureza y tenacidad del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Tamaño inicial de partícula de polvo	0,51 μm ± 0,01 μm	Tamaño de partícula <1 μm aumenta la dureza (HV> 1800 ± 30); dureza >2 μm < 1500 ± 30.	Utilice polvo de 0,51 μm ± 0,01 μm para garantizar un refinamiento uniforme.
Tiempo de molienda de bolas	40 horas ± 1 hora (400 rpm ± 10 rpm)	Después de 40 horas, el tamaño se reduce a 0,5 μm ± 0,01 μm y la dureza aumenta un 30 % ± 5 %; después de <20 horas, el tamaño es > 1 μm y el rendimiento disminuye.	La molienda de bolas se realizó durante 40 h ± 1 h y la velocidad de rotación se controló a 400 rpm ± 10 rpm.
Temperatura de sinterización	1450 °C ± 10 °C	A 1450 °C, el tamaño de grano es <0,7 μm ± 0,01 μm; a >1500 °C, el tamaño de grano es >2 μm y la dureza disminuye en un 10 % ± 2 %.	Controlar 1450°C ± 10°C para evitar el crecimiento de granos.
Aditivos (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3% inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5% ± 1%; >0,5% forma una fase frágil, K _{1c} <8 MPa·m ^{1/2} ± 0,5.	Agregue VC 0,3% ± 0,01% y controle el tamaño de grano a <0,5 μm ± 0,01 μm.
Contenido conjunto	10% ± 1%	El 10% tiene dureza equilibrada (HV 1800±30) y tenacidad (K _{1c} > 12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5); <6% tiene tenacidad insuficiente.	Ajuste Co 10% ± 1% para garantizar un rendimiento equilibrado.
Atmósfera de sinterización	Grado de vacío <10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻⁴ Pa	El vacío evita la oxidación (O ₂ < 0,1 ppm ± 0,01 ppm) y reduce los defectos en los límites de grano (<0,1 % ± 0,02 %).	atmósfera de Ar de alta pureza (pureza > 99,99 % ± 0,01 %).

Factores que influyen en la optimización del contenido de la fase aglutinante para el equilibrio de dureza y tenacidad del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Co-relación	8%10%±1%	± 30) y tenacidad (K _{1c} 12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) ; <6% K _{1c} <10 MPa·m ^{1/2} ± 0,5 .	Selecione Co 8%10%±1% para garantizar un rendimiento equilibrado.
Temperatura de sinterización	1450 °C ± 10 °C	1450 °C garantiza una distribución uniforme de Co (desviación <1 % ± 0,2 %); >1500 °C forma un depósito de Co (>10 μm ± 1 μm).	Control 1450°C ± 10°C, desviación de distribución de Co < 1% ± 0,2%.
Tamaño de las partículas de WC	0,51 μm ± 0,01 μm	0,51 μm mejora la unión interfacial; >2 μm K _{1c} disminuye en un 5 % ± 1 %.	Selecione WC 0,51 μm ± 0,01 μm.
Aditivos (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3% controla la difusión de Co (velocidad <10 ⁻¹⁰ cm ² /s ± 10 ⁻¹¹ cm ² /s); >0,5% forma una fase frágil (>1% ± 0,2%).	La adición de VC 0,3% ± 0,01% puede inhibir la difusión de Co.
Presión de moldeo	250 MPa ± 5 MPa	250 MPa aumenta la densidad (>99,5%±0,1%); <200 MPa porosidad >2%±0,5%.	Utilice prensado isostático en frío a 250 MPa ± 5 MPa.
Tiempo de sinterización	2 horas ± 0,1 horas	Humectación controlada de Co durante 2 horas (ángulo de contacto <5°±1°); tasa de segregación de Co >0,5%±0,1% durante >3 horas.	La sinterización se realizó durante 2 horas ± 0,1 horas para garantizar la uniformidad del Co.

Principales parámetros de rendimiento de la resistencia a la fatiga y al impacto del carburo cementado

actuación	Rango de parámetros	Escenario de aplicación	Observación
Tasa de crecimiento de grietas (da/ dN)	<10 ⁻⁶ mm/ciclo ±10 ⁻⁷ mm/ciclo	Brocas para minería, herramientas de corte para aviación, moldes resistentes al desgaste	Una baja tasa de crecimiento de grietas (por ejemplo, 10 ⁻⁷ mm/ciclo ± 10 ⁻⁸ mm/ciclo) extiende la vida útil por fatiga (> 10 ⁵ veces ± 10 ⁴ veces).
Energía de impacto	1050 J ± 1 J	Brocas para minería, herramientas de corte para aviación, moldes resistentes al desgaste	La energía de impacto Charpy de 20 J ± 1 J cumple con los requisitos de alto impacto (por ejemplo, > 10 ³ Hz ± 100 Hz).
Vida de fatiga	>10 ⁵ veces ±10 ⁴ veces	Brocas para minería, moldes resistentes al desgaste	El refinamiento de grano (0,5 μm ± 0,01 μm) y la optimización de Co (10 % ± 1 %) mejoran significativamente la resistencia a la fatiga.
Impacto en la vida	Perforación >1500 m ± 100 m, extrusión > 10 ⁶ veces ± 10 ⁵ veces	Brocas para minería, moldes resistentes al desgaste	Alto contenido de K _{1c} (12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) garantiza la fiabilidad frente a golpes.

Factores que afectan el crecimiento de grietas en la resistencia a la fatiga del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Tamaño del grano	0,51 μm ± 0,01 μm	0,51 μm da/ dN <10 ⁻⁷ mm/ciclo ± 10 ⁻⁸ mm/ciclo; >2 μm da/ dN >10 ⁻⁶ mm/ciclo ± 10 ⁻⁷ mm/ciclo.	Selecione WC 0,51 μm ± 0,01 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Contenido conjunto	10% ± 1%	10% K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5, da/ dN bajo ; <6% da/ dN aumento de 30% ± 5%.	Establecer Co 10% ± 1%.
Relación de tensiones (R)	0,1 ± 0,01	R=0,1 da/ dN <10 ⁻⁷ mm/ciclo±10 ⁻⁸ mm/ciclo; R>0,5 da/ dN aumentó un 50%±5%.	Control R=0,1±0,01.
Aditivos (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3% aumenta la resistencia del límite de grano (>200 MPa ± 20 MPa); >0,5% fase frágil >1% ± 0,2%.	Añadir VC 0,3% ± 0,01%.
Rugosidad de la superficie	Ra<0,05 μm ± 0,01 μm	Ra<0,05 μm, tiempo de iniciación de grietas>10 ⁴ veces ±10 ³ veces ;>0,1 μm, la vida útil se reduce en un 20 % ± 5 %.	Pulido a Ra<0,05μm±0,01μm.
Defectos microscópicos	Porosidad <0,5%±0,1%	Porosidad <0,5% da/ dN <10 ⁻⁷ mm/ciclo ± 10 ⁻⁸ mm/ciclo; >1% da/ dN aumento del 40% ± 5%.	La porosidad se controla a <0,5% ± 0,1% y se detecta mediante tomografía computarizada.

Factores que afectan la tenacidad al impacto de la resistencia al impacto del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Contenido conjunto	10% ± 1%	10% energía de impacto>20 J±1 J; <6% energía de impacto<10 J±1 J.	Selecione Co 10% ± 1%.
Tamaño del grano	0,51 μm ± 0,01 μm	0,51 μm K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5; >2 μm, la energía de impacto disminuye en un 20 % ± 5 %.	Selecione WC 0,51 μm ± 0,01 μm.
Aditivos (VC)	0,3% ± 0,01%	0,3% la energía de impacto aumenta en un 10% ± 2%; >0,5% fase frágil >1% ± 0,2%.	Añadir VC 0,3% ± 0,01%.
Profundidad de muesca	2 mm ± 0,01 mm	Prueba estándar de 2 mm; reducción de energía de impacto >3 mm 30 % ± 5 %.	Controle la profundidad de la muesca a 2 mm ± 0,01 mm.
Densidad sinterizada	>99,5%±0,1%	>99,5% energía de impacto>20 J ± 1 J; <99% porosidad>2% ± 0,5%.	Asegúrese de que la densidad de sinterización sea > 99,5 % ± 0,1 %.
Temperatura de prueba	40°C ± 1°C	A 40°C, la energía de impacto es >15 J±1 J; a <60°C, la energía de impacto disminuye en un 20%±5%.	Las pruebas de baja temperatura verifican el rendimiento (40 °C ± 1 °C).

Principales parámetros de rendimiento del mecanismo de falla del carburo cementado

actuación	Rango de parámetros	Escenarios de fallo	Observación
Tasa de desgaste	<0,06 mm ³ /N·m ± 0,01 mm ³ /N·m	Brocas para minería, herramientas de corte para aviación, moldes resistentes al desgaste	Altas tasas de desgaste (>0,06 mm ³ / N · m ± 0,01 mm ³ / N · m) que conducen a una reducción de la vida útil de la herramienta (por ejemplo, herramienta <10 horas ±1 hora).
Longitud de la grieta	<0,1 mm ± 0,01 mm	Herramientas de aviación, brocas para minería	Las microfisuras (>0,1 mm ± 0,01 mm) provocan desconchado y reducen la fiabilidad.
Tasa de fracturas	<0,1%±0,02%	Herramientas de aviación, moldes	Un alto nivel de K _{1c} (12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5) reduce el riesgo de fractura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

actuación	Rango de parámetros	Escenarios de fallo	Observación
		resistentes al desgaste.	
Tasa de pelado	$<0,1\% \pm 0,02\%$	Brocas para minería, moldes resistentes al desgaste	La energía interfacial $>1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ reduce el desconchado.

Factores que afectan la falla por desgaste del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
dureza	Alto voltaje 1800 ± 30	HV 1800 ± 30 : tasa de desgaste $<0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; $<1500 \pm 30$: aumento del $30\% \pm 5\%$.	Asegúrese de que la dureza sea HV 1800 ± 30 .
Tamaño del grano	$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$	$0,51 \mu\text{m}$: baja tasa de desgaste; $>2 \mu\text{m}$: aumento del $20\% \pm 5\%$.	Seleccione WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.
Contenido conjunto	$10\% \pm 1\%$	10% menos de desgaste del adhesivo; $>12\%$ la tasa de desgaste aumenta en un $15\% \pm 3\%$.	Ajuste Co $10\% \pm 1\%$.
Rugosidad de la superficie	$Ra < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$	$Ra < 0,05 \mu\text{m}$, la tasa de desgaste es baja; $>0,1 \mu\text{m}$, aumenta en un $25\% \pm 5\%$.	Pulido a $Ra < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.
Temperatura de funcionamiento	$<800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$	$>800^\circ\text{C}$ El desgaste del adhesivo aumenta en un $50\% \pm 5\%$.	Utilice refrigerante para controlar la temperatura $<600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.
Tamaño de partícula abrasiva	$<50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$	$<50 \mu\text{m}$: tasa de desgaste $<0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$; $>100 \mu\text{m}$: la tasa de desgaste aumenta en un $40\% \pm 5\%$.	Controlar el tamaño de partículas abrasivas $<50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Factores que afectan la fractura y el desconchado del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Tenacidad (K_{Ic})	$>12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$	$K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la tasa de fractura es $<0,1\% \pm 0,02\%$; $<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, la tasa de fractura aumenta en un $50\% \pm 5\%$.	Asegúrese de que $K_{Ic} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.
Tamaño del grano	$0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$	La tasa de crecimiento de grietas de $0,51 \mu\text{m}$ es lenta; la tasa de fractura de $>2 \mu\text{m}$ aumenta en un $30\% \pm 5\%$.	Seleccione WC $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.
Contenido conjunto	$10\% \pm 1\%$	10% menos de descamación; $<6\%$ la tasa de descamación aumenta en un $20\% \pm 5\%$.	Ajuste Co $10\% \pm 1\%$.
Defectos superficiales	Grieta $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$	Para grietas $>0,1 \text{ mm}$, la tasa de fractura aumenta en un $50\% \pm 5\%$.	Se utilizó una tomografía computarizada para detectar grietas y pulir la superficie.
Factor de concentración de tensiones (K_t)	$<2 \pm 0,1$	$K_t > 3$, la tasa de pelado aumenta en un $40\% \pm 5\%$.	Esquinas redondeadas (radio $>0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), $K_t < 2 \pm 0,1$.
Energía de interfaz	$>1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$	$>1 \text{ J/m}^2$, la tasa de desconchado disminuye en un $20\% \pm$	Energía interfacial optimizada $>1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
		5%; <0,5 J/m ² , la tasa de desconchado aumenta en un 30% J/ m ² . ± 5%.	

Principales parámetros de rendimiento de la mejora del rendimiento del carburo cementado

actuación	Rango de parámetros	Escenario de aplicación	Observación
Dureza (HV)	18002500±30	Herramientas de aviación, brocas para minería, moldes resistentes al desgaste.	Los granos ultrafinos (<0,2 μm ± 0,01 μm) y el refuerzo de la superficie (como el revestimiento láser) pueden alcanzar >3000 ± 50.
Tenacidad (K _{1c})	1015 MPa·m ^{1/2} ± 0,5	Brocas para minería, moldes resistentes al desgaste	Los aditivos (VC, TaC) y la optimización de Co (10%±1%) aumentan K _{1c} a más de 12 MPa ·m ^{1/2} ± 0,5.
Vida de fatiga	>10 ⁵ veces ±10 ⁴ veces	Moldes resistentes al desgaste, brocas para minería	PIII (10 ¹⁸ cm ⁻² ± 10 ¹⁶ cm ⁻²) extiende la vida útil a >10 ⁶ veces ±10 ⁵ veces.
Tasa de desgaste	<0,06 ± 0,01 m ³ /N·m	Herramientas de aviación, brocas para minería	La implantación de iones y el revestimiento láser se pueden reducir a <0,04 mm ³ /N·m ± 0,01 mm ³ /N·m.

Refinamiento del grano y aditivos: factores que influyen en la mejora del rendimiento del carburo cementado

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Tamaño del grano	<0,5 μm ± 0,01 μm	Dureza <0,5 μm >2000 ± 30; Dureza >1 μm <1800 ± 30.	Seleccione WC < 0,5 μm ± 0,01 μm y molino de bolas durante 40 horas ± 1 hora.
Aditivos (VC/ TaC)	0,3% ± 0,01%	0,3% la dureza aumenta en un 5% ± 1%, K _{1c} aumenta en un 10% ± 2%; >0,5% fase frágil >1% ± 0,2%.	Añadir VC/ TaC 0,3% ± 0,01%.
Tiempo de molienda de bolas	40 horas ± 1 hora	Después de 40 horas, el tamaño de grano es <0,5 μm ± 0,01 μm; después de <20 horas, el tamaño de grano es >1 μm ± 0,01 μm.	Molino de bolas durante 40 h ± 1 h (500 rpm ± 10 rpm).
Temperatura de sinterización	1450 °C ± 10 °C	A 1450 °C, los granos son estables; a >1500 °C, los granos son >1 μm ± 0,01 μm.	Controlado a 1450°C±10°C, presión <10 ⁻³ Pa ± 10 ⁻⁴ Pa .
Contenido conjunto	10% ± 1%	10% K _{1c} >12 MPa·m ^{1/2} ± 0,5; <6% K _{1c} <10 MPa·m ^{1/2} ± 0,5.	Ajuste Co 10% ± 1%.
Adición de ZrC	0,2% ± 0,01%	0,2% dureza>2500±50;>0,5% K _{1c} disminuye en un 10%±2%.	Añadir ZrC 0,2% ± 0,01% para WC de grano ultrafino.

Factores que afectan el fortalecimiento de la superficie del carburo cementado y la mejora del rendimiento

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Temperatura de carburación	900 °C ± 10 °C	Se forma una capa de WC (1050 μm ± 1 μm, HV > 2500 ± 50) a 900 °C; la tasa de grietas es > 1 % ± 0,2 % a > 1000 °C.	Temperatura controlada: 900°C±10°C, caudal de CH ₄ : 10 L/min±0,1 L/min.
Dosis de iones	10 ¹⁷ cm ⁻² ± 10 ¹⁶ cm ⁻²	10 ¹⁷ cm ⁻² dureza >2200±30;>10 ¹⁸ cm ⁻² daño >1%±0,2%.	Usando N ⁺ , dosis 10 ¹⁷ cm ⁻² ± 10 ¹⁶ cm ⁻² , energía 100 keV ± 1 keV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

factor	Rango de parámetros	Impacto en el rendimiento	Sugerencias de optimización
Tamaño del grano	0,51 μm ± 0,01 μm	0,51 μm tiene el mejor efecto de fortalecimiento; el aumento de dureza >2 μm es <10 % ± 2 %.	Selecione WC 0,51 μm ± 0,01 μm.
Contenido conjunto	10% ± 1%	La capa de refuerzo del 10% es estable; la tasa de agrietamiento <6% aumenta en un 20% ± 5%.	Ajuste Co 10% ± 1%.
Rugosidad de la superficie	Ra<0,05 μm ± 0,01 μm	Ra<0,05 μm tiene una tasa de desgaste baja; >0,1 μm aumenta en un 15 % ± 3 %.	Pulido a Ra<0,05μm±0,01μm.
Potencia del láser	2 kW ± 0,1 kW	La capa de revestimiento de 2 kW es uniforme (espesor 50100 μm ± 1 μm); la tasa de grietas de >3 kW aumenta en un 10 % ± 2 %.	La potencia del láser se controló a 2 kW ± 0,1 kW y la velocidad de escaneo se controló a 10 mm/s ± 0,1 mm/s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

relación Hall-Petch ?

La relación de Hall-Petch es un modelo teórico clásico que describe la relación entre las propiedades mecánicas de los materiales (principalmente resistencia y dureza) y el tamaño de grano. Se utiliza ampliamente en metales, aleaciones y materiales cerámicos (como el carburo cementado WC-Co). Esta relación muestra que, a medida que disminuye el tamaño de grano, la resistencia y la dureza del material aumentan significativamente. El mecanismo principal es el efecto inhibitorio de los límites de grano en el movimiento de dislocación. La relación de Hall-Petch fue propuesta por primera vez por EO Hall y NJ Petch en 1951 y 1953, respectivamente, y se utiliza principalmente para estudiar el comportamiento mecánico de materiales policristalinos.

Conceptos básicos y fórmulas

La relación Hall-Petch se puede expresar mediante la siguiente fórmula matemática:

$$\sigma_y = \sigma_0 + k d^{-1/2}$$

或对于硬度:

$$HV = HV_0 + k' d^{-1/2}$$

其中:

- σ_y : 材料的屈服强度 (单位: MPa)。
- HV : 材料的硬度 (例如维氏硬度, 单位: HV)。
- σ_0 或 HV_0 : 单晶材料的屈服强度或硬度 (晶粒尺寸趋于无穷大时的极限值), 反映晶粒内部的固有阻力。
- k 或 k' : Hall-Petch常数, 与材料类型和晶界特性相关 (单位: $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 或 $\text{HV} \cdot \text{m}^{1/2}$)。
- d : 平均晶粒尺寸 (单位: m, 通常为 μm 量级)。
- $d^{-1/2}$: 晶粒尺寸的倒数平方根, 表示晶界密度的增加。

直观解释: 晶粒尺寸越小 (d 越小), $d^{-1/2}$ 越大, 晶界密度越高, 位错运动受阻越明显, 因此材料的强度和硬度 (σ_y 或 HV) 越高。

Mecanismo microscópico

La base física de la relación Hall-Petch reside en el efecto inhibitorio de los límites de grano sobre el movimiento de dislocación. Las propiedades mecánicas de los materiales policristalinos se ven afectadas principalmente por los siguientes mecanismos:

Los límites de grano dificultan el movimiento de dislocación :

En materiales policristalinos, los límites de grano entre los granos constituyen obstáculos naturales para el movimiento de las dislocaciones. Estas dislocaciones son portadoras de deformación plástica de los materiales. Cuando las dislocaciones se desplazan hacia los límites de grano, no pueden cruzarlos fácilmente debido a la diferencia de orientación de estos (el ángulo de deflexión suele ser de 20° a 40°) y a su energía ($>1,5 \text{ J/m}^2$) .

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

Las dislocaciones se acumulan en los límites de grano, formando amontonamientos que provocan concentraciones locales de tensiones. Cruzar los límites de grano requiere tensiones aplicadas más altas, lo que se manifiesta en un aumento del límite elástico.

Aumento de la densidad del límite de grano :

A medida que disminuye el tamaño del grano (p. ej., de $2\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$), la densidad de los límites de grano aumenta significativamente (de $\sim 10^{12}\text{ m}^{-2}$ a $>10^{13}\text{ m}^{-2}$). Cuanto mayor sea la densidad de los límites de grano, mayores serán los obstáculos al movimiento de dislocación por unidad de volumen, y la resistencia y la dureza del material aumentarán en consecuencia.

disminuye de $2\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$, la densidad del límite de grano aumenta aproximadamente 4 veces y el aumento de dureza puede alcanzar el 25%-30% (como de HV 1200 a HV 1600).

Mecanismo de fortalecimiento de Orowan :

Los límites de grano mejoran las propiedades del material al fijar las dislocaciones (similar al mecanismo de fortalecimiento de Orowan).

晶界通过钉扎位错（类似Orowan强化机制）增强材料性能。位错绕过晶界的剪应力 (τ) 与晶界间距 (λ) 相关: $\tau \sim Gb/\lambda$, 其中 G 为剪切模量, b 为伯氏矢量, λ 与晶粒尺寸 d 成正比 ($\lambda \sim d$)。晶粒尺寸越小, λ 越小, 剪应力越高, 材料越强硬。

Migración y estabilidad de los límites de grano :

La estabilidad termodinámica de los límites de grano influye significativamente en la relación Hall-Petch. La velocidad de migración de los límites de grano (generalmente $<10^{-10}\text{ m/s}$) está controlada por la temperatura de sinterización ($1400\text{-}1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) y los aditivos (como VC 0,2-0,5%), y la barrera de migración es de 80-120 kJ/mol. Unos límites de grano estables (baja velocidad de migración) contribuyen a mantener una estructura de grano fina y, por lo tanto, una alta resistencia.

Ámbito de aplicación de la relación Hall-Petch

La relación Hall-Petch funciona muy bien dentro de un cierto rango de tamaños de grano, pero falla en casos extremos:

de grano grande, $>0,2\text{ }\mu\text{m}$) :

Para la mayoría de los carburos cementados (como el WC-Co), la relación Hall-Petch se cumple cuando el tamaño de grano se encuentra en el rango de $0,2\text{ }\mu\text{m}$ a $10\text{ }\mu\text{m}$. Por ejemplo, cuando el tamaño de grano del WC-10Co disminuye de $2\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$, la dureza aumenta de HV 1200 a HV 1600, un incremento de aproximadamente un 25 %-30 %, y el límite elástico aumenta aproximadamente un 20 %-25 % (de 3500 MPa a 4500 MPa).

En este momento, el principal mecanismo de fortalecimiento es el límite de grano que obstaculiza el movimiento de dislocación.

de falla (el tamaño del grano es demasiado pequeño, $<0,2\text{ }\mu\text{m}$) :

de grano se reduce a la nanoescala ($<0,2\text{ }\mu\text{m}$, por ejemplo, $<100\text{ nm}$), la relación Hall-Petch puede fallar y producirse el "efecto Hall-Petch inverso". En este caso, el deslizamiento del límite de grano

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se convierte en el principal mecanismo de deformación, lo que resulta en una disminución de la resistencia y la dureza.

Motivo: La proporción de límites de grano es demasiado alta (>50%), la energía de la interfaz domina el rendimiento ($>1,5 \text{ J/m}^2$), el deslizamiento y la difusión de los límites de grano (como la fluencia de Coble) se intensifican y la tenacidad disminuye (K_{Ic} cae de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $<8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

de grano WC se reduce de $0,5 \mu\text{m}$ a $0,1 \mu\text{m}$, la dureza puede caer de HV 1600 a HV 1400 y la tenacidad disminuye significativamente ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Condiciones de alta temperatura :

A altas temperaturas ($>800 \text{ }^\circ\text{C}$), la velocidad de migración del límite de grano aumenta ($>10^{-9} \text{ m/s}$) y los granos pueden crecer de forma anormal ($>2 \mu\text{m}$), lo que resulta en un debilitamiento del efecto Hall-Petch. Por ejemplo, a $1000 \text{ }^\circ\text{C}$, el tamaño de grano del WC-10Co puede aumentar de $0,5 \mu\text{m}$ a $2 \mu\text{m}$, y la dureza disminuye entre un 10 % y un 15 % (de HV 1600 a HV 1400).

Factores que afectan la relación Hall-Petch

El desempeño de la relación Hall-Petch se ve afectado por los siguientes factores:

Tamaño de grano (d) :

El tamaño del grano es la variable clave de la relación Hall-Petch. Cuanto más pequeño sea el grano, mayor será la densidad del borde de grano y más evidente será el efecto de endurecimiento. Por ejemplo, al reducir el tamaño del grano de WC de $1 \mu\text{m}$ a $0,5 \mu\text{m}$, la dureza aumenta entre un 15 % y un 20 %.

Sin embargo, los granos que son demasiado pequeños ($<0,2 \mu\text{m}$) provocarán el efecto Hall-Petch inverso, y se necesitan aditivos (como VC 0,2%-0,5%) para inhibir el deslizamiento del límite de grano.

Tipo de material y características del límite de grano :

Hall-Petch常数 k 与材料类型和晶界特性密切相关。对于硬质合金WC-Co, k 值通常在 $0.5-1.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 之间, 受Co含量和晶界强度影响。

Co含量高 (如15%) 时, 晶界润湿性增强 (接触角 $<15^\circ$), 晶界强度降低 ($<100 \text{ MPa}$), k 值减小, 强化效果减弱; Co含量低 (如6%) 时, 晶界强度高 ($>150 \text{ MPa}$), k 值增大。

3. Aditivos :

La adición de inhibidores de grano (como VC 0,2-0,5%, Cr_3C_2 0,1-0,3%) puede reducir el tamaño del grano y potenciar el efecto Hall-Petch. Por ejemplo, la adición de 0,4% de VC puede reducir el tamaño del grano de WC de $1 \mu\text{m}$ a $0,5 \mu\text{m}$ y aumentar la dureza entre un 5% y un 10% (de HV 1500 a HV 1600).

Sin embargo, el exceso de aditivos ($>0,8\%$) puede formar fases frágiles (como la fase VCx, relación $>0,5\%$) y reducir la tenacidad ($K_{Ic} < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Proceso de sinterización :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La temperatura de sinterización (1400-1500 °C) y el vacío ($<10^{-2}$ Pa) afectan el tamaño del grano y la estabilidad del límite de grano. Una temperatura demasiado alta (>1550 °C) provocará un crecimiento del grano ($>2\text{ }\mu\text{m}$) y una disminución de la dureza del 10 % al 15 %.

Por ejemplo, cuando el WC-10Co se sinteriza a 1450 °C, el tamaño de grano permanece en $0,5\text{ }\mu\text{m}$ y la dureza alcanza HV 1600; cuando se sinteriza a 1600 °C, el tamaño de grano crece a $2\text{ }\mu\text{m}$ y la dureza desciende a HV 1400.

Co contenido :

El contenido de Co afecta la humectabilidad del límite de grano y la capacidad de deformación plástica. Cuando el contenido de Co es bajo (p. ej., 6%), el efecto de refuerzo del límite de grano es significativo y la dureza es alta (HV > 1600); cuando el contenido de Co es alto (p. ej., 15%), el límite de grano se ablanda y la dureza disminuye (HV < 1200).

Por ejemplo, WC-6Co (tamaño de grano de $0,5\text{ }\mu\text{m}$) tiene una dureza de HV 1700, mientras que WC-15Co (mismo tamaño de grano) tiene una dureza de solo HV 1200.

Defectos microscópicos :

La porosidad ($>1\%$) y las microfisuras (longitud $>0,05\text{ mm}$) debilitan el efecto de refuerzo del límite de grano y reducen la dureza y la resistencia. Por ejemplo, un aumento de la porosidad del 0,5% al 2% reduce la dureza en aproximadamente un 5% (de HV 1600 a HV 1520).

Aplicación de carburo cementado

En carburos cementados (como WC-Co), la relación Hall-Petch se utiliza ampliamente para controlar el tamaño del grano y optimizar las propiedades:

El refinamiento del grano aumenta la dureza :

El tamaño de grano se redujo de $2\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$ mediante molienda de bolas de alta energía (300-500 rpm, 20-40 horas), adición de inhibidores de grano (como VC 0,2%-0,5%) y un proceso de sinterización optimizado (1400-1500 °C, vacío $<10^{-2}$ Pa).

Resultado: La dureza aumentó de HV 1200 a HV 1600 y el límite elástico aumentó de 3500 MPa a 4500 MPa, cumpliendo con los requisitos de corte de alta velocidad ($>800\text{ m/min}$).

Equilibrio entre dureza y tenacidad :

Los granos demasiado pequeños ($<0,2\text{ }\mu\text{m}$) reducen la tenacidad ($K_{IC} < 8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), lo cual no es adecuado para aplicaciones de alto impacto (como brocas de minería). Por lo tanto, el tamaño de grano debe controlarse en un rango de $0,5$ a $1\text{ }\mu\text{m}$ para lograr un equilibrio entre dureza (HV 1600) y tenacidad ($K_{IC} 12-14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Por ejemplo, WC-10Co (tamaño de grano de $0,5\text{ }\mu\text{m}$) tiene una dureza de HV 1600 y un K_{IC} de $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo que lo hace adecuado para herramientas de aviación.

Optimización de aplicaciones de ingeniería :

μm a través de la relación Hall-Petch, la dureza alcanza HV 1700 y la vida útil de corte >15 horas. Broca para minería: tamaño de grano $0,8\text{ }\mu\text{m}$, dureza HV 1500, $K_{IC} 13\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, distancia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

perforación >1200 m.

Molde resistente al desgaste: tamaño de grano $0,5\ \mu\text{m}$, dureza HV 1600, tiempos de extrusión >10⁶ veces.

Limitaciones y desafíos

Aunque la relación Hall-Petch se utiliza ampliamente en carburos cementados, también presenta las siguientes limitaciones y desafíos:

Efecto Hall-Petch inverso :

Si el tamaño de grano es demasiado pequeño ($<0,2\ \mu\text{m}$) , la deformación se debe principalmente al deslizamiento y la difusión de los límites de grano, y la resistencia y la dureza disminuyen. Por ejemplo, si el tamaño de grano de WC se reduce de $0,5\ \mu\text{m}$ a $0,1\ \mu\text{m}$, la dureza puede disminuir de HV 1600 a HV 1400.

Desafíos de la estabilidad del límite de grano :

de sinterización (>4 horas) provocará el crecimiento del grano ($>2\ \mu\text{m}$) , lo que reduce el efecto Hall-Petch. Se debe agregar VC o Cr_3C_2 para inhibir el crecimiento del grano.

Riesgos de reducción de la resiliencia :

Aunque el refinamiento del grano aumenta la dureza, puede conducir a una disminución de la tenacidad ($K_{IC} < 10\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , y el rendimiento debe equilibrarse optimizando el contenido de Co (8%-12%) y el tamaño del grano ($0,5\text{-}1\ \mu\text{m}$) .

El impacto de los microdefectos :

La porosidad (>1%) y las microfisuras (longitud >0,05 mm) pueden debilitar el efecto de refuerzo del límite de grano. Por ejemplo, la dureza del WC-10Co altamente poroso (2% de porosidad) es de tan solo HV 1520, muy inferior a la esperada (HV 1600).

Tendencia de desarrollo

Con el desarrollo de la ciencia de los materiales y la fabricación inteligente, se está profundizando la aplicación de la relación Hall-Petch en el carburo cementado:

Tecnología de cristales nanocristalinos y ultrafinos :

Desarrollar carburos cementados de grano ultrafino ($<0,5\ \mu\text{m}$) y nanocristalinos ($<100\ \text{nm}$) con una dureza de hasta HV 2000, pero es necesario resolver el problema del deslizamiento del límite de grano (por ejemplo, añadiendo TaC 0,2 %-0,5% para mejorar la resistencia del límite de grano).

Diseño de estructura de gradiente :

La relación Hall-Petch se utiliza para diseñar un carburo cementado de estructura gradiente con granos superficiales finos ($0,2\text{-}0,5\ \mu\text{m}$, dureza HV 1700) y granos internos ligeramente más grandes ($1\text{-}2\ \mu\text{m}$, $K_{IC} > 14\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) , logrando una optimización sinérgica de dureza y tenacidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimización asistida por IA :

de predicción > 90%) y optimizar los parámetros de molienda de bolas y sinterización. Por ejemplo, el aprendizaje automático permite predecir el tamaño de grano óptimo ($0,5\ \mu\text{m}$) con una desviación de dureza <2%.

Rendimiento mejorado a altas temperaturas :

Desarrollar inhibidores de límites de grano estables a altas temperaturas (como ZrC 0,1%-0,3%) para mantener el tamaño de grano ($<1\ \mu\text{m}$) a $>800\ ^\circ\text{C}$ y mantener el efecto Hall-Petch.

En resumen, la relación Hall-Petch revela la influencia del tamaño de grano en las propiedades mecánicas del carburo cementado y constituye la base teórica para el refinamiento del grano y la optimización del rendimiento. Mediante una regulación racional del tamaño de grano y las características del límite de grano, se pueden mejorar significativamente la dureza y la resistencia, pero es fundamental prestar atención al equilibrio entre la tenacidad y la estabilidad a altas temperaturas. Con la introducción de nuevas tecnologías y la fabricación inteligente, la relación Hall-Petch desempeñará un papel cada vez más importante en el campo del carburo cementado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice

¿Qué es el carburo cementado con estructura de gradiente?

El carburo cementado con estructura de gradiente se refiere a un tipo de carburo cementado (WC-Co) que está diseñado y regulado para que su microestructura o composición (como el tamaño del grano, el contenido de la fase de unión o la distribución de aditivos) presente un cambio de gradiente a lo largo de una dirección específica (como de la superficie al interior) dentro del material. Esta estructura está diseñada para combinar las ventajas de rendimiento de diferentes regiones, como la alta dureza superficial y la alta tenacidad interna, para cumplir con los requisitos integrales de rendimiento de las duras condiciones de trabajo (como las herramientas de aviación y los taladros de minería). En comparación con el carburo cementado tradicional, el carburo cementado con estructura de gradiente tiene ventajas significativas en la optimización del rendimiento, pero también plantea nuevos desafíos a los grados y métodos de producción tradicionales, y al mismo tiempo impone mayores requisitos al agente de inteligencia artificial de control de diseño de producción inteligente.

Conceptos y principios básicos de la estructura de gradiente del carburo cementado

El carburo cementado generalmente se compone de una fase dura (como WC, que tiene alta dureza pero alta fragilidad) y una fase de enlace (como Co, que tiene buena tenacidad pero baja dureza). El carburo cementado tradicional (como YG6, YG8 y otros grados) tiene una microestructura uniforme, y el contenido de Co y el tamaño de grano son básicamente consistentes en todo el material, lo que dificulta cumplir con los requisitos de alta dureza y alta tenacidad al mismo tiempo. Por ejemplo, YG6 (Co 6%) tiene alta dureza (HV 1600-1700), pero baja tenacidad ($K_{IC} \approx 8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$); YG15 (Co 15%) tiene buena tenacidad ($K_{IC} \approx 14-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), pero dureza reducida (HV 1200-1300).

El carburo cementado con estructura de gradiente logra una optimización sinérgica de las funciones al introducir gradientes de rendimiento en diferentes áreas del material:

superficie

El contenido de Co es bajo (como 4%-6%), el tamaño de grano es fino (como $0,2-0,5 \mu\text{m}$), la dureza es alta (HV 1600-1800), la resistencia al desgaste es fuerte y es adecuado para soportar alta fricción y desgaste.

Capa intermedia

de Co y el tamaño del grano cambian gradualmente (por ejemplo, Co 8%-10%, grano $0,5-1 \mu\text{m}$), espesor 0,5-2 mm y alivian la concentración de tensión de la interfaz ($<80 \text{ MPa}$).

interno

El contenido de Co es relativamente alto (por ejemplo, 12%-15%), el tamaño de grano es ligeramente mayor (por ejemplo, $1-2 \mu\text{m}$), la tenacidad es excelente ($K_{IC} \approx 14-16 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), la resistencia al impacto es fuerte y puede absorber la energía de la grieta y prevenir la fractura.

Esta distribución de gradiente se logra regulando la difusión de Co, el crecimiento del grano y los procesos de sinterización. Las propiedades mecánicas se basan en la teoría de materiales compuestos

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

(como el modelo de Voigt, $E \sim V_{WC} \cdot E_{WC} + V_{Co} \cdot E_{Co}$) y la relación de Hall-Petch ($\sigma \sim d^{-1/2}$), de modo que el material presenta diferente dureza, resistencia y tenacidad a diferentes profundidades. La estructura del gradiente también se puede optimizar aún más controlando la energía de la interfaz ($<1,5 \text{ J/m}^2$) y la dinámica del límite de grano (velocidad de migración $<10^{-10} \text{ m/s}$).

Método de diseño de estructura de gradiente

El diseño de carburo cementado con estructura de gradiente se centra principalmente en los siguientes aspectos:

Gradiente de contenido de Co:

El contenido de Co en la superficie es bajo (4%-6%), la capa intermedia tiene 8%-10% y aumenta gradualmente hasta 12%-15% en el interior.

Principio: Cuando el contenido de Co es bajo, la fracción de volumen de WC es alta ($>90\%$) y se mejora la dureza; cuando el contenido de Co es alto, se mejora la capacidad de deformación plástica (velocidad de deformación $\sim 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) y se mejora la tenacidad.

Método de implementación: Mediante la proporción de polvo estratificado (la proporción de polvo de Co aumenta de afuera hacia adentro) o controlando la velocidad de difusión de Co durante la sinterización ($<10 \text{ cm}^2/\text{s}$). Por ejemplo, se apilan tres capas de polvo: capa superficial de Co 4%, capa intermedia de Co 8% y capa interna de Co 12%, y se forma un gradiente mediante sinterización en fase líquida.

Gradiente de tamaño de grano:

Los granos superficiales son finos ($0,2-0,5 \mu\text{m}$), la capa intermedia es de $0,5-1 \mu\text{m}$ y los granos internos son ligeramente más grandes ($1-2 \mu\text{m}$).

Principio: Los granos pequeños aumentan la dureza y la resistencia a través del efecto Hall-Petch ($HV \sim d^{-1/2}$); los granos más grandes reducen el deslizamiento del límite de grano (área del límite de grano $<10^{-13} \text{ m}^{-2}$) y mejoran la tenacidad.

Método de implementación: Añadir inhibidores de grano en la superficie (como VC 0,2%-0,5%, Cr_3C_2 0,1%-0,3%), reducir los inhibidores en la capa intermedia y en el interior; o controlar la tasa de crecimiento del grano mediante sinterización en capas (superficie $<10^{-10} \text{ m/s}$, ligeramente más alta en el interior).

Gradiente de distribución aditivo:

Agregue más VC o Cr_3C_2 (0,2%-0,5%) en la superficie para inhibir el crecimiento del grano y mejorar la dureza; agregue una pequeña cantidad de TaC (0,1%-0,3%) en la capa intermedia para aumentar la resistencia del límite del grano ($>150 \text{ MPa}$); agregue TaC (0,2%-0,5%) en el interior para mejorar aún más la tenacidad.

Método de implementación: Relación de aditivos estratificados, combinada con el control del proceso de sinterización. Por ejemplo, añadir 0,4 % de VC a la capa superficial, 0,2 % de TaC a la capa intermedia y 0,3 % de TaC a la capa interna.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gradiente funcional:

Se introduce un recubrimiento resistente al desgaste (como CrN o TiN, espesor 2-4 μm , dureza HV 3000-3500) en la superficie, la capa intermedia optimiza la resistencia a la fatiga (tasa de crecimiento de grietas $da/dN < 10^{-7} \text{ mm / ciclo}$) y la parte interna optimiza la resistencia al impacto (energía de impacto $> 18 \text{ J}$).

Método de implementación: Combinación de modificación de la superficie (como carburación, implantación de iones) y optimización de la microestructura interna.

Gradiente multifásico:

Al introducir una estructura multifásica, como agregar una pequeña cantidad de TiC (dureza $> 2000 \text{ HV}$, 5%-10%) en la superficie para mejorar la resistencia al desgaste, la capa intermedia es una capa de transición WC-Co y la estructura WC-Co se mantiene en el interior para garantizar la tenacidad. Método de implementación: Añadir polvo de TiC en capas y formar un gradiente multifásico a través de la sinterización.

Diversificación de direcciones de gradiente:

Además de los gradientes radiales desde la superficie hacia el interior, también se pueden diseñar gradientes laterales (como alta dureza del filo de la herramienta y alta tenacidad de la pieza de sujeción) o gradientes multidireccionales (adecuados para piezas geométricas complejas).

Método de implementación: Utilice tecnología de impresión 3D (como la fusión selectiva por láser SLM) para controlar con precisión la composición y la estructura de cada área.

Tecnología de preparación de carburo cementado con estructura de gradiente

La preparación de carburo cementado con estructura de gradiente debe lograrse mediante los siguientes procesos:

Dosificación y conformación de polvos

El cuerpo verde se preparó mediante el método de polvo estratificado, utilizando polvos mixtos de WC-Co con diferentes contenidos de Co, tamaños de grano o proporciones de aditivos en la superficie, el centro y el interior. Por ejemplo, capa superficial (Co 4 %, WC 0,5 μm), capa intermedia (Co 8 %, WC 1 μm) y capa interna (Co 12 %, WC 1,5 μm).

El prensado isostático en frío (CIP, presión 200-300 MPa) se utiliza para garantizar la densidad ($> 99\%$) y la uniformidad (porosidad $< 0,5\%$) del cuerpo verde.

Requisitos de precisión: desviación de la relación de polvo $< 0,1\%$, desviación del espesor de la capa $< 0,02 \text{ mm}$, resistencia de unión entre capas $> 50 \text{ MPa}$.

Proceso de sinterización:

Sinterización en fase líquida (1400-1500 $^{\circ}\text{C}$, 1-3 horas, grado de vacío $< 10^{-2} \text{ Pa}$), la velocidad de difusión de Co ($< 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$) está controlada por el gradiente de temperatura y el tiempo para formar una distribución de gradiente.

gradiente de temperatura de sinterización

La temperatura de la superficie es ligeramente inferior (1400 $^{\circ}\text{C}$), lo que inhibe el crecimiento del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grano; la capa intermedia es de 1420 °C y la parte interna es de 1450-1500 °C, lo que promueve la difusión de Co y el crecimiento moderado del grano.

Atmósfera de sinterización: vacío o atmósfera de Ar (pureza > 99,99%), evitar la oxidación (contenido de O₂ < 0,5 ppm), reducir los defectos del borde de grano (< 0,2%).

Velocidad de enfriamiento: controlada a 3-5°C/min para evitar estrés térmico (<100 MPa); si >10°C/min, la tasa de microfisuras es >0,5%.

Tratamiento térmico y modificación de superficies

El recocido (550-650 °C, 1-2 horas) reduce la tensión interna de la fase Co (<50 MPa) y aumenta el K_{1c} en aproximadamente un 5 %.

Carburación superficial (850-950°C, atmósfera de CH₄, espesor de la capa de carbono 10-30 μm) o implantación de iones (N⁺, dosis 10¹⁶-10¹⁷ cm⁻², energía 80-120 keV) para formar una capa de alta dureza (HV 1800-2000).

El revestimiento láser (potencia 1,5-2,5 kW, espesor 50-100 μm) forma una capa de dureza ultra alta (HV>2500).

La implantación de iones mejorada con plasma (PIII, dosis 10¹⁷-10¹⁸ cm⁻²) mejora la resistencia al desgaste profundo (profundidad > 0,5 μm).

Monitoreo y control en línea

utilizando un analizador de tamaño de partículas láser (desviación <0,02 μm) y la tensión del límite de grano (<100 MPa) se evaluó mediante difracción de rayos X (XRD, desviación del ancho de pico <0,2°).

El proceso de sinterización se monitoreó en tiempo real utilizando un sensor de temperatura (precisión ±2°C), un sensor de presión (precisión ±10⁻³ Pa) y un microscopio en línea (resolución <0,1 μm) para asegurar la consistencia de la estructura del gradiente (desviación <0,5%).

Se utilizó tecnología de emisión acústica (rango de frecuencia 20 kHz-500 kHz) para detectar microfisuras (longitud > 0,05 mm) durante el proceso de sinterización.

Características de rendimiento y ventajas del carburo cementado con estructura de gradiente

El carburo cementado con estructura de gradiente exhibe las siguientes características a través de la optimización coordinada del rendimiento:

Equilibrio entre dureza y tenacidad

Alta dureza superficial (HV 1600-1800) y excelente tenacidad interna (K_{1c} 14-16 MPa·m^{1/2}), superando la contradicción entre dureza y tenacidad del carburo cementado tradicional.

Por ejemplo, el gradiente WC-10Co con 4% de Co en la superficie y grano de 0,5 μm tiene una dureza de HV 1700, 12% de Co en el interior y K_{1c} 14 MPa·m^{1/2}, y su rendimiento integral es mejor que el del YG8 tradicional (Co 8%, HV 1500, K_{1c} 12 MPa·m^{1/2}).

Mejora sinérgica de la resistencia al desgaste y al impacto.

La alta dureza superficial y el bajo contenido de Co reducen la tasa de desgaste (<0,08 mm³ / N·m); el alto contenido de Co en el interior aumenta la energía de impacto (18-20 J).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Adecuado para escenarios de alta fricción e impacto, como brocas mineras con una vida útil de >1500 m en perforación de roca dura, que es un 50% más alta que la YG6 tradicional.

Excelente rendimiento antifatiga

mejora la vida útil por fatiga ($>10^5$ veces) al reducir la iniciación de grietas superficiales (longitud de grieta $<0,05$ mm) y la tasa de crecimiento de grietas internas ($da/dN < 10^{-7}$ mm/ciclo).

Por ejemplo, la vida útil del gradiente WC-10Co bajo carga cíclica (relación de tensión $R = 0,1$, frecuencia 5-15 Hz) es entre un 20 % y un 30 % mayor que la del YG10 tradicional (Co 10 %).

Resistencia al choque térmico

La estructura de gradiente reduce la concentración de tensión térmica (<80 MPa) y mejora la resistencia al choque térmico en un 15%-20% en condiciones de alta temperatura (>800 °C), lo que la hace adecuada para herramientas de aviación (temperatura de corte >800 °C).

Resistencia a la corrosión

El bajo contenido de Co en la superficie reduce la sensibilidad a la corrosión (tasa de disolución $<10^{-1}$ g/cm² · s) y mejora la resistencia a la corrosión en un 10%-15% en entornos ácidos (pH <5), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de ingeniería marina.

Adaptarse a duras condiciones de trabajo

En entornos con altas temperaturas (>800 °C), altos impactos (>500 Hz), alta tensión (>80 MPa) y corrosivos (concentración de NaCl del 3,5 %), la estructura de gradiente puede prolongar eficazmente la vida útil. Por ejemplo, la vida útil de las brocas para perforación en aguas profundas se incrementa en un 50 % y la de los moldes de pastillas de freno para trenes de alta velocidad, en un 60 %.

Desafíos del carburo cementado con estructura de gradiente frente a los grados tradicionales de carburo cementado

La introducción del carburo cementado con estructura de gradiente ha traído consigo muchos desafíos a los grados de carburo cementado tradicionales (como las series YG y YT):

Se revelaron limitaciones de rendimiento

Los grados tradicionales presentan una estructura uniforme y son difíciles de satisfacer las necesidades de condiciones de trabajo complejas. Por ejemplo, el YG6 (Co 6%) presenta una alta dureza (HV 1600), pero es fácil de romper en entornos de alto impacto (como la minería) ($K_{1c} < 10$ MPa·m^{1/2}); el YG15 (Co 15%) presenta buena tenacidad ($K_{1c} 14-16$ MPa·m^{1/2}), pero presenta una dureza insuficiente (HV <1300) y una baja resistencia al desgaste.

El carburo cementado con estructura de gradiente supera el límite de rendimiento de los grados tradicionales al combinar una alta dureza superficial (HV 1700) y una alta tenacidad interna ($K_{1c} 14$ MPa·m^{1/2}). Por ejemplo, la vida útil de corte (>15 horas) del WC-10Co con gradiente en herramientas de aviación es un 25 % mayor que la del YG8.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Competencia en áreas de aplicación

Los grados tradicionales aún ofrecen ventajas en áreas específicas (como escenarios de bajo impacto y baja fricción), como el YG3 (Co 3%) para corte con baja carga. Sin embargo, el carburo cementado con estructura de gradiente es más competitivo en escenarios de alta carga y multifuncionalidad (como la aviación y las aguas profundas). Por ejemplo, la distancia de perforación del WC-10Co con gradiente en brocas para aguas profundas (>1500 m) supera con creces la del YG8 (<1000 m).

Las marcas tradicionales necesitan mejorar sus fórmulas o introducir estructuras de gradiente para mantener su competitividad en el mercado, de lo contrario podrían quedar eliminadas gradualmente en el mercado de alta gama.

Complejidad del proceso de producción

El proceso de producción de los grados tradicionales es sencillo (proporción uniforme de polvo + sinterización simple) y de bajo costo (aproximadamente 50-60 yuanes/kg). El carburo cementado con estructura en gradiente requiere la mezcla de polvo en capas, la sinterización en gradiente y la monitorización en línea, lo cual resulta complejo y aumenta el costo entre un 15% y un 20% (aproximadamente 60-70 yuanes/kg).

Los equipos de producción tradicionales (como los hornos de sinterización comunes) difícilmente pueden cumplir con los requisitos de precisión de las estructuras de gradiente (como la desviación de distribución de Co <0,5 %) y necesitan actualizarse a equipos de alta precisión (como hornos de sinterización de gradiente con una precisión de control de gradiente de temperatura de ± 2 °C/cm).

El desafío de la estandarización

Los grados tradicionales cuentan con estándares consolidados (como ISO K10, K20 y P10), parámetros de rendimiento claros y son fáciles de producir y aplicar en masa. El carburo cementado con estructura de gradiente presenta un rendimiento que varía con la profundidad y es difícil de definir con un único estándar, por lo que es necesario establecer un nuevo sistema de evaluación del rendimiento (como ensayos por capas de dureza y tenacidad).

K₁₀ c 14 MPa·m^{1/2}) WC-10Co no se puede adaptar directamente al estándar ISO tradicional, lo que puede generar confusión a los usuarios al momento de seleccionar materiales.

Aceptación y promoción del mercado

Los grados tradicionales tienen una larga trayectoria y un alto reconocimiento en el mercado, y los usuarios están familiarizados con su rendimiento y gama de aplicaciones. Como tecnología emergente, el carburo cementado con estructura de gradiente necesita generar confianza mediante la verificación de aplicaciones a largo plazo (como las pruebas de vida útil de las herramientas en la aviación).

En las primeras etapas de promoción, es necesario abordar las inquietudes de los usuarios sobre los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

costos y la estabilidad del rendimiento, por ejemplo, demostrando sus ventajas mediante proyectos de demostración (como aumentar la vida útil de las brocas de minería en un 50%).

Adaptabilidad de la cadena de suministro y selección de materiales

La cadena de suministro de los grados tradicionales es madura, las materias primas (como el polvo de WC y el polvo de Co) tienen especificaciones uniformes y el costo de adquisición es bajo. El carburo cementado con estructura de gradiente requiere polvos de diversas especificaciones (como WC con diferentes tamaños de partícula y distintos contenidos de Co), lo que incrementa la complejidad y el costo de la cadena de suministro.

Los usuarios deben reevaluar sus estrategias de selección de materiales. El método tradicional de selección simple de grados (como el basado en la dureza o el contenido de Co) ya no es aplicable, y es necesario implementar pruebas de rendimiento por capas y análisis de simulación.

Requisitos para el agente de IA de control de diseño de producción inteligente

La producción de carburo cementado con estructura de gradiente ha planteado mayores exigencias para la fabricación inteligente. El agente de IA para el control del diseño de producción inteligente debe contar con las siguientes capacidades para lograr una producción eficiente, precisa y estable:

Predicción y optimización de la microestructura

Requisitos de capacidad: el agente de IA debe predecir el impacto del contenido de Co, el tamaño de grano y la relación aditiva en el rendimiento a través de algoritmos de aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo (DL) (como la máquina de vectores de soporte SVM, la red neuronal profunda DNN) (precisión de predicción > 90%).

Funciones específicas

Basándose en datos históricos y modelos físicos (como la relación Hall-Petch, el modelo de Voigt), se predice el gradiente óptimo de contenido de Co (por ejemplo, 4% en la superficie, 8% en la capa media y 12% en el interior, con una desviación de <0,2%).

La distribución optimizada del tamaño de grano (0,5 μm en la superficie, 1 μm en la capa intermedia, 1,5 μm en el interior, con una desviación de <0,02 μm) garantiza una mejora sinérgica en la dureza (HV 1700) y tenacidad (K_{IC} c 14 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Relación de aditivos recomendada (como VC 0,4%, TaC 0,2%, Cr_3C_2 0,1%, desviación de la relación <0,05%) para mejorar la consistencia del rendimiento (desviación <0,5%).

Simular el rendimiento en capas de estructuras de gradiente (como la resistencia al desgaste de la superficie y la resistencia al impacto interno) para optimizar las soluciones de diseño.

Monitoreo y control de parámetros de proceso en tiempo real

Requisitos de capacidad: El agente de IA debe combinar la tecnología del Internet industrial de las cosas (IIoT) para monitorear y controlar los parámetros de producción en tiempo real (desviación <1%) a través de sensores integrados y computación de borde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Funciones específicas

de grano (precisión $\pm 0,005 \mu\text{m}$) y la distribución de aditivos (desviación $< 0,1\%$).

Ajuste en tiempo real de los parámetros de sinterización: temperatura ($1400-1500^\circ\text{C}$, precisión $\pm 2^\circ\text{C}$), grado de vacío ($< 10^{-2} \text{ Pa}$, precisión $\pm 10^{-3} \text{ Pa}$), tasa de difusión de Co ($< 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$, desviación $< 5\%$).

Controlar la velocidad de enfriamiento ($3-5^\circ\text{C}/\text{min}$, desviación $< 0,2^\circ\text{C}/\text{min}$) para evitar estrés térmico ($< 100 \text{ MPa}$) y microfisuras (tasa $< 0,5\%$).

Controlar la resistencia de unión entre capas ($> 50 \text{ MPa}$) y evitar defectos de delaminación (longitud de grieta $> 0,05 \text{ mm}$).

Predicción de fallos y control de calidad

Requisitos de capacidad: El agente de IA debe predecir posibles riesgos de fallas en el proceso de producción (como segregación de Co, crecimiento anormal de granos) a través de redes neuronales (como RNN, LSTM) e intervenir con anticipación (tiempo de avance de predicción $> 10^3$ veces).

Funciones específicas

predijo la desviación de la distribución de Co ($> 1\%$) causada por μm y se ajustó con antelación el tiempo de sinterización (1-3 horas, desviación $< 0,1$ hora).

un crecimiento anormal del grano ($> 2 \mu\text{m}$) y el crecimiento se inhibió ajustando la cantidad de adición de VC ($0,2\%-0,5\%$).

Combinando sensores de emisión acústica (precisión de frecuencia $\pm 2 \text{ kHz}$) y tomografía computarizada (precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$), se pueden detectar microfisuras (longitud $> 0,05 \text{ mm}$) en tiempo real, reduciendo la tasa de fallos ($< 0,1\%$).

Detectar la concentración de tensión interlaminar ($K_t > 1,5$) y evitar el desprendimiento de la interfaz (profundidad $> 5 \mu\text{m}$).

Optimización de procesos y toma de decisiones inteligente

Requisitos de capacidad: El agente de IA debe optimizar los parámetros del proceso de producción a través de algoritmos genéticos (GA) o aprendizaje de refuerzo (RL) para mejorar la eficiencia de la producción (aumento del $15\%-20\%$) y la consistencia del rendimiento (desviación $< 2\%$).

Funciones específicas

Se optimizó la proporción de polvo en capas (superficie Co 4% , capa intermedia 8% , capa interna 12% , desviación $< 0,1\%$) para garantizar la uniformidad de la estructura del gradiente.

Se ajustó el gradiente de temperatura de sinterización (1400°C para la superficie, 1420°C para la capa intermedia y 1450°C para la capa interna, con una desviación de $\pm 2^\circ\text{C}/\text{cm}$) para controlar la difusión de Co y el crecimiento del grano.

Optimizar la relación de aditivos ($\text{VC} : \text{TaC} : \text{Cr}_3\text{C}_2 = 2 : 1 : 0,5$, desviación $< 0,05\%$) para mejorar la dureza y la tenacidad ($\text{HV } 1700$, $K_{1c} \text{ } 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

A través del análisis de datos del proceso, el tiempo de molienda de bolas ($20-40$ horas, precisión de $\pm 0,5$ horas) y la velocidad de rotación ($300-500 \text{ rpm}$, precisión de $\pm 5 \text{ rpm}$) se ajustan automáticamente para mejorar la eficiencia de producción.

Integración de datos y colaboración de múltiples fuentes

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

Requisitos de capacidad: el agente de IA debe integrar datos de múltiples fuentes (características del polvo, parámetros de sinterización, resultados de pruebas de rendimiento) y lograr la colaboración de múltiples dispositivos a través de la red 5G y la plataforma en la nube (retraso <10 ms) .

Funciones específicas

Integre datos de tamaño de partículas de polvo (análisis de tamaño de partículas láser, desviación <0,02 μm) , datos de temperatura de sinterización (precisión del sensor $\pm 2^\circ\text{C}$) y datos de prueba de rendimiento (desviación de dureza <2 %).

Análisis de datos para optimizar los parámetros de producción (por ejemplo, la tasa de difusión de Co se controla a $<10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$).

Control coordinado de molino de bolas (precisión de velocidad $\pm 5 \text{ rpm}$), horno de sinterización (desviación de temperatura $<\pm 2^\circ\text{C}$) y equipo de detección (desviación del ancho de pico de XRD $<0,2^\circ$).

Lograr una colaboración entre líneas, como por ejemplo el ajuste sincrónico de los gradientes de temperatura de múltiples hornos de sinterización (desviación $<\pm 1^\circ\text{C}/\text{cm}$).

Mantenimiento inteligente y ajuste adaptativo

Requisitos de capacidad: El agente de IA debe predecir el tiempo de falla de los equipos y productos a través de datos de crecimiento de grietas (error <5 horas) y optimizar las estrategias de mantenimiento (reduciendo el tiempo de inactividad en un 30%-35%).

Funciones específicas

Predecir la segregación de Co (desviación > 1%) causada por la desviación de la temperatura del horno de sinterización ($> \pm 10^\circ\text{C}$) y ajustar los parámetros con antelación.

Combinando datos de emisión acústica y TC, se predice la falla por fatiga del carburo cementado con estructura de gradiente en servicio ($>10^4$ veces por adelantado) y se optimiza el ciclo de mantenimiento.

Ajuste de forma adaptativa los parámetros de producción, como el ajuste de la adición de VC (aumento del 0,1 % al 0,2 %) en función de los datos de dureza en tiempo real (desviación HV > 2 %).

Predecir el desgaste del equipo (por ejemplo, vida útil de los cojinetes del molino de bolas, error <10 horas), reemplazar piezas con anticipación y reducir el tiempo de inactividad.

Aprendizaje basado en la retroalimentación y personalización de la demanda del usuario

Requisitos de capacidad: el agente de IA debe personalizar el diseño de la estructura del gradiente de acuerdo con las necesidades del usuario (como la alta dureza de las herramientas de corte de aviación y la alta tenacidad de las brocas de minería) y optimizar continuamente a través del aprendizaje de retroalimentación (mejora del rendimiento del 5% -10%).

Funciones específicas

se diseñó una estructura de gradiente con superficie Co 4% y tamaño de grano de 0,5 μm .

De acuerdo con los requisitos de las brocas de minería ($K_{1c} > 14 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) , se diseña una estructura interna con Co 12 % y tamaño de grano de 1,5 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Recopile datos de retroalimentación de la aplicación (como vida útil de la herramienta, tasa de desgaste de la broca) y optimice el contenido de Co y la distribución del grano a través del aprendizaje de refuerzo (error $< 0,1\%$).

Según las condiciones de trabajo del usuario (por ejemplo, temperatura alta $> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$), se recomienda una solución de recubrimiento de superficie (por ejemplo, CrN, espesor $3\text{ }\mu\text{m}$).

Adaptación ambiental y optimización del consumo energético

Requisitos de capacidad: el agente de IA debe optimizar los parámetros del proceso y reducir el consumo de energía (entre un 10% y un 15%) en función del entorno de producción (como la temperatura y la humedad) y los requisitos de consumo de energía.

Funciones específicas

Controlar la humedad ambiente ($<50\%$) para evitar efectos corrosivos ($<5\%$ de aumento en la tasa de desgaste).

Optimice el consumo energético del horno de sinterización (precisión de control de temperatura $\pm 2^{\circ}\text{C}$) y reduzca el tiempo de calentamiento ineficaz (ahorro del $5\%-10\%$).

Ajuste de forma adaptativa la potencia operativa del equipo según el tamaño del lote de producción (por ejemplo, reduzca la velocidad del molino de bolas a 300 rpm para la producción de lotes pequeños).

Factores que influyen en la estructura de gradiente del carburo cementado

El rendimiento y la producción de estructuras de gradiente se ven afectados por los siguientes factores:

Distribución de contenido conjunto

El gradiente de contenido de Co debe controlarse dentro de un rango razonable ($4-6\%$ en la superficie, $8-10\%$ en la capa intermedia y $12-15\%$ en el interior). Si el Co superficial es $<4\%$, $K_{1c} < 8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$; si el Co interno es $>15\%$, la dureza es <1200 .

Distribución del tamaño del grano

de grano superficial es $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, la capa intermedia es de $0,5-1\text{ }\mu\text{m}$ y la capa interna es de $1-2\text{ }\mu\text{m}$. Si el tamaño de grano superficial es $>1\text{ }\mu\text{m}$, la dureza es <1500 . Si el tamaño de grano interno es $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, $K_{1c} < 10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Proceso de sinterización

La desviación de temperatura ($>\pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) o un vacío insuficiente ($>10^{-2}\text{ Pa}$) pueden provocar una distribución desigual del Co (desviación $>1\%$), la formación de depósitos de Co (tamaño $>5\text{ }\mu\text{m}$) y una disminución del 10% al 15% de la tenacidad.

aditivo

Un exceso de VC ($>0,8\%$) dará lugar a una relación de fase frágil de $>0,5\%$, lo que reducirá K_{1c} ; un TaC insuficiente ($<0,1\%$) dará como resultado una baja resistencia del límite de grano ($<100\text{ MPa}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Precisión del equipo

2 °C) puede provocar una desviación del tamaño del grano ($>0,02 \mu\text{m}$) y una distribución desigual del Co (desviación $>0,5 \%$).

Factores ambientales

La humedad del entorno de producción ($>80\%$) puede provocar la oxidación del polvo (contenido de $\text{O}_2 >0,5 \text{ ppm}$) y afectar la estabilidad de la estructura del gradiente (desviación de dureza $>2\%$).

Aplicación de ingeniería del carburo cementado con estructura de gradiente

El carburo cementado con estructura de gradiente funciona bien en una variedad de escenarios exigentes:

herramientas de aviación

Superficie Co 4%, dureza HV 1700, interna Co 12%, K_{1c} 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, en corte de alta velocidad ($>800 \text{ m/min}$), vida útil >15 horas, un aumento del 25%, mejor que el YG8 tradicional.

brocas para minería

de grano de la superficie es de $0,5 \mu\text{m}$, el contenido interno de Co es del 12% y la vida útil en la perforación de roca dura es $>1500 \text{ m}$, un aumento del 50%, superando al YG6 tradicional.

Taladro de aguas profundas

Estructura de gradiente (superficie Co 4%, capa media 8%, capa interna 12%), en impacto en aguas profundas ($>500 \text{ Hz}$, presión $>80 \text{ MPa}$), K_{1c} alcanza 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, distancia de perforación $>1500 \text{ m}$.

Molde de pastillas de freno para rieles de alta velocidad

Dureza superficial HV 1700, K_{1c} interna 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, vida útil $>4 \times 10^5$ veces en fricción a alta temperatura ($>600^\circ\text{C}$), un aumento del 60%.

Nuevo electrolizador de energía

Adición superficial de TiC 5%, dureza HV 1800, Co interno 12%, K_{1c} 13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, en choque electroquímico ($>10^3$ veces), vida útil $>10^3$ horas, un aumento del 40%.

Molde de pala de turbina eólica

Superficie Co 4%, recubrimiento CrN $3 \mu\text{m}$, Co interno 12%, en impacto a baja temperatura (-60°C , velocidad de deformación $>10^3 \text{ s}^{-1}$), energía de impacto $>12 \text{ J}$, vida útil $>10^6$ veces, un aumento del 40%.

Ventajas y desventajas del carburo cementado con estructura de gradiente

Ventajas:

La dureza y la tenacidad se optimizan sinérgicamente, con un excelente rendimiento general, superando los grados tradicionales.

Se adapta a una variedad de condiciones de trabajo adversas y prolonga la vida útil.

La producción inteligente mejora la consistencia y la eficiencia.

Desventajas:

El proceso de preparación es complejo y requiere equipos de alta precisión (como un horno de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sinterización de gradiente con una precisión de control del gradiente de temperatura de $\pm 2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$.
Costo más elevado (15%-20% más alto que los grados tradicionales).
El agente de IA tiene altos requisitos de inteligencia y necesita una gran cantidad de soporte de datos.

Tendencia de desarrollo del carburo cementado con estructura de gradiente

Con el desarrollo profundo de la fabricación inteligente, la producción y aplicación de carburo cementado con estructura de gradiente se volverán más inteligentes:

Integración profunda de IA + IIoT

Mediante el aprendizaje de refuerzo y el análisis de big data, AI Agent optimiza el diseño de la estructura de gradiente (error de distribución de Co < 0,1 %) y mejora la consistencia del rendimiento (desviación < 0,5 %).

IIoT utiliza redes 5G y plataformas en la nube para lograr la colaboración entre múltiples dispositivos (retraso < 10 ms) y mejorar la eficiencia de producción (> 20%).

Aplicación de la tecnología de impresión 3D

La tecnología de impresión 3D (como la fusión selectiva por láser SLM) se utiliza para lograr estructuras de gradiente más complejas (como gradientes multicapa y multifase), con una desviación del tamaño de grano < 0,01 μm y una desviación de la distribución de Co < 0,1 %.

Nueva estructura de gradiente

Desarrollar gradientes multifásicos (como gradientes compuestos WC- TiC -Co) y gradientes multifuncionales (como resistencia a la corrosión superficial y alta tenacidad interna) para satisfacer las diversas necesidades de la aviación, las profundidades marinas, las nuevas energías y otros campos.

Estandarización y promoción

Establecer estándares de evaluación del desempeño para el carburo cementado con estructura de gradiente (como pruebas de dureza y tenacidad en capas) para promover su aplicación generalizada en el mercado global.

Fabricación ecológica

Utilice IA para optimizar el consumo de energía (reducirlo entre un 10% y un 15%) y desarrollar carburo cementado con estructura de gradiente reciclable (como el reciclaje estratificado con contenido de Co) para lograr un desarrollo sostenible.

En resumen, el carburo cementado con estructura de gradiente logra una mejora sinérgica en dureza, tenacidad y resistencia al desgaste gracias al diseño de gradiente de su microestructura, superando así los límites de rendimiento de los grados tradicionales de carburo cementado. La introducción del Agente de IA para el control inteligente del diseño de producción mejora aún más la precisión y la eficiencia de la producción, impulsa el desarrollo del carburo cementado hacia un alto

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rendimiento e inteligencia, y proporciona soluciones más eficientes y fiables para la aviación, la minería, las nuevas energías y otros sectores.

apéndice:

Diversos conceptos y funciones de la carburación con carburo cementado

La tecnología de carburación para carburo cementado (WC-Co) es un proceso que introduce elementos de carbono en la superficie del material mediante un tratamiento termoquímico de alta temperatura para mejorar las propiedades superficiales. La aplicación de la carburación en carburo cementado se centra principalmente en mejorar la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la fatiga, manteniendo al mismo tiempo la tenacidad interna. Este artículo analizará la naturaleza de la carburación, su forma de proceso, su mecanismo de acción, los factores clave que influyen en ella y sus efectos reales en la aplicación, con el objetivo de revelar su valor único para optimizar el rendimiento del carburo cementado.

La esencia de la carburación: difusión superficial y reacción del carbono.

El núcleo de la carburación reside en la difusión y reacción de los átomos de carbono a altas temperaturas. El carburo cementado se compone de una fase dura de carburo de tungsteno (WC) y una fase de enlace de cobalto (Co). La fase de Co tiene una alta solubilidad en carbono (aproximadamente 0,2-0,3 % en peso a 900 °C), que se convierte en el principal canal para la difusión del carbono. Durante el proceso de carburación, los átomos de carbono se descomponen a partir de fuentes externas de carbono (como CH₄, CO o polvo de carbono sólido), se difunden a la superficie a través de la red de la fase de Co y luego reaccionan con WC para formar una estructura de carburo más densa o espesar las partículas de WC existentes. Este mecanismo de difusión-reacción forma un área rica en carbono en la superficie, que generalmente se manifiesta como una capa rica en WC con un espesor de 10-50 μm.

La temperatura de carburación suele estar entre 850 y 950 °C, inferior a la temperatura de sinterización del carburo cementado (1400-1500 °C) para evitar el engrosamiento del grano o la degradación del rendimiento de la matriz. La velocidad de difusión del carbono ($\sim 10^{-11}$ cm²/s) determina el espesor y la calidad de la capa carburizada y debe controlarse con precisión mediante la temperatura, el potencial de carbono y el tiempo.

Proceso de carburación: de lo tradicional a lo moderno

El proceso de carburación adopta diversas formas según la fuente de carbono y el método de suministro de energía. Cada forma tiene diferentes escenarios de aplicación y efectos en el carburo cementado:

Carburación de gas:

utilizando hidrocarburos (como CH₄) o monóxido de carbono (CO) como fuente de carbono, se lleva a cabo en una atmósfera controlada a 850-950 °C. El CH₄ se descompone en átomos de carbono activo (C) y H₂, y los átomos de carbono se difunden a la superficie: $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$. La carburación de gas es adecuada para la producción en masa, con un espesor de capa carburizada uniforme (10-30 μm) y una dureza de hasta HV 2000-2200, pero el potencial de carbono (0,8-1,2 % en peso) debe controlarse con precisión para evitar la sobrecarburación o descarburación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Carburación sólida:

La muestra de carburo se sumerge en polvo de carbono (como grafito), se calienta a 900-950 °C y el carbono se difunde por contacto directo. El equipo de carburación sólida es sencillo y adecuado para experimentos a pequeña escala, pero la uniformidad de la capa carburizada es deficiente (desviación de espesor $\pm 5 \mu\text{m}$) y la eficiencia es baja.

Carburación por plasma:

En un entorno de plasma a 700-900 °C, se utiliza un campo eléctrico para activar una fuente de carbono (como CH_4) y generar iones de carbono altamente activos. El plasma acelera la difusión del carbono (velocidad aumentada a $\sim 10^{-10} \text{cm}^2/\text{s}$), formando una capa carburizada de 20-40 μm a menor temperatura con una dureza de HV 2200-2500, a la vez que reduce el consumo de energía (aproximadamente entre un 20 % y un 30 %).

Carburación asistida por láser:

Se utiliza un láser (de 1 a 2 kW de potencia) para calentar localmente la superficie, combinado con una fuente de carbono (como un recubrimiento de polvo de carbono) para lograr la carburación. La carburación por láser es rápida (< 1 hora), el espesor de la capa carburizada es controlable (5-20 μm) y es adecuada para piezas geométricas complejas, aunque pueden producirse microfisuras en la zona afectada por el calor.

Estos procesos tienen su propio enfoque. La carburación por gas es adecuada para la producción industrial, la carburación por plasma se centra en la alta eficiencia y el bajo consumo, y la carburación por láser es adecuada para el refuerzo local de alta precisión.

El papel de la carburación: mejora del rendimiento multidimensional

La influencia de la carburación en el rendimiento del carburo cementado es multifacética y se refleja principalmente en los siguientes efectos clave:

Mayor dureza y resistencia al desgaste:

La capa rica en WC (espesor 10-30 μm) formada por carburación aumenta significativamente la dureza superficial (HV 2000-2500), que es mucho mayor que la de la matriz (HV 1500-1800). La capa de carburo de alta dureza mejora la resistencia al desgaste abrasivo y por deslizamiento, y la tasa de desgaste se puede reducir a $< 0,08 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Por ejemplo, en aplicaciones de herramientas de corte, las herramientas de carburo cementado carburizado pueden soportar velocidades de corte más altas ($> 1000 \text{ m/min}$) y aumentar su vida útil entre un 20 % y un 30 %.

Mayor resistencia a la corrosión:

La capa rica en WC reduce la exposición de la fase de Co y mejora la estabilidad superficial en entornos ácidos ($\text{pH} < 5$) u oxidantes ($> 600^\circ\text{C}$). Tras la carburación, puede formarse una fina capa de Co_3C o Co_2C en la superficie de la fase de Co, lo que inhibe aún más la reacción de corrosión y prolonga la vida útil del material en condiciones corrosivas (como las válvulas de aguas profundas).

Mayor resistencia a la fatiga:

La tensión de compresión residual ($> 400 \text{ MPa}$) introducida por la carburación se genera mediante la expansión volumétrica, lo que inhibe eficazmente la formación y propagación de grietas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficiales, y la vida útil por fatiga puede aumentarse hasta en más de 10½ veces. Especialmente en situaciones de carga de alto ciclo (como las herramientas de aviación), la capa carburizada mejora significativamente la fiabilidad.

Optimización de la microestructura:

Durante la carburación, los átomos de carbono se incrustan en la red de WC o en partículas de carburo engrosadas, lo que aumenta la resistencia de la unión del límite de grano (>150 MPa) y reduce la tendencia a la fractura intergranular. El análisis SEM muestra que la superficie de fractura después de la carburación se compone principalmente de pequeñas hendiduras ($<1\text{ }\mu\text{m}$), lo que indica un aumento en la proporción de fractura plástica.

Estabilidad térmica mejorada: La

capa carburizada mejora la resistencia de la superficie al ablandamiento a alta temperatura y puede mantener una alta dureza (>1800 HV) a $600-800\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que la hace adecuada para aplicaciones de troquelado o corte a alta temperatura.

Cabe destacar que la carburación no tiene un efecto positivo en todas las propiedades. Una capa carburizada demasiado gruesa ($>50\text{ }\mu\text{m}$) puede aumentar la fragilidad superficial y reducir la tenacidad a la fractura (K_{IC}) entre un 5 % y un 10 %. Es necesario optimizar el proceso para equilibrar la dureza y la tenacidad.

Factores clave de influencia: puntos de control fundamentales para la optimización del rendimiento

El efecto de carburación se ve afectado por la combinación de los parámetros del proceso, las propiedades del material y las condiciones externas. Los factores clave son los siguientes:

Temperatura y tiempo:

La temperatura óptima es de $850-950\text{ }^{\circ}\text{C}$, y el espesor de la capa carburizada aumenta linealmente con el tiempo (2-10 horas) (espesor: $10-50\text{ }\mu\text{m}$). Una temperatura demasiado alta ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) provocará el ablandamiento de la fase de Co o el engrosamiento de los granos ($>2\text{ }\mu\text{m}$), con una disminución de la dureza del 15 % al 20 %. Un tiempo demasiado prolongado (>12 horas) puede provocar descarburación interna y afectar el rendimiento de la matriz.

Control del potencial de carbono:

El potencial de carbono (contenido de carbono) debe mantenerse entre el 0,8 y el 1,2 % en peso. Si es demasiado bajo ($<0,6\text{ }\%$ en peso), la capa carburizada estará incompleta y la dureza será insuficiente. Si es demasiado alto ($>1,5\text{ }\%$ en peso), se formará una capa de carbono (como carbono libre), lo que aumentará la fragilidad.

Microestructura del material:

Contenido de Co: Un contenido de Co del 8% al 12% proporciona el mejor canal de difusión de carbono. Un contenido demasiado bajo ($<6\%$) limita la difusión de carbono, y un contenido demasiado alto ($>15\%$) causa ablandamiento de la superficie.

de grano es $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, la fuerza de unión de la capa carburizada es fuerte y la dureza aumenta significativamente; cuando el tamaño de grano es $>2\text{ }\mu\text{m}$, la difusión de carbono es desigual y la dureza aumenta en $<10\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Estado de la superficie:

La rugosidad inicial $Ra < 0,1 \mu m$ garantiza una adhesión firme de la capa carburizada; si es $> 0,2 \mu m$, pueden producirse defectos en la capa carburizada y la tasa de desgaste aumentará entre un 15% y un 20 %.

Condiciones posteriores al tratamiento:

El revenido a baja temperatura (200-400 °C, 1-2 horas) después de la carburación puede liberar la tensión residual ($< 100 \text{ MPa}$), pero si la temperatura es demasiado alta ($> 500 \text{ °C}$), la dureza de la capa carburizada disminuirá.

Efectos de la aplicación práctica: del laboratorio a la práctica de ingeniería

La aplicación de la tecnología de carburación en el campo del carburo cementado es relativamente madura y su efecto real se ha verificado en muchos escenarios de ingeniería:

Herramientas de corte:

Las herramientas WC-10Co están carburadas (capa carburizada de $20 \mu m$, dureza HV 2000). En cortes a alta velocidad ($> 1000 \text{ m/min}$), la vida útil aumenta un 25 % y la eficiencia de corte un 20 %. Son aptas para el procesamiento de aleaciones de aluminio para aviación.

Broca de minería: después de carburar la

broca WC-8Co (capa de carburación de $15 \mu m$), la tasa de desgaste se reduce a $< 0,08 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, la distancia de perforación se extiende a $> 1500 \text{ m}$, la eficiencia aumenta en un 50% y el costo de minería se reduce significativamente.

Matriz de estampación:

carburación de matriz WC-12Co (capa de carburación de $30 \mu m$, dureza > 2200), tiempos de extrusión $> 10^6$ veces, aumentados en un 25%, para satisfacer las necesidades de estampación de alta frecuencia.

Equipos para aguas profundas: La vida útil de

las válvulas para aguas profundas WC-10Co (capa de permeación de $25 \mu m$) se extiende a > 4 años en entornos de alta presión ($> 80 \text{ MPa}$) y corrosivos ($\text{pH} < 5$), un aumento del 40%, mostrando una excelente resistencia a la corrosión.

Limitaciones y direcciones de mejora de la tecnología de carburación

Aunque la tecnología de carburación ha mejorado significativamente el rendimiento del carburo cementado, aún presenta las siguientes limitaciones:

Riesgo de fragilidad: una capa carburizada demasiado gruesa ($> 50 \mu m$) puede provocar la fragilización de la superficie, reduciendo el K_{Ic} entre un 5% y un 10% y limitando las aplicaciones de carga dinámica.

Complejidad del proceso: El control del potencial de carbono es difícil y requiere equipos de alta precisión (desviación de temperatura $< \pm 5^\circ \text{C}$), lo que aumenta los costos de producción (aproximadamente 15%-20%).

de carburación suele ser $< 50 \mu m$, lo que no puede satisfacer los requisitos de refuerzo profundo.

Las mejoras incluyen:

Refuerzo compuesto: combinación de tecnología de carburación y recubrimiento (como el recubrimiento de TiN) para formar una estructura de gradiente y mejorar el rendimiento de las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

capas profundas.

Control inteligente: Desarrollar un sistema de carburación inteligente para monitorear el potencial de carbono y el espesor de la capa de carburación en tiempo real a través de sensores para mejorar la estabilidad del proceso.

Fuentes de carbono de bajo costo: Explore fuentes de carbono provenientes de la recuperación de biocarbón o gases residuales para reducir costos y mejorar la sustentabilidad.

Mediante la difusión y reacción superficial de elementos de carbono, la tecnología de carburación de carburo cementado forma una capa enriquecida con WC de alta dureza, lo que mejora significativamente la dureza, la resistencia al desgaste, la resistencia a la corrosión y la resistencia a la fatiga. Diferentes formas de proceso (como la carburación por gas y la carburación por plasma) ofrecen diversos métodos de aplicación, y sus efectos se optimizan mediante la regulación de la temperatura, el potencial de carbono y la microestructura. A pesar de los desafíos de fragilidad y costo, la tecnología de carburación ha demostrado un gran potencial en herramientas de corte, minería y equipos de aguas profundas, y se espera que supere aún más las limitaciones en el futuro mediante el refuerzo de compuestos y el desarrollo inteligente.

Tabla comparativa de diversos conceptos y funciones de la carburación con carburo cementado

proyecto	Carburación involuntaria (control deficiente del carbono durante la producción)	Proceso de carburación (proceso de mejora del rendimiento de aleaciones duras)
Definición y esencia	Debido al potencial de carbono no controlado o a las fluctuaciones en el contenido de carbono de las materias primas durante el proceso de producción (como la sinterización), los átomos de carbono se difunden accidentalmente a la superficie para formar una capa carburada inesperada.	El proceso de tratamiento termoquímico de alta temperatura introduce elementos de carbono en la superficie del carburo cementado para optimizar el rendimiento controlando con precisión la fuente de carbono, la temperatura y el tiempo.
Formulario de proceso	- Se produce en enlaces de producción como la sinterización, sin un control de proceso específico. Fuente de carbono: exceso de carbono en la atmósfera (como la descomposición de CH ₄) . - Temperatura: temperatura de sinterización (1300-1500°C).	- Carburación con gas: CH ₄ o CO, 850-950°C. - Carburación con sólidos: Contacto con polvo de carbón, 900-950° C. - Carburación con plasma: Activación por plasma de CH ₄ , 700-900°C. - Carburación asistida por láser: Calentamiento por láser, potencia 1-2 kW.
Características de la capa permeable	- Espesor: 5-60 μm , no uniforme. - Dureza: HV 1800-2200, grandes fluctuaciones (desviación ±200 HV). Puede ir acompañado de carbono libre o descarburación .	- Espesor: 10-30 μm , uniforme . - Dureza: HV 2000-2500, estable (desviación < ±50 HV). - La capa rica en WC es densa.
Dureza y resistencia al desgaste	- La dureza aumentó a HV 1800-2200, pero la distribución fue desigual. - La resistencia al desgaste mejoró, tasa de desgaste <0,1 mm ³ / N · m, pero la sobrecarbonización local reduce el efecto.	- Dureza aumentada a HV 2000-2500, uniforme. - Resistencia al desgaste significativamente mejorada, tasa de desgaste <0,08 mm ³ / N · m, adecuado para escenarios de fricción de alta carga.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proyecto	Carburación involuntaria (control deficiente del carbono durante la producción)	Proceso de carburación (proceso de mejora del rendimiento de aleaciones duras)
Resistencia a la corrosión	- La capa carburizada es desigual, la sobrecarburación local forma carbono libre, que es fácilmente soluble, la fase Co está más expuesta y la resistencia a la corrosión disminuye (como en un entorno con pH < 5).	- La capa rica en WC reduce la exposición de la fase Co, mejora la resistencia a la corrosión y es adecuada para entornos ácidos (pH < 5) o oxidativos de alta temperatura (>600 °C).
Rendimiento antifatiga	- La tensión residual desigual (localmente <200 MPa) puede introducir microfisuras y reducir la vida útil por fatiga (<10 ⁴ veces).	- Tensión de compresión residual >400 MPa, vida útil por fatiga aumentada a >10 ⁵ veces, adecuado para escenarios de carga de alto ciclo.
Microestructura	- La resistencia de unión del límite de grano es desigual (localmente <100 MPa), la proporción de fractura intergranular es alta (>50%) y la estabilidad estructural es deficiente.	- Se mejora la resistencia de unión del límite de grano (>150 MPa), la fractura es principalmente por hoyuelos (<1 μm), la plasticidad y la fragilidad están equilibradas y la estructura es estable.
Estabilidad térmica	- La sobrecarbonización local produce una estabilidad térmica desigual y una caída significativa de la dureza (<1500 HV) a altas temperaturas (>600 °C).	- La capa carburizada mantiene una dureza de >1800 HV a 600-800°C, adecuada para aplicaciones de troquelado o corte a alta temperatura.
Tenacidad a la fractura (K _{IC})	- Una capa carburizada demasiado gruesa (>50 μm) o una capa carburizada demasiado abundante provocan una mayor fragilidad y una disminución del K _{IC} del 10%-20% (<10 MPa·m ^{1/2}).	- Las capas moderadamente carburizadas (<30 μm) están saturadas de carbono por la fase Co, aumentando K _{IC} en un 5%-10% (10-14 MPa·m ^{1/2}).
Temperatura y tiempo	- Temperatura: 1300-1500°C (temperatura de sinterización), el tiempo es incontrolable y puede ser demasiado largo (>10 horas), lo que da como resultado una sobrecarburación o descarburación.	- Temperatura: 850-950°C, tiempo 2-10 horas, espesor de la capa de difusión 10-50 μm, control preciso.
Potencial de carbono	- Potencial de carbono no controlado (>1,5 % en peso o <0,6 %), lo que da como resultado cajas incompletas o sobrecarburadas.	- Potencial de carbono 0,8-1,2 % en peso, regulado con precisión mediante un controlador de flujo másico para garantizar una capa de carburación uniforme.
Contenido conjunto	- Las fluctuaciones en el contenido de Co afectan la difusión del carbono, <6% resulta en difusión restringida, >15% resulta en ablandamiento.	- 8%-12% proporciona el mejor canal de difusión, con un equilibrio entre tenacidad y dureza.
Tamaño de grano WC	- Cuando el tamaño del grano es >2 μm, la difusión del carbono es desigual y el rendimiento fluctúa considerablemente.	- de grano es <0,5 μm, la fuerza de unión de la capa carburizada es fuerte y la dureza aumenta significativamente (>10%).
Estado de la superficie	- La condición de la superficie no está controlada, Ra fluctúa mucho, lo que puede afectar la adhesión de la capa carburizada.	- El pulido a Ra <0,1 μm garantiza una adhesión firme de la capa carburizada y reduce la tasa de desgaste en un 15%-20%.
Controlabilidad y repetibilidad	- Diferencias de rendimiento grandes e incontrolables entre lotes (desviación > 20%).	- Controlable, desviación de lote <5%, rendimiento estable.

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

proyecto	Carburación involuntaria (control deficiente del carbono durante la producción)	Proceso de carburación (proceso de mejora del rendimiento de aleaciones duras)
Caso positivo	- No aplicable, normalmente se considera un defecto de fabricación.	- Brocas para minería: WC-8Co (capa de infiltración de 15 μm), distancia de perforación > 1500 m, aumentada en un 50%. - Matrices de estampación: WC-12Co (capa de infiltración de 30 μm) , tiempos de extrusión > 10 ⁶ veces, aumentados en un 25%. - Equipos para aguas profundas: WC- 10Co (capa de infiltración de 25 μm) , esperanza de vida > 4 años, aumentada en un 40%.
Casos negativos	- Un lote de brocas WC-10Co tenía un alto potencial de carbono (>1,5 % en peso), una capa carburizada de 60 μm , un K _{1c} < 10 MPa · m ^{1/2} y una fractura prematura (vida útil <10 ⁴ veces) .	- No aplicable, el proceso de carburación puede evitar este problema.
Dirección de mejora	- Optimizar el contenido de carbono de las materias primas (desviación < 0,1 % en peso), mejorar el control de la atmósfera y reducir la carburación involuntaria.	-El sistema de carburación inteligente monitorea el potencial de carbono en tiempo real y combina tecnología de recubrimiento para formar una estructura de gradiente para mejorar el rendimiento de la capa profunda.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Carburación y descarburación de carburo cementado

El carburo cementado (compuesto principalmente de carburo de tungsteno WC y fases de enlace como Co y Ni, con un contenido de WC de 85-94 % en peso y una fase de enlace de 6-15 % en peso) se usa ampliamente en picos, herramientas, sellos y moldes de minería debido a su alta dureza (1400-2200 HV), alta resistencia (1,8-2,8 GPa) y excelente resistencia al desgaste. La carburación y la descarburación son dos procesos clave que involucran la regulación del contenido de carbono en la preparación y uso del carburo cementado, lo que afecta directamente la microestructura, el rendimiento y la vida útil del material. La carburación introduce carbono en la superficie del carburo cementado para mejorar la dureza de la superficie, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión; la descarburación causa degradación del rendimiento debido a la pérdida de carbono y a menudo se evita.

Este artículo combina estándares nacionales (como GB/T 18376-2014, GB/T 5169-2013) con prácticas industriales, profundiza en el mecanismo de carburación y descarburación, el proceso, la influencia y las medidas de control del carburo cementado, y recomienda moderadamente las capacidades de CTIA GROUP LTD en la optimización del proceso de carburación y el control de la descarburación.

1. Cementación de carburo cementado

1.1 Definición y mecanismo de carburación

La carburación es el proceso de difusión de átomos de carbono en el material a través de una atmósfera de alta temperatura (como C_2H_2 , CH_4) o una fuente de carbono sólida (como grafito) en la superficie o área cercana a la superficie del carburo cementado para formar una fase con alto contenido de carbono (como WC o fase η), mejorando así la dureza de la superficie (aumento del 10 al 20%), la resistencia al desgaste (pérdida por desgaste reducida del 20 al 30%) y la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01$ mm/a).

Mecanismo de carburación:

Difusión de carbono: Los átomos de carbono se difunden a través de los límites de grano de WC y la fase Co a altas temperaturas (1000-1200 °C) con un coeficiente de difusión $D \approx 10^{-12} - 10^{-11} m^2/s$.

Formación de la fase carburizada:

Área baja en carbono: el carbono reacciona con W para formar WC (dureza 2000-2200 HV), mejorando la resistencia al desgaste.

Región con alto contenido de carbono: el exceso de carbono puede formar la fase η (como Co_3W_3C , dureza >2500 HV, alta fragilidad).

Modificación de la superficie: La capa carburizada (0,11 mm) forma una estructura gradiente con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dureza que varía desde la superficie (2000-2200 HV) hasta el núcleo (1400-1600 HV).

Finalidad de carburación:

Mejora la dureza superficial (hasta un 1015%) y la resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,05 mm³/h, ASTM G65).

Resistencia a la corrosión mejorada (H₂SO₄/H₂S <0,01 mm/a, NACE MR0175).

Rendimiento de gradiente de formación, equilibrio entre la resistencia al desgaste de la superficie y la tenacidad del núcleo (KIC 1215 MPa·m^{1/2}).

1.2 Proceso de carburación

Carburación por vapor:

Introduzca gas fuente de carbono (como C₂H₂, CH₄) en un horno de vacío o en un horno de atmósfera.

Equipamiento: Horno de sinterización al vacío (10⁻² - 10⁻³ Pa, elementos calefactores de molibdeno).

parámetro:

Temperatura: 1000-1200°C (los granos de WC son estables y la fase Co no se licúa).

Gas: C₂H₂ (pureza>99,9%), caudal 510 L/min, presión 10⁻² - 10⁻³ Pa.

Tiempo: 13 horas (capa carburizada 0,10,5 mm).

Atmósfera: H₂ (510 L/min, para evitar la oxidación), O₂ <5 ppm.

resultado:

Espesor de la capa carburizada: 0,2-0,5 mm, dureza 2000-2200 HV.

Contenido de carbono: ganancia superficial 0,51 % en peso, tamaño de grano 0,52 μm.

Porosidad: <0,01% (GB/T 51692013).

Aplicación: picos de minería (resistencia al desgaste de la superficie aumentada en un 20%), herramientas de corte (vida útil aumentada en un 30%).

Carburación en fase sólida:

Método: Coloque el carburo cementado en polvo de grafito o negro de carbón y caliéntelo a alta temperatura.

Equipo: Horno de alta temperatura (protección Ar, 10⁻² Pa).

parámetro:

Temperatura: 1100-1300°C.

Fuente de carbono: polvo de grafito (D50 15 μm, pureza > 99,9%), tasa de llenado 80-90%.

Tiempo: 24 horas (capa carburizada 0,51 mm).

Atmósfera: Ar (caudal 5 L/min, O₂ <10 ppm).

resultado:

Espesor de la capa carburizada: 0,51 mm, dureza 1900-2100 HV.

Contenido de carbono: Aumento de la superficie 0,81,5 % en peso, puede aparecer fase η.

Adhesión: >80 N (prueba de rayado).

Aplicaciones: Moldes (resistencia al desgaste aumentada en un 20%), sellos (resistencia a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosión aumentada en un 15%).

Carburación de plasma:

Método: La descarga de plasma mejora la actividad de los átomos de carbono y acelera su difusión.

Equipamiento: Horno de carburación por plasma (descarga luminiscente, 10^{-1} a 10^0 Pa).

parámetro:

Temperatura: 800-1000°C (temperatura baja, protegiendo el sustrato).

Gas: CH₄ (50%) + H₂ (50%), caudal 1020 sccm.

Voltaje: 500800 V, densidad de corriente 12 mA/cm².

Tiempo: 12 horas (capa carburizada 0,10,3 mm).

resultado:

Espesor de la capa carburizada: 0,10,3 mm, dureza 21002300 HV.

Contenido de carbono: aumento de la superficie de 0,30,8 % en peso, estabilidad del grano.

Porosidad: <0,001% (alta densidad).

Aplicaciones: herramientas de precisión (precisión de corte incrementada en un 10%), sellos para aguas profundas (resistencia al H₂S <0,005 mm/a).

1.3 Efecto de la carburación

Ventajas de la carburación:

Dureza mejorada: la dureza superficial aumentó en un 1015% (2000-2200 HV), la resistencia al desgaste aumentó en un 2030% (pérdida por desgaste <0,05 mm³/h).

Resistencia a la corrosión mejorada: La capa carburizada es densa y la tasa de corrosión de H₂SO₄/H₂S es <0,01 mm/año.

Mayor vida útil: la vida útil de la punta aumenta en un 3050% (1000-1500 horas) y la vida útil de corte de la herramienta aumenta en un 2030%.

Desventajas de la carburación:

Riesgo de fase η : El exceso de carbono forma Co₃W₃C (dureza > 2500 HV, KIC <8 MPa·m^{1/2}), lo que aumenta la fragilidad y la probabilidad de fractura aumenta en un 1020%.

Dificultad en el control del proceso: una desviación del contenido de carbono > ±0,2 % en peso puede generar un rendimiento desigual.

Aumento de costos: equipo de carburación (501 millones de yuanes/unidad) y costo del gas (C₂H₂ 1020 yuanes/m³).

1.4 Caja de carburación

Pico de minería: WC+8%Co (Ø 20 mm), carburación en vapor (1100°C, C₂H₂ 5 L/min, 2 horas), dureza superficial 2100 HV, desgaste <0,05 mm³/h, vida útil 1200 horas (600 horas para pico ordinario).

Herramienta de corte: WC+6%Co (Ø 12 mm), carburación por plasma (900°C, CH₄+H₂, 1,5 horas), capa carburizada 0,2 mm, dureza 2200 HV, vida útil de corte de aleación de Ti aumentada en un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

30%.

Junta: YN10 (WC+10%Ni, Ø 50 mm), carburación en fase sólida (1200°C, polvo de grafito, 3 horas), índice de resistencia a la corrosión H₂S <0,005 mm/a, vida útil >1000 conexiones.

2. Descarburación del carburo cementado

2.1 Definición y mecanismo de descarbonización

La descarburación es el proceso de sinterización de carburo cementado a alta temperatura, tratado térmicamente o utilizado, donde el contenido de carbono en la superficie o en la totalidad se reduce debido a la pérdida de carbono (reacción con O₂, H₂ o volatilización), formando una fase baja en carbono (como W₂C, enriquecimiento de fase Co), reduciendo así la dureza (reducida en un 1020%), la resistencia al desgaste y la resistencia.

Mecanismo de descarbonización:

Oxidación del carbono: a altas temperaturas (>800 °C), el carbono reacciona con O₂ para formar CO/CO₂ y el WC se descompone en W₂C (dureza 1600-1800 HV, poca resistencia al desgaste).

Reacción: $2WC + O_2 \rightarrow W_2C + CO_2$.

Volatilización del carbono: Durante la sinterización al vacío (10^{-4} Pa, >1400 °C), el carbono se pierde en forma gaseosa (C, CO).

Enriquecimiento de la fase Co: Después de la pérdida de carbono, la proporción de la fase Co aumenta (>20 % en peso) y se forma una capa de ablandamiento (dureza <1000 HV).

Fase baja en carbono: W₂C (alta fragilidad, KIC <8 MPa·m^{1/2}) o W libre (dureza <1200 HV), reduce la resistencia al desgaste.

Lo que sucede:

Sinterización: Desparafrinado insuficiente (O₂ >10 ppm), oxidación a alta temperatura.

Tratamiento térmico: Control inadecuado de la atmósfera (exceso de H₂, fugas de O₂).

Uso: Corte a alta temperatura (>1000 °C, exposición al aire) o entorno corrosivo (pérdida de carbono inducida por H₂S).

2.2 Descarbonización (no intencional)

condición:

Temperatura: >800°C (sinterización 1350-1450°C, tratamiento térmico 1000-1200°C).

Atmósfera: O₂ (>10 ppm), H₂ (caudal >20 L/min, para inducir la volatilización de C).

Grado de vacío: > 10^{-2} Pa (pérdida de gas de carbono).

Tiempo: >1 hora (capa descarburada 0,10,5 mm).

resultado:

Espesor de la capa descarburada: 0,11 mm, la dureza cae a 1000-1600 HV.

Contenido de carbono: la superficie disminuyó en un 0,52 % en peso y la relación W₂C aumentó en un 1030 %.

Porosidad: incrementada en 0,010,05% (microfisuras).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento: La resistencia al desgaste disminuyó en un 2050% (tasa de desgaste $> 0,1 \text{ mm}^3/\text{h}$), la probabilidad de fractura aumentó en un 2030%.

2.3 Impacto de la descarbonización

Desventajas de la descarbonización:

Reducción de dureza: la dureza de la superficie disminuye en un 1020% (10001600 HV) y la resistencia al desgaste disminuye en un 2050%.

Resistencia reducida: el W2C es muy frágil, con una disminución del 10-15 % en la resistencia a la flexión ($< 2 \text{ GPa}$) y un aumento del 20-30 % en la probabilidad de fractura.

Deterioro de la resistencia a la corrosión: la capa de descarburación se afloja y la tasa de corrosión aumenta entre un 50 y un 100 % ($\text{H}_2\text{SO}_4 > 0,05 \text{ mm/a}$).

Vida útil acortada: la vida útil de la púa se reduce en un 3050% (< 500 horas) y la eficiencia de corte de la herramienta se reduce en un 20%.

Caso de descarbonización:

Fallo de la pica: WC+10%Co ($\varnothing 20 \text{ mm}$), sinterizado (1450°C , $\text{O}_2 20 \text{ ppm}$), capa de descarburación superficial 0,3 mm, dureza 1400 HV, desgaste $0,15 \text{ mm}^3/\text{h}$, vida útil 400 horas (normal 800 horas).

Desgaste de la herramienta: WC+6%Co ($\varnothing 12 \text{ mm}$), corte a alta temperatura (1000°C , aire), capa de descarburación 0,2 mm, relación W2C 20%, vida de corte reducida en un 30%.

2.4 Control de la descarbonización

Optimización de la atmósfera:

Control de H_2 : caudal 515 L/min (desparafinado/sinterización), $\text{O}_2 < 5 \text{ ppm}$, para evitar la volatilización de C.

Ar : Durante la sinterización/tratamiento térmico, el caudal de Ar es de 510 L/min, $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm}$.

Grado de vacío: $10^{-4} 10^{-5} \text{ Pa}$, para reducir la pérdida de gas de carbono.

Optimización del desparafinado:

Temperatura: $200\text{-}600^\circ\text{C}$, velocidad de calentamiento $3^\circ\text{C}/\text{min}$, $\text{H}_2 10 \text{ L/min}$.

Resultados: carbono residual $< 0,05\%$, $\text{O}_2 < 5 \text{ ppm}$, capa descarburada $< 0,01 \text{ mm}$.

Optimización de la sinterización:

Temperatura: $1350\text{-}1450^\circ\text{C}$, control de temperatura $\pm 3^\circ\text{C}$, evitar quemaduras excesivas .

HIP: 1350°C , 120 MPa (Ar), porosidad $< 0,001\%$, W2C suprimido.

Detección y reparación:

Inspección: SEM (relación W2C $< 5\%$), XPS (desviación del contenido de carbono $\leq \pm 0,1 \%$ en peso).

Reparación: Carburación (1100°C , $\text{C}_2\text{H}_2 5 \text{ L/min}$, 1 hora), dureza restaurada 2000 HV.

Ejemplo: pico WC+8%Co ($\varnothing 20 \text{ mm}$), sinterización optimizada (1350°C , 10^{-5} Pa , $\text{H}_2 10 \text{ L/min}$), sin capa descarburada, dureza 2000 HV, vida útil 1000 horas.

3. Comparación entre carburación y descarburación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

característica	carburación	Descarbonización
definición	Los átomos de carbono se difunden en la superficie, formando una fase con alto contenido de carbono.	Pérdida de carbono, formación de una fase baja en carbono
mecanismo	La difusión de carbono genera la fase WC/η	La oxidación/volatilización del carbono genera enriquecimiento de W ₂ C/Co
temperatura	1000-1200°C	>800°C
atmósfera	C ₂ H ₂ /CH ₄ , H ₂ , Ar	O ₂ (>10 ppm), exceso de H ₂
Espesor de la capa	0,11 milímetros	0,11 milímetros
dureza	Aumento del 1015% (2000-2200 HV)	Reducción del 1020% (1000-1600 HV)
Resistencia al desgaste	Aumento 2030% (<0,05 mm ³ /h)	Reducción 2050% (>0,1 mm ³ /h)
Resistencia a la corrosión	Aumento 2050% (<0,01 mm/año)	Caída del 50 al 100 % (>0,05 mm/año)
tenacidad	La fase η es demasiado baja (KIC <8 MPa·m ^{1/2})	W ₂ C aumenta y disminuye (KIC <8 MPa·m ^{1/2})
solicitud	Púas, cortadores, sellos	Evitar, utilizar después de la reparación.
control	de la fuente de carbono , tiempo	Atmósfera (O ₂ <5 ppm), vacío

4. Sugerencias de optimización

Optimización de la carburación:

Fuente de carbono: C₂H₂ (510 L/min), CH₄ (1020 sccm) , pureza >99,9%.
 Temperatura: 1000-1100 °C (fase gaseosa/plasma), evitar la fase η (<5 vol%).
 Tiempo: 12 horas, capa carburizada 0,20,5 mm, desviación de dureza <±50 HV.
 Inspección: SEM (grano WC 0,52 μm) , XPS (contenido de carbono ±0,1 % en peso) .
 Post-tratamiento: pulido (Ra <0,2 μm) , PVD CrN (2 μm) , resistencia al desgaste aumentada en un 30% .

Control de la descarbonización:

Atmósfera: H₂ 10 L/min, O₂ <5 ppm, Ar 5 L/min.
 Vacío: 10⁻⁵ Pa, la pérdida de carbono durante la sinterización/tratamiento térmico se reduce en un 90%.
 Desparafinado: 200-600°C, carbono residual <0,05%, O₂ <5 ppm.
 HIP: 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,001%, W₂C <5%.
 Monitoreo: Espectroscopia en línea (concentración O₂/CO), desviación del contenido de carbono <±0,1 % en peso .

Optimización de equipos:

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

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 3^{\circ}\text{C}$, vacío 10^{-5} Pa, uniformidad $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Sistema de gas: Precisión de flujo de $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4 \pm 0,1$ L/min, detección de $\text{O}_2 < 5$ ppm.

Inspección: SEM/XPS (grano/composición), ultrasonido (grieta $> 0,1$ mm).

Adaptación de la aplicación:

Carburación: picos de minería (roca de alta dureza), herramientas (corte de alta velocidad).

de descarburación: carburación (1100°C , C_2H_2 , 1 hora) + recubrimiento (CrN , $2\text{ }\mu\text{m}$).

5. Normas

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$, uniformidad $> 95\%$.

GB/T 51692013: Porosidad A02B00C00 (vacío), A00B00C00 (HIP).

GB/T 38502015: Densidad $14,515,0\text{ g/cm}^3$, desviación $< \pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

GB/T 38512015: resistencia a la flexión $1,82,8\text{ GPa}$.

GB/T 7997-2017: Dureza $1400-2200\text{ HV}$.

NACE MR0175: Resistente a $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$, tasa de corrosión $< 0,005\text{ mm/a}$.

ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,05\text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508: Desviación de dureza $< \pm 50\text{ HV}$.

6. Conclusión

La carburación del carburo cementado se lleva a cabo a través de fase gaseosa (C_2H_2 , $1000-1200^{\circ}\text{C}$), fase sólida (grafito, $1100-1300^{\circ}\text{C}$) o carburación de plasma (CH_4 , $800-1000^{\circ}\text{C}$), formando una capa carburizada de $0,11\text{ mm}$ en la superficie, aumentando la dureza a $2000-2200\text{ HV}$, aumentando la resistencia al desgaste en un $20-30\%$ (pérdida por desgaste $< 0,05\text{ mm}^3/\text{h}$), y la resistencia a la corrosión en un $20-50\%$ ($\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,01\text{ mm/a}$), alargando significativamente la vida de la pica ($1000-1500$ horas), de la herramienta y del sello (aumentada en un $30-50\%$). La descarburación forma una capa rica en $\text{W}_2\text{C}/\text{Co}$ debido a la oxidación a alta temperatura ($> 800^{\circ}\text{C}$) o la volatilización del carbono, lo que reduce la dureza en un $10-20\%$ ($1000-1600\text{ HV}$) y la resistencia al desgaste en un $20-50\%$. Debe controlarse optimizando la atmósfera ($\text{O}_2 < 5\text{ ppm}$), el vacío (10^{-5} Pa) y la presión de alta presión (HIP) (1350°C , 120 MPa). Un proceso de carburación preciso (C_2H_2 510 L/min , 12 horas) y un estricto control de la descarburación (H_2 10 L/min , carbono residual $< 0,05\%$) garantizan el rendimiento estable del carburo cementado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

¿Qué es la inyección de aglutinante de carburo cementado?

La inyección de aglutinante de carburo cementado (WC-Co) es una tecnología avanzada de fabricación aditiva que utiliza aglutinantes líquidos para unir selectivamente polvos de carburo cementado y construir estructuras tridimensionales de alto rendimiento capa por capa. Es adecuada para la fabricación de herramientas de corte complejas de carburo cementado, taladros para minería y moldes resistentes al desgaste. La tecnología fue desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en 1994 (referencia: patente del MIT US5340656A) y posteriormente comercializada por ExOne, Desktop Metal y otras empresas. En los últimos años, se ha utilizado ampliamente en el campo del carburo cementado. A continuación, se detalla la definición, la historia, los principios, el flujo del proceso, los parámetros técnicos, las características, las áreas de aplicación, los datos de rendimiento y las estrategias de optimización.

1. Definición y conceptos básicos del moldeo por inyección de aglutinante de carburo cementado

La inyección de aglutinante de carburo cementado es un método de fabricación aditiva basado en un lecho de polvo. Utiliza la inyección de aglutinantes de alta precisión para unir polvos de carburo cementado (como WC-Co) y apilarlos gradualmente para formar piezas tridimensionales. A diferencia de los métodos tradicionales de fabricación de carburo cementado (como el prensado y la sinterización) o la impresión 3D por fusión (como la fusión selectiva por láser, SLM), la inyección de aglutinante no funde directamente el polvo, sino que logra la solidificación inicial entre las partículas mediante la acción física o química del aglutinante. El "cuerpo verde" resultante (pieza verde) requiere posprocesamiento, como el desengrasado y la sinterización, para mejorar la resistencia y la densidad.

Adecuación del carburo cementado para el moldeo por inyección de aglutinante:

Carburo cementado (WC-Co, contenido de Co 6%-12%), dureza que puede alcanzar HV 1500-1800, tenacidad a la fractura (K_{IC}) 10-15 MPa $\cdot$ m^{1/2}.

Adecuado para piezas con geometrías complejas, como herramientas con canales de refrigeración internos o moldes con estructuras porosas.

Historia y desarrollo de la tecnología de moldeo por inyección de aglutinante para carburo cementado

La tecnología de inyección de aglutinante fue desarrollada por el MIT en 1994 y se utilizó inicialmente para la fundición en arena (patente US5340656A). En 1999, ExOne la comercializó y lanzó el primer dispositivo comercial, la ZPrinter 310. En 2016, Desktop Metal lanzó Shop System, que optimizó aún más la precisión de la inyección y la eficiencia de la producción.

Tecnología de inyección para aplicaciones 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

En 2018, ExOne lanzó el sistema Innovent +, que admite el moldeo de polvo WC-Co y tiene una velocidad de impresión de hasta 2000 cc/h.

En 2023, Sandvik Additive Manufacturing lanzó el polvo Osprey WC-Co (tamaño de partícula de 5 a 15 μm), que está optimizado para la inyección de aglutinante y tiene una densidad aumentada al 99,1 %.

de partícula $<1 \mu\text{m}$) que aumenta la resistencia del cuerpo verde en un 30 % (de 8 MPa a 10,4 MPa) y reduce significativamente los defectos de impresión.

3. Principio de funcionamiento de la tecnología de inyección de aglutinante

El moldeo por inyección de carburo cementado permite la construcción de piezas mediante los siguientes pasos:

Esparcimiento de polvo

Utilice un rodillo o raspador para esparcir el polvo de carburo cementado (como WC-10Co, tamaño de partícula de 5 a 20 μm) de manera uniforme sobre la plataforma de construcción; el espesor de la capa suele ser de 50 a 100 μm .

El polvo debe tener una alta fluidez (ángulo de reposo $<30^\circ$) y una distribución uniforme del tamaño de partícula (desviación D50 $<5\%$) para garantizar una capa de alta calidad.

Inyección de aglutinante

de alta precisión (resolución 40-50 μm , número de boquillas >1000) rocían aglutinante líquido de forma selectiva según los datos del modelo CAD.

Los aglutinantes comunes incluyen aglutinantes a base de agua (como el alcohol polivinílico (PVA), con una viscosidad de 5-10 mPa·s) y aglutinantes orgánicos (como la resina fenólica, con un contenido de sólidos del 30%-40%).

El aglutinante penetra en los espacios entre las partículas de polvo (profundidad de penetración 100-150 μm) y se solidifica por unión física o reacción química (tiempo de curado 0,5-1 s).

Construcción en cascada

La plataforma de construcción desciende una capa (de acuerdo con el espesor de la capa) y el proceso de distribución y expulsión del polvo se repite hasta que la pieza está completa.

no aglutinante actúa como una estructura de soporte natural, manteniendo la estabilidad de la pieza sin la necesidad de soportes adicionales.

Posprocesamiento

El cuerpo verde se retira del lecho de polvo y se somete a un desaglutinante (200-400 $^\circ\text{C}$, 2-4 h) para eliminar el aglutinante.

Sinterización (1350-1450 $^\circ\text{C}$, vacío $<10^{-2}$ Pa, 4-8 horas), las partículas de WC-Co se combinan y la densidad aumenta al 98%-99,2%.

El prensado isostático en caliente (HIP, 1500 $^\circ\text{C}$, 100 MPa, 2 h) es opcional para reducir aún más la porosidad ($<0,5\%$).

4. Proceso de inyección de aglutinante y parámetros técnicos

El proceso de inyección de aglutinante para carburo cementado implica los siguientes parámetros detallados:

Características del polvo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Material: polvo de WC-Co (como WC-8Co, WC-12Co).

de partícula: 5-20 μm , desviación D50 <5%, esfericidad >0,9 (medición SEM).

Composición química: contenido de WC 88%-94%, contenido de Co 6%-12%, contenido de oxígeno <0,3 % en peso (análisis LECO).

Pulverización y pulverización:

de capa: 50-100 μm , desviación $\leq \pm 5 \mu\text{m}$ (verificado con telémetro láser).

Presión de inyección: 0,2-0,5 MPa, volumen de gota única 10-20 pL (medido mediante vídeo de alta velocidad).

Velocidad del chorro: 20-50 mm/s, resolución de impresión 1200 dpi.

Curado y control ambiental:

Tiempo de curado del adhesivo: <1 s, temperatura ambiente 20-30°C, humedad 40%-60%.

La cámara de construcción debe estar equipada con una protección de gas inerte (como nitrógeno, contenido de oxígeno <500 ppm).

Posprocesamiento:

Desengrasante: 250-350°C, velocidad de calentamiento 1-2°C/min, mantener caliente durante 3 horas, tasa de carbono residual <0,5 % en peso.

Sinterización: 1350-1450°C, velocidad de calentamiento 5°C/min, grado de vacío $<5 \times 10^{-3} \text{ Pa}$, mantener caliente durante 6 horas.

Tasa de contracción: La contracción lineal es del 12% al 15%, lo que requiere un diseño de compensación previa (precisión de $\pm 0,1 \text{ mm}$).

de Arquímedes), porosidad <1% (tomografía computarizada, resolución <5 μm).

Requisitos del equipo:

Impresoras 3D de alta precisión (como ExOne Innovent +, volumen de construcción $160 \times 65 \times 65 \text{ mm}$).

Cabezal de impresión: cabezal de impresión Xaar 1003, número de boquillas 1000, resolución 40 μm .

Sistema de suministro de polvo: tamizado por vibración, desviación de uniformidad <3%.

Control de temperatura: calentamiento por infrarrojos, desviación $\leq \pm 2^\circ\text{C}$.

Características de la tecnología de moldeo por inyección de aglutinante

El moldeo por inyección de carburo cementado con aglutinante tiene las siguientes características:

Alta libertad de diseño:

Se pueden imprimir geometrías complejas, como canales de refrigeración internos (de 0,5 a 2 mm de diámetro), estructuras porosas (tamaño de poro de 0,1 a 1 mm) y piezas de paredes delgadas (espesor de pared < 0,5 mm).

Admite diseño de gradiente funcional, como alta dureza superficial (HV 1700) y alta tenacidad interna ($K_{IC} > 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Baja entrada de calor:

Imprima a temperatura ambiente (20-30 °C) para evitar el engrosamiento del grano ($> 2 \mu\text{m}$) o la volatilización de la fase Co causada por la fusión a alta temperatura ($> 3000^\circ\text{C}$).

El estrés térmico es <50 MPa (medido con un medidor de estrés de rayos X), que es mucho menor que el SLM ($> 200 \text{ MPa}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alta eficiencia de producción:

Velocidad de impresión: 2000 cc/h (datos de ExOne), que puede producir entre 50 y 100 piezas pequeñas (volumen 10 cm³) por hora.

No se requiere estructura de soporte, las piezas se pueden disponer densamente y la eficiencia de la construcción mejora entre un 30% y un 50%.

Compatibilidad de materiales:

Admite una variedad de relaciones WC-Co, como WC-6Co (alta dureza) y WC-12Co (alta tenacidad).

La tasa de recuperación de polvo es >99% y se puede reutilizar de 5 a 10 veces (aumento del contenido de oxígeno <0,1 % en peso).

Costo-efectividad:

Costo del polvo: el polvo WC-Co cuesta entre \$50 y \$60/kg (cotizado por Sandvik), lo que es entre un 20% y un 30% más bajo que el polvo SLM.

Costo de operación del equipo: \$1-2/hora (consumo de energía <5 kWh), costo unitario \$5-10 (volumen de la pieza 10 cm³) .

limitación:

El cuerpo verde tiene baja resistencia (8-10 MPa, prueba de tracción Instron) y se rompe fácilmente. La tasa de contracción por sinterización es del 12% al 15% y la desviación dimensional es de ±0,1 mm, lo que requiere una precompensación precisa.

Rugosidad superficial: Ra 4-6 μm (después de la sinterización), se requiere granallado para reducirla a Ra < 0,1 μm .

6. Campos de aplicación y datos de rendimiento de la tecnología de inyección de aglutinante

El moldeo por inyección de carburo cementado con aglutinante muestra un valor único en las siguientes áreas:

Herramientas de corte:

Herramienta WC-10Co (espesor de capa 50 μm) , canal de enfriamiento interno (diámetro de 1 mm) mejora la eficiencia de disipación de calor en un 25%, vida útil de corte de 15 a 18 horas (aumentada en un 20%), velocidad de corte 1000 m/min (aleación de aluminio de aviación).

Taladro de minería:

Broca WC-8Co (volumen 50 cm³) , estructura reticular (apertura 0,5 mm), reducción de peso del 15%, distancia de perforación 1500-1800 m (aumento del 50%), dureza HV 1650, K₁ c 12 MPa·m^{1/2} .

Molde resistente al desgaste:

Matriz WC-12Co (espesor de pared 0,4 mm), tiempos de extrusión >1,2×10⁶ veces (aumento del 25%), dureza HV 1700, tasa de desgaste <0,09 mm³ / N · m (prueba ASTM G65).

Prototipado rápido:

El ciclo de producción es de 6 a 8 horas (el prensado y la sinterización tradicionales demoran entre 3 y 5 días) y el costo de I+D se reduce en un 50%, lo que es adecuado para la verificación del diseño de herramientas de carburo cementado.

Datos de rendimiento (medidos):

Dureza: HV 1650-1750 (durometro Vickers, carga 30 kg).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tenacidad a la fractura: K_{Ic} 11-13 MPa·m^{1/2} (método de viga con entalla de un solo borde, ASTM E399).

Densidad: 98,8%-99,2% (método de Arquímedes).

Vida útil por fatiga: >1,2×10⁵ veces (prueba de fatiga por flexión rotacional, 500 MPa).

7. Comparación de la tecnología de inyección de aglutinante con otras tecnologías

En comparación con la fusión selectiva por láser (SLM):

La inyección de aglutinante tiene una tensión térmica menor (<50 MPa frente a >200 MPa) y un tamaño de grano más pequeño (0,5-1 μm frente a 1-3 μm) .

Un poco menos denso (99% frente a 99,5%), pero 50% menos costoso (5 dólares frente a 10 dólares por pieza).

En comparación con el prensado y sinterizado tradicionales:

La inyección de aglutinante admite diseños complejos con ciclos de producción cortos (8 horas frente a 5 días), pero requiere una mayor precisión en el control de la contracción (desviación ±0,1 mm frente a ±0,05 mm).

Una lista completa que compara la tecnología de inyección de aglutinante con otras tecnologías de moldeo

La siguiente tabla compara la tecnología de inyección de aglutinante (BJ) con la fusión selectiva por láser (SLM), la fusión por haz de electrones (EBM), el modelado por deposición fundida (FDM), el prensado y sinterizado (P&S) y la deposición de energía dirigida (DED).

índice	Inyección de aglutinante (BJ)	Fusión selectiva por láser (SLM)	Fusión por haz de electrones (MBE)	Modelado por deposición fundida (FDM)	Prensado y sinterización convencional (PD)	Deposición de energía dirigida (Falló)
principio	Los polvos se unen mediante pulverización de aglutinante, se apilan capa por capa y luego se sinterizan y solidifican.	El láser funde el polvo, lo deposita capa por capa y le da forma fundida.	El haz de electrones funde el polvo y lo deposita capa por capa en un entorno de vacío de alta temperatura.	El alambre termofusible se extruye, se deposita capa por capa y se enfría y solidifica.	El polvo se prensa y sinteriza a alta temperatura para formarse y solidificarse.	El láser o arco funde el polvo/alambre y lo deposita capa por capa.
Idoneidad del material	Metal (como WC-Co), cerámica, arena; tamaño de partícula de polvo 5-20 μm .	Metales (como aleaciones de titanio, acero), una pequeña cantidad de cerámica; tamaño de partícula 10-45 μm .	Metales (como titanio, aleaciones a base de níquel); tamaño de partícula 20-75 μm .	Termoplásticos, una pequeña cantidad de materiales compuestos; diámetro del alambre 1,75-3 mm.	Polvo metálico (como WC-Co), cerámica; tamaño de partícula 1-10 μm .	(como acero, aleaciones de níquel), materiales compuestos; polvo/alambre 50-150 μm .
Exactitud	±0,1 mm, espesor de capa 50-100 μm ,	±0,05 mm, espesor de capa	±0,2 mm, espesor de capa	±0,2 mm, espesor de capa 100-200	±0,05 mm, depende de la	±0,5 mm, espesor de capa 0,5-2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

índice	Inyección de aglutinante (BJ)	Fusión selectiva por láser (SLM)	Fusión por haz de electrones (MBE)	Modelado por deposición fundida (FDM)	Prensado y sinterización convencional (PD)	Deposición de energía dirigida (Falló)
	resolución 40-50 μm (boquilla).	20-50 μm , resolución 20-30 μm (rayo láser).	50-100 μm , resolución 50-100 μm (haz de electrones).	μm , resolución 100-200 μm (boquilla).	precisión del molde, el tamaño de partícula afecta la uniformidad.	mm, resolución 0,5-1 mm (baño fundido).
Velocidad de impresión	2000 cc/h, 50-100 piezas/hora (10 cm^3).	10-20 cm^3/h , 5-10 piezas/hora (10 cm^3).	20-50 cm^3/h , 5-15 piezas/h (10 cm^3).	50-100 cm^3/h , 10-20 piezas/h (10 cm^3).	Producción en masa, 1-5 horas por pieza (la preparación del molde tarda varias semanas).	500-1000 cm^3/h , 20-50 piezas/h (10 cm^3).
costo	Medio (costos moderados de equipos y materiales, bajos costos de operación).	Alto (equipos costosos, altos costos de material y operación).	Alto (el equipo requiere un ambiente de vacío y los costos de material y operación son altos).	Bajo (bajos costos de equipo y material, bajos costos de operación).	Medio (los costos de equipo y material son moderados, pero los costos de desarrollo del molde son altos).	Medio (alto coste de equipo, costes medios de material y operación).
Calidad de la superficie	Ra 4-6 μm (después de la sinterización), Ra <0,1 μm después del granallado.	Ra 10-15 μm , necesita mecanizarse a Ra < 0,2 μm .	Ra 20-30 μm , necesita mecanizarse a Ra < 0,5 μm .	Ra 5-10 μm , necesita posprocesarse a Ra < 0,2 μm .	Ra 0,1-0,5 μm (precisión del molde), no requiere procesamiento adicional.	Ra 20-50 μm , no necesita mecanizarse a Ra < 0,5 μm .
Requisitos de posprocesamiento	Desunión (200-400 $^{\circ}\text{C}$, 3 h), sinterización (1350-1450 $^{\circ}\text{C}$, 6 h), HIP (opcional).	Tratamiento térmico (900-1200 $^{\circ}\text{C}$, 2 h), mecanizado.	Tratamiento térmico (1000-1300 $^{\circ}\text{C}$, 2 h), mecanizado.	No requiere tratamiento térmico, es necesario retirar el soporte y rectificarlo.	Sinterización (1300-1500 $^{\circ}\text{C}$, 4-8 h) sin tratamiento adicional.	Tratamiento térmico (800-1100 $^{\circ}\text{C}$, 2 h), mecanizado.
Libertad de diseño	Canales internos altos (0,5-2 mm), paredes delgadas (<0,5 mm), estructura en gradiente.	Mediano, canales internos (0,3-1 mm), requiere estructura de soporte.	Mediano, canales internos (0,5-2 mm), requiere estructura de soporte.	Bajo, limitado al recorrido del cable, sin estructura interna.	Bajo, dependiente del diseño del molde, limitado por estructuras complejas.	Alta, restauración o fabricación de piezas de gran tamaño, canales internos (1-5 mm).
Rendimiento del	Dureza HV 1650-	Dureza HV 1700-	Dureza HV	No aplicable, difícil	Dureza HV 1800-	Dureza HV 1600-

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

índice	Inyección de aglutinante (BJ)	Fusión selectiva por láser (SLM)	Fusión por haz de electrones (MBE)	Modelado por deposición fundida (FDM)	Prensado y sinterización convencional (PD)	Deposición de energía dirigida (Falló)
carburo	1750, K _{1c} 11-13 MPa·m ^{1/2} / ² , densidad 98,8%-99,2%.	1900, K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} / ² , densidad 99,5%.	1600-1800, K _{1c} 9-11 MPa·m ^{1/2} / ² , densidad 99,3%.	de manejar WC-Co.	2000, K _{1c} 12-15 MPa·m ^{1/2} / ² , densidad 99,8%.	1700, K _{1c} 10-12 MPa·m ^{1/2} / ² , densidad 98%-99%.
estrés por calor	<50 MPa (medidor de tensión de rayos X), bajo aporte de calor.	>200 MPa, se requiere tratamiento térmico para aliviarlo.	>300 MPa, se requiere tratamiento térmico para aliviarlo.	<20 MPa, sin aporte de calor.	<100 MPa, requiere uniforme durante la sinterización.	>150 MPa, se requiere tratamiento térmico para aliviarlo.
Tamaño del grano	0,5-1 μm (después de la sinterización, medido por SEM).	1-3 μm (después de la fusión, medición SEM).	2-5 μm (después de la fusión, medición SEM).	no aplicable	0,5-2 μm (después del prensado, medido por SEM).	5-10 μm (solidificación del baño de fusión, medición SEM).
Escenario de aplicación	Herramientas de corte (WC-10Co), brocas para minería, prototipos de moldes.	Componentes de aviación de alta precisión (Ti6Al4V), implantes médicos.	Álabes de turbinas de aviación (aleaciones a base de níquel), piezas de reparación.	Prototipado, productos de consumo (piezas ABS).	Grandes cantidades de herramientas de carburo (brocas WC-Co).	Reparación de metales a gran escala, fabricación aditiva (estructuras de acero).
limitación	El cuerpo verde tiene baja resistencia (8-10 MPa) y una contracción del 12%-15%.	Alto costo, requiere estructura de soporte y tiene alto estrés térmico.	Alto costo, requiere ambiente de vacío y tiene una superficie rugosa.	Selección limitada de materiales y sin capacidad de conformado de metales.	El costo del molde es alto y la libertad de diseño es baja.	Baja precisión, mala calidad de superficie y gran zona afectada por el calor.
Impacto ambiental	Tasa de recuperación de polvo >99%, consumo de energía 5 kWh/h.	La tasa de recuperación de polvo es del 90% y el consumo de energía es de 10 kWh/h.	La tasa de recuperación de polvo es del 85% y el consumo de energía es de 15 kWh/h.	Bajo desperdicio de material y consumo energético de 2 kWh/h.	El desperdicio de material es del 5%-10% y el consumo de energía es de 8 kWh/h.	El desperdicio de material es del 10%-15% y el consumo de energía es de 12 kWh/h.

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:

Aplicación de carburo cementado en nuevos electrolizadores energéticos

El carburo cementado (principalmente compuesto de carburo de tungsteno WC y fases aglutinantes como Co y Ni, contenido de WC 85-94 % en peso , fase aglutinante 6-15 % en peso) tiene un importante potencial de aplicación en nuevos electrolizadores de energía (como el electrolizador alcalino AWE, el electrolizador de membrana de intercambio de protones PEM y el electrolizador de óxido sólido SOEC) debido a su alta dureza (1400-2200 HV), excelente resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,05 mm³/h, ASTM G65), resistencia a la corrosión (H₂SO₄/H₂S <0,01 mm/a, NACE MR0175) y alta estabilidad de temperatura (>800 °C). El nuevo electrolizador de energía es el equipo central del hidrógeno verde (H₂), que produce hidrógeno y oxígeno mediante la electrolización del agua, apoya el almacenamiento de energía de energías renovables (como la energía eólica, la energía solar) y la transformación verde de la industria de descarbonización dura (como la industria del acero y la química).

Basándose en las propiedades del material, las normas internacionales (como GB/T 18376-2014 e IEC 62976) y las tendencias de la industria del carburo cementado, este artículo analiza su aplicación, los desafíos y las líneas de optimización en celdas electrolíticas, y recomienda con moderación las capacidades de CTIA GROUP LTD en la investigación y el desarrollo de componentes de carburo cementado de alto rendimiento. Se aclara que el contenido de este artículo no está relacionado con el proceso de carburación y descarburación del carburo cementado.

electrolizador energético

Los nuevos electrolizadores de energía producen hidrógeno verde mediante la electrolización del agua ($H_2O \rightarrow H_2 + \frac{1}{2} O_2$) y se clasifican en los siguientes tipos principales:

Electrolizador alcalino (AWE):

Principio: Se utiliza una solución de KOH/NaOH (25-30 % en peso) como electrolito, se utiliza Ni o acero recubierto de Ni como electrodo y las placas bipolares separan el cátodo y el ánodo.

Características:

Tecnología madura, CAPEX bajo (500-1000 €/kW, previsión 2030 300 €/kW).

Eficiencia: 60-80% (40-50 kWh/kg H₂).

Vida útil: >80.000 horas.

Desafíos: Electrolito corrosivo (pH >14), separación compleja de gas-líquido.

Aplicaciones: Producción de hidrógeno a gran escala (>1 MW), almacenamiento de energía en parques eólicos.

Electrolizador de membrana de intercambio de protones (PEM):

Principio: Utilice una membrana de polímero sólido (como Nafion) como electrolito, catalizador de Pt/ Ir , placa bipolar de Ti o acero inoxidable .

Características:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alta eficiencia: 7090% (3545 kWh/kg H₂).

La respuesta dinámica es rápida (segundos), lo que es adecuado para la energía renovable intermitente.

El CAPEX es elevado (1000-2000 €/kW, previsión para 2030: 500 €/kW).

Vida útil: 20.000 a 60.000 horas.

Desafíos: Los catalizadores de metales preciosos son costosos y corrosivos en entornos ácidos (pH < 2).

Aplicaciones: Producción distribuida de hidrógeno, pilas de combustible para transporte.

Electrolizador de óxido sólido (SOEC):

Principio: Utilizando electrolitos cerámicos (como YSZ), electrodos de Ni o perovskita a altas temperaturas (500-850°C).

Características:

Eficiencia ultra alta: >90% (<40 kWh/kg H₂).

Alto CAPEX (>2000 €/kW, fase laboratorio).

Vida útil: 10.000-20.000 horas.

Desafíos: Sellado a alta temperatura, estabilidad del ciclo térmico.

Aplicación: Acoplamiento del calor residual industrial y producción de hidrógeno a gran escala en el futuro.

Escenarios de aplicación del carburo cementado: el carburo cementado se utiliza principalmente en componentes clave de electrolizadores, como placas bipolares, sellos, boquillas y revestimientos de electrodos resistentes al desgaste para hacer frente a los desafíos de corrosión, desgaste y alta temperatura.

2. Aplicación de carburo cementado en celdas electrolíticas

Gracias a su alta dureza, resistencia a la corrosión y estabilidad mecánica, el carburo cementado puede sustituir a los materiales tradicionales (como el níquel, el titanio y el acero inoxidable) en celdas electrolíticas, lo que mejora la vida útil de los componentes (un 20-50 %) y la eficiencia del sistema (reduce el mantenimiento en un 10-20 %). Sus aplicaciones específicas incluyen:

2.1 Placa bipolar de aleación dura

Función: Separa las celdas del electrolizador, conduce la electricidad y distribuye el electrolito/gas.

Requerir:

Resistencia a la corrosión: AWE (KOH, pH >14), PEM (H₂SO₄, pH <2).

Conductividad: Resistividad <10 μΩ·cm.

Resistencia mecánica: resistencia a la compresión >2 GPa, resistencia a la flexión 1,8-2,8 GPa.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,05 mm³/h (ASTM G65).

Ventajas del carburo cementado:

WCCo : Dureza 1400-2000 HV, tasa de resistencia a la corrosión KOH/H₂SO₄ <0,01 mm/a.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WCNi : no magnético, la resistencia al ácido es mejor que la basada en Co ($\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,005 \text{ mm/y}$).

Conductividad: La resistividad es de $510 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que es mejor que la del Ti ($40 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Estabilidad: Estabilidad del grano a 800°C , sin cambio de fase.

Ejemplos:

Placa bipolar AWE: WC10%Ni ($\varnothing 200 \text{ mm}$, espesor 2 mm), tasa de corrosión $< 0,005 \text{ mm/a}$, vida útil > 100.000 horas (acero Ni 50.000 horas).

Placa bipolar PEM: recubrimiento WC6%Co + CrN ($2 \mu\text{m}$), resistencia al ácido aumentada en un 30%, conductividad mantenida al 99%.

2.2 Sellos de carburo

Función: Evita fugas de electrolitos y garantiza la hermeticidad (separación H_2/O_2).

Requerir:

Resistencia a la corrosión: Resistente a KOH/ H_2SO_4 / H_2S .

Resistencia al desgaste: anti-desgaste por rozamiento (tasa de desgaste $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{h}$).

Estabilidad a altas temperaturas: SOEC requiere $> 800^\circ\text{C}$.

Ventajas del carburo cementado:

WCCo /Ni: dureza $1600-2200 \text{ HV}$, mejor resistencia al desgaste por rozamiento que el PTFE (reducción del desgaste en un 50%).

Resistencia a la corrosión: $\text{H}_2\text{S} < 0,005 \text{ mm/a}$ (NACE MR0175).

Alta temperatura: punto de fusión WC 2870°C , SOEC ambientalmente estable.

Ejemplos:

Anillo de estanqueidad SOEC: WC8%Ni ($\varnothing 50 \text{ mm}$), estanqueidad $> 99,9\%$ a 800°C , vida útil > 15.000 horas (junta cerámica < 10.000 horas).

Junta de sellado AWE: WC10%Co (1 mm de espesor), tasa de corrosión ambiental KOH $< 0,01 \text{ mm/a}$, ciclo de mantenimiento incrementado en un 20%.

2.3 Boquilla y tubería de carburo

Función: transporte de electrolito, H_2/O_2 , necesidad de resistir la erosión y la corrosión.

Requerir:

Resistencia a la erosión: flujo de gas y líquido a alta velocidad ($> 10 \text{ m/s}$).

Resistencia a la corrosión: Resistente a KOH/ H_2SO_4 .

Baja fricción: $\text{Ra} < 0,2 \mu\text{m}$.

Ventajas del carburo cementado:

WCCo : Dureza 2000 HV , vida útil resistente a la erosión aumentada en un 3050 % (en comparación con el acero inoxidable).

Pulido de superficie: $\text{Ra} 0,10,2 \mu\text{m}$, reduce la adhesión de burbujas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia a la corrosión: $\text{H}_2\text{SO}_4 < 0,01 \text{ mm/a}$.

Ejemplos:

Boquilla PEM: $\text{WC6\%Co}$ ($\varnothing 10 \text{ mm}$), vida útil frente a la erosión 50.000 horas (Ti 20.000 horas).

Revestimiento de tuberías AWE: $\text{WC10\%Ni}$ (2 mm de espesor), tasa de corrosión de $\text{KOH} < 0,005 \text{ mm/a}$, costo de mantenimiento reducido en un 15%.

2.4 Recubrimiento de electrodos de carburo

Función: Mejora la eficiencia catalítica del electrodo y reduce el sobrepotencial.

Requerir:

Actividad catalítica: Sobrepotencial $< 300 \text{ mV}$ (OER/HER).

Resistencia a la corrosión: resistencia a ácidos, álcalis y altas temperaturas.

Adhesión: $> 80 \text{ N}$ (prueba de rayado).

Ventajas del carburo cementado:

Recubrimiento a base de WC: compuesto con Ni y Pt, sobrepotencial 200-250 mV, mejor que el Ni puro (300 mV).

Resistencia a la corrosión: $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KOH} < 0,01 \text{ mm/a}$.

Adhesión: $> 100 \text{ N}$ (proceso PVD).

Ejemplos:

Electrodo AWE: recubrimiento WCNi ($5 \mu\text{m}$), sobrepotencial OER 220 mV, aumento de eficiencia 5% (electrodo Ni 280 mV).

Electrodo PEM: recubrimiento WCpt ($2 \mu\text{m}$), sobrepotencial HER 200 mV, vida útil aumentada en un 20%.

3. Ventajas y desafíos del carburo cementado

3.1 Ventajas del carburo cementado

Resistencia a la corrosión:

WCCo/Ni en KOH ($\text{pH} > 14$) y H_2SO_4 ($\text{pH} < 2$) es $< 0,01 \text{ mm/a}$, lo que es mejor que el del acero Ni ($0,05 \text{ mm/a}$) o Ti ($0,02 \text{ mm/a}$).

Resistente a la corrosión $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$, adecuado para electrolizadores de aguas profundas o de alta temperatura.

Resistencia a la abrasión:

Dureza 1400-2200 HV, tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65), mejor resistencia al desgaste por erosión/fretting que el acero inoxidable (tasa de desgaste $0,1 \text{ mm}^3/\text{h}$).

Estabilidad a altas temperaturas:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El punto de fusión del WC es de 2870 °C y no hay cambio de fase en el entorno SOEC (500-850 °C), lo que es mejor que el del Ni (1455 °C).

Conductividad eléctrica:

La resistividad es de 510 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$, lo que cumple con los requisitos de las placas bipolares y es mejor que el Ti (40 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Vida útil y rentabilidad:

La vida útil de los componentes aumentó en un 2050% (>100.000 horas) y los costos de mantenimiento disminuyeron en un 1020%.

Aunque el costo inicial es alto (WC 50100 \$/kg vs Ni 20 \$/kg), el costo del ciclo de vida es bajo.

3.2 Desafíos

Dificultad de procesamiento:

El carburo cementado tiene una dureza elevada (1400-2200 HV) y requiere herramientas de diamante o procesamiento EDM, lo que aumenta los costos entre un 20 y un 30%.

Las formas complejas (como los canales de flujo de placas bipolares) tienen ciclos de procesamiento largos (>10 horas/pieza).

costo:

El polvo de WC (>99,9 % de pureza) y la sinterización (1350-1450 °C, 10^{-5} Pa) son caros, y el precio por pieza es 23 veces mayor que el del Ti.

Los recubrimientos de metales preciosos (como Pt, Ir) incrementan aún más el CAPEX.

peso:

Densidad 14,515,0 g/cm³ (vs Ti 4,5 g/cm³), no adecuado para electrolizadores móviles.

Actividad catalítica:

El WC puro tiene una actividad catalítica limitada (sobrepotencial > 300 mV) y requiere un recubrimiento compuesto de Pt/Ni, lo que aumenta la complejidad del proceso.

fragilidad:

La tenacidad es menor (KIC 1215 MPa·m^{1/2} frente a Ni 50 MPa·m^{1/2}) y es necesario optimizar la resistencia al impacto.

4. Dirección de optimización

Material:

WCNi : aumentar el contenido de Ni (1015 % en peso) mejora la resistencia al ácido (H₂SO₄ <0,005 mm/a) y reduce la disolución de Co.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nano WC: tamaño de grano 0,20,5 μm , dureza aumentada en un 10% (2200 HV), tenacidad aumentada en un 15% ($\text{KIC} > 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Recubrimiento compuesto: WC+Pt /Ni (PVD, 25 μm) , el sobrepotencial se reduce a 200 mV y la eficiencia catalítica aumenta en un 10%.

Proceso de fabricación:

Fabricación aditiva : placas bipolares WCCo impresas en 3D , precisión del canal de flujo $\pm 0,01$ mm, costos de procesamiento reducidos en un 20%.

Sinterización HIP: 1350 $^{\circ}\text{C}$, 120 MPa, porosidad $< 0,001$ %, resistencia a la corrosión aumentada en un 15 %.

Tratamiento de superficie: pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m}$) + recubrimiento de CrN (2 μm) , resistencia al desgaste aumentada en un 30% .

Optimización de costos:

Reciclar polvo de WC (tasa de recuperación $> 90\%$) y reducir los costos de materia prima en un 20%.

Al reemplazar el catalizador Pt/ Ir con una aleación de NiFe , el CAPEX se puede reducir entre un 10 y un 15 %.

Modularidad:

Las placas bipolares estandarizadas (200 $\times$ 200 mm, 2 mm de espesor) son compatibles con AWE/PEM, aumentando la eficiencia de producción en un 20%.

El rápido desmontaje y montaje de los sellos reduce el tiempo de mantenimiento en un 30%.

Probado y verificado:

Prueba de corrosión: NACE MR0175, $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{KOH}$, velocidad de corrosión $< 0,005$ mm/a.

Durabilidad: ASTM G65, desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$, ciclos > 100.000 veces.

Electroquímica: sobrepotencial OER/HER < 250 mV, eficiencia $> 80\%$.

5. Normas y especificaciones

GB/T 183762014: Porosidad de carburo cementado $< 0,01\%$, uniformidad $> 95\%$.

GB/T 38502015: Densidad 14,515,0 g/cm³ , desviación $\pm 0,1$ g/ cm³.

GB/T 38512015: resistencia a la flexión 1,82,8 GPa .

GB/T 7997-2017: Dureza 1400-2200 HV, desviación ± 50 HV.

IEC 62976: Conductividad eléctrica (resistividad $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y resistencia a la corrosión (velocidad de corrosión $< 0,01$ mm/y) de placas bipolares para electrolizadores .

NACE MR0175: Resistente a $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2\text{SO}_4$, velocidad de corrosión $< 0,005$ mm/a.

ASTM G65: Tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508: Ensayo de dureza, desviación ± 50 HV.

6. Tendencias y casos de la industria

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

tendencia:

Producción de hidrógeno verde: el programa RePowerEU de la UE tiene como objetivo 20 Mt de H₂ verde para 2030, la demanda de electrolizadores es >100 GW.

Sustitución de materiales: el carburo cementado reemplaza gradualmente al acero Ti (PEM) y al Ni (AWE), lo que reduce el CAPEX y el OPEX.

Electrólisis de alta temperatura: la demanda de SOEC crece y el mercado de componentes de carburo cementado de alta temperatura (como sellos) se expande.

Inteligencia: Monitoreo en línea de corrosión/desgaste, sensores integrados en piezas de carburo y eficiencia de mantenimiento aumentada en un 20%.

Ejemplos:

electrolizador de 1 MW (China), placas bipolares WC10%Ni (200×200 mm), tasa de corrosión <0,005 mm/a, eficiencia 75%, vida útil >80.000 horas, reducción de costos de mantenimiento 15%.

Proyecto PEM: electrolizador de 500 kW (Alemania), boquilla WC6%Co (Ø 10 mm), vida útil de erosión de 50.000 horas, eficiencia del sistema aumentada en un 5%.

Piloto SOEC: electrolizador de 100 kW (EE. UU.), anillo de sellado WC8%Ni (Ø 50 mm), hermeticidad >99,9 % a 800 °C, vida útil >15 000 horas.

7. Conclusión

Con su alta dureza (1400-2200 HV), resistencia a la corrosión (H₂SO₄/KOH <0,01 mm/a), resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,05 mm³/h) y alta estabilidad de temperatura (>800 °C), el carburo cementado (WCCo / Ni) tiene ventajas significativas como material clave para placas bipolares, sellos, boquillas y recubrimientos de electrodos en electrolizadores de nueva energía (AWE, PEM, SOEC). En comparación con el acero de Ni tradicional (vida útil de 50 000 horas) o el Ti (tasa de corrosión de 0,02 mm/a), la vida útil de las piezas de carburo cementado aumenta en un 2050 % (>100 000 horas) y el coste de mantenimiento se reduce en un 1020 %, lo que respalda la eficiencia y la economía de la producción de hidrógeno verde.

Los desafíos son la dificultad de procesamiento (incremento del costo del 20 al 30%), el costo inicial y la actividad catalítica (requiere recubrimiento compuesto). Mediante nano-WC, fabricación aditiva, sinterización HIP y optimización del catalizador de NiFe , se pueden reducir aún más los gastos de capital y operativos (CAPEX/OPEX) y mejorar la competitividad.

CTIA GROUP LTD cuenta con tecnología avanzada en el campo del carburo cementado. Utiliza nanopulvo de WC (D50 0,20,5 μm) , sinterización HIP (1350 °C, 120 MPa) y recubrimiento PVD (WC/Pt /Ni, 25 μm) para desarrollar placas bipolares de alto rendimiento (resistividad <10 μΩ·cm), sellos (hermeticidad >99,9 %) y boquillas (resistencia a la erosión >50 000 horas) para cumplir con las duras condiciones de trabajo de AWE/PEM/SOEC y ofrecer soluciones fiables para la producción de hidrógeno verde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Herramientas de corte de carburo de alta velocidad

1. Descripción general de las herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

1.1 Definición y características de las herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

Definición : Las herramientas de corte de carburo de alta velocidad se basan en carburo de tungsteno (WC) y una fase aglutinante (Co/Ni) (WC 85-94 % en peso , fase aglutinante 615 % en peso). Mediante rectificado de precisión y recubrimientos por deposición física de vapor (PVD) (como TiN , AlTiN) , alcanzan alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste y alta estabilidad térmica. Son adecuados para velocidades de corte de 500-2000 m/min.

Características de las herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado :

Alta dureza: 1400-2200 HV, la resistencia al desgaste es 510 veces mejor que el acero de alta velocidad (HSS, 800 HV).

Dureza roja a alta temperatura : la dureza se mantiene a >1200 HV a 800-1000 °C, adecuada para corte en seco.

Resistencia al desgaste : desgaste <0,05 mm³/h (ASTM G65), vida útil de la herramienta 500-2000 minutos.

Resistencia al impacto : resistencia a la flexión 1,82,8 GPa , tenacidad a la fractura KIC 1015 MPa·m^{1/2}.

Aplicación : Procesamiento de acero (HRC 2060), aleación de titanio (Ti6Al4V), aleación a base de níquel (Inconel 718), material compuesto de fibra de carbono (CFRP), etc.

1.2 Tipos de herramientas de corte de carburo de alta velocidad

Herramienta de torneado : torneado exterior, mecanizado de agujeros interiores, velocidad de corte 500-1500 m/min.

Fresa : fresado plano, ranurado, velocidad de corte 600-2000 m/min.

Broca : perforación de agujeros profundos, velocidad de corte 300-800 m/min.

Herramienta de mandrilado : mecanizado de agujeros de precisión, velocidad de corte 400-1000 m/min.

1.3 Ventajas de las herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

Eficiencia: La velocidad de corte es 510 veces mayor que la del HSS y la eficiencia de procesamiento aumenta entre un 50 y un 100%.

Vida útil : Vida útil de la herramienta de carburo revestido: 500-2000 minutos (HSS: 50-200 minutos).

Precisión : rugosidad superficial Ra 0,10,4 μm , precisión de procesamiento ±0,01 mm.

Adaptabilidad : Adecuado para corte en seco, corte húmedo y procesamiento de diversos

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

materiales.

2. Materiales para herramientas de corte de alta velocidad de carburo

2.1 Ingredientes

Matriz :

WC : 8594 % en peso , tamaño de grano 0,22 μm .

Grano ultrafino (0,20,5 μm) : dureza 2000-2200 HV, excelente resistencia al desgaste, adecuado para acabado.

Grano medio-grueso (12 μm) : tenacidad KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, adecuada para mecanizado en bruto.

Co : 615 % en peso , mejora la tenacidad y la resistencia al impacto.

Bajo Co (68 % en peso): dureza 1800-2200 HV, fuerte resistencia al desgaste.

Alto Co (1015 % en peso): resistencia a la flexión 2,22,8 GPa , buena resistencia al impacto.

Ni : 0,5 % en peso , reemplaza parcialmente al Co y mejora la resistencia a la corrosión (H_2SO_4 <0,01 mm/a).

Aditivo : Cr3C2/VC (0,21 % en peso), inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 510 %.

recubrimiento :

Estaño : Dureza 2000-2300 HV, coeficiente de fricción 0,4, resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

TiAlN / AlTiN : Dureza 3000-3300 HV, resistencia al calor 900-1100°C, vida útil aumentada en un 3050%.

CrN : Dureza 1800-2200 HV, excelente resistencia a la corrosión, adecuado para el procesamiento de acero inoxidable.

DLC (Carbono tipo diamante) : Dureza 3000-4000 HV, coeficiente de fricción <0,1, adecuado para CFRP y aleaciones de aluminio.

2.2 Estructura de gradiente de herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

Superficie : bajo contenido de Co (68 % en peso), grano ultrafino WC (0,2-0,5 μm), dureza 2000-2200 HV.

Núcleo : Alto contenido de Co (1012 % en peso), grano medio - grueso WC (12 μm), tenacidad KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Ventajas :

La resistencia al desgaste de la superficie aumenta en un 2030% y la resistencia al impacto del núcleo aumenta en un 1520%.

La capa de gradiente (0,52 mm) reduce la concentración de tensiones y reduce la probabilidad de crecimiento de grietas en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Preparación : Prensado de polvo en capas + sinterización mediante prensado isostático en caliente (HIP) (1350 °C, 120 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento de las herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

Dureza: 18002200 HV (GB/T 7997-2017).

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

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2}.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,05 mm³/h (ASTM G65).

Resistencia a la corrosión: Velocidad de corrosión del refrigerante (pH 710) <0,01 mm/a.

Conductividad térmica: 80100 W/ m· K , la disipación del calor es mejor que HSS (20 W/ m· K) .

3. Proceso de fabricación de herramientas de corte de alta velocidad de carburo cementado

3.1 Preparación del polvo

materia prima :

WC: D50 0,22 μm , pureza >99,9%.

Co/Ni: D50 12 μm , pureza >99,9%.

Cr3C2/VC: D50 0,51 μm , pureza > 99,9 %.

Molienda de bolas :

Equipo: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO2, relación bola-material 10:1).

Parámetros: velocidad 300 rpm, tiempo 1624 horas, medio alcohol.

de partícula <±0,1 μm , uniformidad de la composición >95%.

3.2 Formación

Método : prensado isostático en frío (CIP) o moldeo por compresión .

Equipamiento : Prensa CIP (250300 MPa).

parámetro :

Presión: 250300 MPa, mantener la presión durante 60 segundos.

Molde : Molde de acero de alta precisión (desviación <±0,05 mm), lubricado con BN.

Densidad en blanco: 60-70% densidad teórica (8,7-10,5 g/cm³) .

Resultados : La desviación del tamaño del tocho fue <±0,1 mm y la tasa de grietas fue <1%.

3.3 Sinterización

Método : Sinterización al vacío + HIP.

equipo :

Horno de sinterización al vacío (10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa, elementos de calentamiento de molibdeno).

Horno HIP (Ar , 120150 MPa).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

parámetro :

Desparafinado :

Temperatura: 200-600°C, velocidad de calentamiento 3°C/min.

Atmósfera: H₂ (O₂ <5 ppm), caudal 10 L/min.

Vacío: 10⁻² Pa, carbono residual <0,05%.

sinterización :

Temperatura: 1350-1450°C, velocidad de calentamiento 58°C/min.

Vacío: 10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa, mantener caliente durante 23 horas.

CADERA :

Temperatura: 1350°C, presión 120 MPa (Ar).

Mantener caliente: 12 horas, enfriar a 15°C/min.

resultado :

Densidad: 14,815,0 g/cm³ (GB /T 38502015, desviación <±0,05 g/cm³).

Porosidad: <0,001% (A00B00C00, GB/T 51692013).

Dureza: 1800-2200 HV, tasa de contracción 1518%.

3.4 Mecanizado de precisión

Molienda :

Equipamiento: Rectificadora CNC, muela de diamante (tamaño de grano 510 μm).

Parámetros: velocidad 3000 rpm, avance 0,010,05 mm/pasada, refrigerante (a base de aceite).

Resultados: Radio del filo de corte <5 μm , Ra 0,10,2 μm .

pulido :

diamante (13 μm).

Parámetros: velocidad 800 rpm, presión 0,3 MPa.

Resultado: Ra <0,1 μm , el coeficiente de fricción disminuyó en un 20%.

3.5 Recubrimiento

Método : PVD (deposición física de vapor).

Equipo : Pulverización catódica por magnetron (blanco Ti/Al/Cr, pureza >99,99%).

parámetro :

Recubrimiento: TiAlN (35 μm , dureza 3000-3300 HV).

Vacío: 10⁻⁴ Pa, temperatura 300-400°C.

Polarización: 100 V, gas: Ar+N₂ (50 sccm).

Velocidad de deposición: 1 μm /h.

resultado :

Adhesión: >80 N (prueba de rayado).

Resistencia al calor: 900-1100 °C, esperanza de vida aumentada en un 3050 %.

Coeficiente de fricción: <0,3, resistencia al desgaste aumentada en un 2030%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.6 Detección

Microestructura : SEM (grano 0,22 μm) , XPS (desviación de composición <±0,1 % en peso).

actuación :

Probador de dureza: Desviación < ±50 HV (ISO 6508).

Prueba de desgaste: ASTM G65, tasa de desgaste <0,05 mm³/h.

Resistencia a la flexión: GB/T 38512015, 1,82,8 GPa .

Geometría : CMM (máquina de medición por coordenadas), desviación del filo de corte <±0,005 mm.

4. Análisis del rendimiento

parámetro	Herramientas de carburo	de Acero de alta velocidad (HSS)
Dureza (HV)	18002200	800900
Resistencia a la flexión (GPa)	1.82.8	34
Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1 / 2})	1015	2050
Resistencia al desgaste (mm³/h)	<0,05	0.20.5
Resistencia al calor (°C)	8001000	500600
Velocidad de corte (m/min)	5002000	50200
Vida útil (minutos)	5002000	50200
Ra , μm)	0.10.4	0.81.2

Aspectos destacados del rendimiento :

Resistencia al desgaste : Recubrimiento WC+TiAlN de grano ultrafino , pérdida por desgaste <0,05 mm³/h, vida útil aumentada 510 veces.

Estabilidad a altas temperaturas : dureza >1200 HV a 800-1000 °C, adecuado para corte en seco (reducción del refrigerante en un 50 %).

Eficiencia de corte : velocidad 500-2000 m/min, aumento de eficiencia 50-100% (vs HSS).

Precisión : Ra 0,10,4 μm , precisión de procesamiento ±0,01 mm.

5. Escenarios de aplicación

Las herramientas de corte de carburo de alta velocidad son aptas para la industria aeroespacial, la fabricación de automóviles, el procesamiento de moldes y los equipos de energía. A continuación, se presentan herramientas específicas, datos de prueba y sugerencias de selección para condiciones de trabajo típicas y actuales:

Aeroespacial

Materiales : Aleación de titanio (Ti6Al4V, HRC 36), aleación a base de níquel (Inconel 718, HRC 45), CFRP.

Cuchillo :

Torneado de titanio :

Herramienta de torneado exterior (placa intercambiable, ISO CNMG120408), WC6%Co (grano ultrafino, D50 0,205 μm , Cr_3C_2 0,5 % en peso), dureza 2000-2200 HV, recubrimiento PVD AlTiN (4 μm , dureza 3300 HV, resistencia térmica 1100 $^{\circ}\text{C}$). Ángulo de deflexión principal: 75°, ángulo de filo : 6°, radio de filo: 0,02 mm, rompevirutas 3D.

Proceso : molienda de bolas durante 20 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1400 $^{\circ}\text{C}$ (10^{-5} Pa, 2,5 horas), HIP 1350 $^{\circ}\text{C}$ (120 MPa, 1,5 horas), rectificado (radio de borde <5 μm , Ra 0,1 μm), PVD AlTiN (350 $^{\circ}\text{C}$, adhesión >100 N).

Parámetros de corte : velocidad 800 m/min, avance 0,15 mm/r, profundidad de corte 1,0 mm, corte en seco.

Datos de prueba : vida útil 1200 minutos (HSS 150 minutos), Ra 0,2 μm , precisión $\pm 0,01$ mm, fuerza de corte 450 N (reducida en un 25%), desgaste <0,05 mm³/h, temperatura de la punta de la herramienta 850 $^{\circ}\text{C}$.

Recomendación de selección : WC de grano ultrafino + bajo Co (6 % en peso) + AlTiN, CNMG120408MF, ángulo de deflexión principal 75°, corte en seco o MQL (0,1 L/h).

Perforación de aleación de alta temperatura :

Broca sólida ($\varnothing$ 10 mm, relación profundidad-diámetro 5:1), WC12%Co (grano medio-grueso, D50 12 μm , VC 0,5 % en peso), dureza 1600-1800 HV, recubrimiento PVD TiAlN (4 μm , resistente al calor hasta 1100 $^{\circ}\text{C}$). Ángulo de vértice 135°, ángulo de hélice 30°, radio del filo de corte 0,05 mm, orificio de refrigeración interior $\varnothing$ 1 mm.

Proceso : molienda de bolas durante 22 horas, CIP 300 MPa, sinterización 1450 $^{\circ}\text{C}$ (10^{-5} Pa, 3 horas), HIP 1350 $^{\circ}\text{C}$ (120 MPa, 2 horas), rectificado (radio de borde <5 μm), PVD TiAlN (400 $^{\circ}\text{C}$, adhesión >100 N).

Parámetros de corte : velocidad 500 m/min, avance 0,05 mm/r, profundidad de agujero 50 mm, refrigerante interno de alta presión (20 bar, 5 L/min).

Datos de prueba : vida útil 800 minutos (HSS 100 minutos), Ra 0,3 μm , diámetro del orificio $\pm 0,01$ mm, fuerza de corte 550 N (reducida en un 21%), desgaste <0,05 mm³/h, sin astillado.

Recomendación de selección : broca de grano medio-grueso WC + alto contenido de Co (12 % en peso) + TiAlN, $\varnothing$ 10 mm, refrigeración interna, ángulo superior 135°, refrigeración interna a alta presión.

Fresado de CFRP :

Fresa multidentada ($\varnothing$ 10 mm, 6 flautas, dientes escalonados), WC8%Co (grano ultrafino, D50 0,205 μm , Cr_3C_2 0,5 % en peso), dureza 2000-2200 HV, recubrimiento PVD DLC (3 μm , dureza 3500 HV, fricción 0,08). Ángulo de hélice: 45°, ángulo de inclinación del filo: +5°, radio del filo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,01 mm .

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 (Ra 0,08 μm) , PVD DLC (300°C, adhesión >80 N).

Parámetros de corte : velocidad 2000 m/min, avance 0,05 mm/diente, profundidad de corte 2,0 mm, corte en seco.

Datos de prueba : vida útil 1500 minutos (HSS 200 minutos), Ra 0,15 μm , sin delaminación, fuerza de corte 200 N (reducida en un 33%), desgaste <0,03 mm³/h, tasa de delaminación <1% .

Recomendación de selección : fresa de grano ultrafino WC+DLC, Ø 10 mm, 6 filos, ángulo de hélice 45°, corte en seco + eliminación de polvo.

Rendimiento : Vida útil de 800 a 2000 minutos, eficiencia aumentada en un 50%, Ra 0,15-0,4 μm .

Caso : Procesamiento de álabes de turbina (Ti6Al4V), velocidad 1200 m/min, vida útil 1500 minutos, precisión $\pm 0,01$ mm.

Fabricación de automóviles :

Materiales : acero de alta resistencia (HRC 4050), hierro fundido (HB 200300).

Torneado de acero de alta resistencia :

de torneado WC10%Co (CrN 5 μm) , velocidad 600-1000 m/min.

Rendimiento : Vida útil de 800 a 1500 minutos, Ra 0,1 a 0,3 μm .

Rendimiento : Vida útil de 800 a 1500 minutos, costo de mantenimiento reducido en un 20%.

Caso : Procesamiento de cigüeñal, velocidad 800 m/min, vida útil 1200 minutos, eficiencia aumentada en un 30%.

Moho Procesando :

Materiales : Acero para matrices (P20, HRC 3040), acero inoxidable (316L), impresión 3D 316L.

Fresado de acero inoxidable :

Fresa de extremo (Ø 12 mm, 4 flautas) , WC10%Ni (grano fino, D50 0,51 μm , Cr₃C₂ 0,5 % en peso) , dureza 1800-2000 HV, recubrimiento PVD CrN (5 μm , dureza 2200 HV, fricción 0,2). Ángulo de hélice de 40°, radio del filo de corte de 0,03 mm, flautas de viruta pulidas (Ra < 0,1 μm) .

Tecnología

Molienda de bolas durante 18 h, prensado a 200 MPa, sinterización a 1420°C (10^{-4} Pa, 2 h), HIP a 1350°C (120 MPa, 1,5 h), molienda (Ra 0,1 μm) , PVD CrN (300°C, adhesión >80 N).

Datos de corte

Velocidad 1000 m/min, avance 0,08 mm/diente, profundidad de corte 0,5 mm, refrigerante a base de agua (pH 8, 10 L/min).

Datos de prueba

Vida útil 1000 min (HSS 200 min), Ra 0,25 μm , precisión $\pm 0,008$ mm , fuerza de corte 300 N (reducida en un 25%), desgaste <0,04 mm³/h, sin filo recalado .

Recomendaciones de selección

WCNi (10 wt %) + CrN , fresa de 4 filos de Ø 12 mm, ángulo de hélice de 40°, corte húmedo +

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

limpieza periódica.

Impresión 3D 316L Acabado :

Fresa de punta esférica (Ø 6 mm, 2 flautas) , WC8%Co (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , VC 0,5 % en peso) , dureza 2000-2200 HV , recubrimiento PVD TiAlN+CrN (5 µm , dureza 3200 HV , fricción 0,2). Radio de punta esférica: 3 mm, ángulo de hélice: 35°, radio del filo : 0,02 mm, ranura pulida (Ra < 0,1 µm) .

Tecnología

Molienda de bolas durante 20 h, CIP 280 MPa, sinterización 1400°C (10⁻⁵ Pa, 2,5 h), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 h), molienda (Ra 0,1 µm) , PVD TiAlN+CrN (350°C, adhesión >100 N).

Datos de corte

Velocidad 1200 m/min, avance 0,03 mm/diente, profundidad de corte 0,2 mm, MQL (0,1 L/h).

Datos de prueba

Vida útil 1200 min (HSS 250 min), Ra 0,15 µm (Ra inicial 15 µm) , precisión ±0,005 mm, fuerza de corte 250 N (reducida en un 29%), desgaste <0,04 mm³/h, sin obstrucciones.

Recomendaciones de selección

Fresa de punta esférica de grano ultrafino WC+TiAlN+ CrN , Ø 6 mm, 2 flautas, ángulo de hélice 35°, fresado en capas MQL+ .

actuación

Vida útil: 1000-2000 minutos, precisión: ±0,005-0,008 mm.

Caso

Procesamiento de molde de inyección (316L), velocidad 1000 m/min, vida útil 1800 minutos, Ra 0,2 µm .

Equipos de energía :

Materiales : aleación de alta temperatura (GH4169), CFRP.

Cuchillo :

Fresado de CFRP : fresa de WC8%Co (Ø 10 mm, DLC 3 µm) , velocidad 2000 m/min, vida útil 1500 minutos, sin delaminación.

Rendimiento : Vida útil de 1000 a 2000 minutos, sin delaminación ni astillado.

Caso : Procesamiento de palas de aerogenerador (CFRP), velocidad 1500 m/min, vida útil 2000 minutos.

6. Sugerencias de optimización

Optimización de materiales :

Aleación de titanio : grano ultrafino WC (D50 0,20,5 µm) , Co 6 % en peso , AlTiN 4 µm , resistente al calor 1100 ° C .

Acero inoxidable : WCNi (10 % en peso) , Cr3C2 0,5 % en peso , CrN 5 µm , resistencia a la corrosión <0,01 mm/año .

Aleación de alta temperatura : grano medio grueso WC (12 µm) , Co 12 % en peso , TiAlN 4 µm , KIC >14 MPa·m^{1/2} .

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

CFRP : grano ultrafino WC (0,20,5 μm) , Co 8 % en peso , DLC 3 μm , fricción <0,08.

Metal para impresión 3D : grano ultrafino WC (0,20,5 μm) , Co 8 % en peso , TiAlN+CrN 5 μm , precisión $\pm 0,005$ mm.

Uso general : Cr3C2/VC 0,5 % en peso , dureza aumentada en un 510 %.

Optimización de procesos :

Sinterización : HIP 1350°C, 120 MPa, porosidad <0,001%, consistencia aumentada en un 10%.

Rectificado : Amoladora CNC, muela de diamante (58 μm) , radio del filo de corte <5 μm , Ra < 0,1 μm .

recubrimiento :

AlTiN (4 μm , 350°C, polarización 100 V), resistencia al calor aumentada en un 20% .

CrN (5 μm , 300°C, polarización 80 V) , resistencia a la corrosión aumentada en un 30%.

DLC (3 μm , 300°C, polarización 120 V) , reducción de fricción 50%.

Impresión 3D : moldeo SLM de herramientas complejas (como canales de refrigeración internos), tiempo de ciclo reducido en un 20%, precisión de $\pm 0,01$ mm.

Optimización de equipos :

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 3^\circ\text{C}$, vacío 10^{-5} Pa.

Rectificadora CNC: muela de diamante, desviación $\leq \pm 0,005$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 12 $\mu\text{m}/\text{h}$, desviación de espesor $\leq \pm 0,1$ μm .

Adaptación de las condiciones de trabajo :

Aleación de titanio : corte en seco, recubrimiento de AlTiN , velocidad 800-1200 m/min, ángulo de deflexión principal 75° .

Acero inoxidable : corte húmedo, recubrimiento CrN , velocidad 600-1000 m/min, ángulo de hélice 40° .

Aleación de alta temperatura : refrigeración interna (20 bar), recubrimiento TiAlN , velocidad 500-800 m/min, ángulo superior 135° .

CFRP : corte en seco, recubrimiento DLC, velocidad 1500-2000 m/min, dientes escalonados.

Impresión 3D de metal : MQL (0,1 L/h), recubrimiento TiAlN+CrN , velocidad 1000-1200 m/min, herramienta con punta esférica.

Prueba y verificación :

Microestructura : SEM (grano 0,22 μm) , EBSD (tensión del límite de grano <5%).

Rendimiento : ASTM G65 (tasa de desgaste <0,030,05 mm^3/h), dureza a alta temperatura (>1200 HV, 900°C).

Prueba de corte :

Fuerza de corte: 200550 N (bajada 2033%).

Vida útil: 8002000 minutos (aumentada 4,88 veces) .

Superficie: Ra 0,150,3 μm , precisión $\pm 0,0050,01$ mm.

Fallo: VB <0,10,2 mm, sin astillado/delaminación.

7. Normas y especificaciones

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 183762014 : Porosidad <0,01%, uniformidad >95%.

GB/T 38502015 : Densidad 14,515,0 g/cm³ , desviación <±0,1 g/ cm³.

GB/T 38512015 : Resistencia a la flexión 1,82,8 GPa .

GB/T 79972017 : Dureza 14002200 HV, desviación <±50 HV.

ASTM G 65 : Tasa de desgaste <0,05 mm³/h.

ISO 6508 : Ensayo de dureza, desviación < ±50 HV.

ISO 1832 : Geometría de la herramienta, desviación del filo de corte <±0,01 mm.

ISO 8688 : Prueba de vida de la herramienta, tiempo de corte >500 minutos.

8. Conclusión

La herramienta de corte de alta velocidad de carburo cementado logra alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,03-0,05 mm³/h), dureza al rojo a alta temperatura (800-1000 °C) y estabilidad de corte (vida útil de 800 a 2000 minutos) mediante la optimización de materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , bajo Co 68 % en peso , recubrimiento TiAlN / CrN /DLC 35 μm) y procesos de fabricación avanzados (sinterización HIP 1350 °C, 120 MPa, recubrimiento PVD 300-400 °C). La herramienta es adecuada para la industria aeroespacial (aleaciones de titanio, aleaciones a base de níquel, CFRP), la automoción (acero de alta resistencia), el moldeo (acero inoxidable, metal para impresión 3D) y la energía (CFRP), entre otros campos. Presenta una velocidad de corte de 500 a 2000 m/min, un aumento de la eficiencia de procesamiento del 50 al 100 %, una precisión de ±0,005 a 0,01 mm y un Ra de 0,15 a 0,4 μm . La optimización de granos ultrafinos, recubrimientos compuestos, impresión 3D y rectificado de precisión puede reducir aún más los costes (100 500 yuanes por pieza) y mejorar el rendimiento. Los desafíos radican en la dificultad del procesamiento (los costes de rectificado de diamante aumentan un 20 %) y la adhesión del recubrimiento (se requieren más de 80 N).

CTIA GROUP LTD utiliza nanopulvo de WC (D50 0,20,5 μm) , sinterización HIP (porosidad <0,001 %) y recubrimiento PVD multicapa (TiAlN + CrN , 57 μm) para desarrollar herramientas de torneado, fresas y brocas de alto rendimiento que satisfacen las necesidades de la industria aeroespacial (vida útil >1500 minutos), la automoción (eficiencia aumentada en un 30 %) y el procesamiento de moldes (precisión ±0,005 mm). Los productos están verificados mediante SEM, ASTM G65 e ISO 1832 para garantizar un rendimiento estable.

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

apéndice:

Fresas de punta esférica de carburo

1. Descripción general

Las fresas de punta esférica de carburo son herramientas de fresado cuyo cuerpo o cuchilla está hecho de carburo de tungsteno (como WC-Co o WC-Ni). Su cabezal es esférico y es adecuado para el procesamiento de superficies tridimensionales complejas, cavidades, moldes y piezas de precisión. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad térmica (resistencia de 600-800 °C) las hacen idóneas para el procesamiento de acero, fundición, acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de alta temperatura, satisfaciendo así las necesidades de las industrias aeroespacial, automotriz, de fabricación de moldes y médica, que requieren un procesamiento de superficies de alta precisión (IT6-IT7) y alta calidad.

1. Materiales y fabricación

Composición del material:

Se compone principalmente de carburo de tungsteno (WC, que representa un 80-90%) y aglutinantes (como Co y Ni, que representan un 5-15%), y se añade TiC y TaC para mejorar la resistencia al desgaste. Un alto contenido de Co (como WC-10Co) mejora la tenacidad y es adecuado para el corte intermitente; las aleaciones a base de Ni son resistentes a la corrosión y aptas para el procesamiento en húmedo.

Proceso de fabricación:

Metalurgia de polvos

Mezcle polvos de WC y Co (tamaño de partícula 0,4–1,5 μm), presione el molde (presión 300–500 MPa) y sinterice al vacío a 1350–1450 °C para lograr una dureza de HV1700–1900.

Rectificado de precisión

El cabezal de corte esférico y la ranura en espiral se procesan con una muela de diamante, con una agudeza de borde $<5 \mu\text{m}$ y una rugosidad de superficie $Ra <0,2 \mu\text{m}$, lo que garantiza la precisión de corte y una eliminación suave de la viruta.

Tecnología de recubrimiento

Aplicación de recubrimiento PVD (como TiAlN, El acero de alta velocidad (AlCrN, DLC) con un espesor de 2-4 μm puede reducir el coeficiente de fricción a 0,15-0,3 y prolongar la vida útil de la herramienta entre un 50 y un 100 %.

Ventajas

En comparación con las fresas de bolas de acero de alta velocidad, las fresas de bolas de carburo tienen una velocidad de corte 2 a 3 veces mayor (50 a 200 m/min) y una vida útil 3 a 5 veces más larga.

3. Tipos y aplicaciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fresas de punta esférica estándar

Diámetro de 2-20 mm, 2-4 hojas, adecuado para el procesamiento de cavidades de moldes y superficies curvas, como moldes de lámparas de automóviles (precisión IT7).

Fresa de punta esférica de cuello largo

Alta relación de aspecto ($L/D > 5$), utilizada para el procesamiento de cavidades profundas, como moldes de palas de aviación (profundidad 50-100 mm).

Fresas de microesferas

Diámetro de 0,1 a 2 mm, adecuado para mecanizado de precisión, como implantes médicos (rugosidad superficial $Ra < 0,2 \mu m$).

Fresa de punta esférica de alta dureza

Materiales de dureza de mecanizado HRC50-65, adecuados para acero para moldes y aleaciones de alta temperatura.

Ejemplos de aplicación:

Aeroespacial: Procesamiento de álabes de turbina de aleación de titanio, velocidad de corte 80 m/min, tolerancia $< 5 \mu m$.

Industria del automóvil: fresado de superficies de moldes de plástico, con una producción anual de más de 5 millones de piezas y una vida útil de herramienta de 20.000 piezas/ hoja.

Industria médica: Procesamiento de implantes ortopédicos, rugosidad superficial $Ra < 0,1 \mu m$, precisión IT6.

4. Características técnicas

Alta eficiencia: velocidad de corte 50–200 m/min, velocidad de avance 0,02–0,2 mm/diente, eficiencia de procesamiento aumentada en un 30–50%.

Alta precisión: tolerancia dimensional $< 5 \mu m$, rugosidad superficial $Ra 0,2–0,4 \mu m$, cumpliendo con las normas ISO 1832.

Durabilidad: Las fresas de bolas revestidas tienen una vida útil de 5000 a 10 000 piezas y la frecuencia de cambio de herramientas se reduce en un 50 %.

Reciclabilidad: Las herramientas de desecho se pueden reciclar mediante fusión de zinc o métodos químicos, con una tasa de recuperación de tungsteno de $> 90\%$ y una reducción de costos del 30-40%.

5. Tendencias de desarrollo

Optimización inteligente

Combinado con IA para optimizar el radio del cabezal de la herramienta ($R0,5–R10$) y la trayectoria de corte, el error de mecanizado se reduce en un 25%.

Fabricación ecológica

Investigar y desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co ($< 5\%$) para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje electroquímico para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 60%.

Recubrimientos avanzados

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

Desarrollar recubrimientos nanocompuestos (como TiAlN /DLC) para aumentar la resistencia al desgaste en un 60% y extender la vida útil en 2 veces.

Diseño de alto rendimiento

El ángulo de hélice optimizado (30–40°) y las ranuras de viruta reducen las fuerzas de corte en un 20%, lo que lo hace adecuado para el mecanizado en seco y de alta velocidad.

Las fresas de punta esférica de carburo se han convertido en herramientas esenciales para superficies complejas y mecanizado de precisión gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, y se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial, automotriz, de moldes y médica. En el futuro, mediante la optimización inteligente, el reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, las fresas de punta esférica de carburo mejorarán aún más la eficiencia de procesamiento, reducirán costos e impulsarán el desarrollo sostenible, contribuyendo así a mejorar la competitividad de la industria manufacturera de alta gama de China.

apéndice:

Fresas de carburo

1. Descripción general

Las fresas de carburo son herramientas de fresado vertical cuyo cuerpo o hoja está hecho de carburo de tungsteno (como WC-Co y WC-Ni). Presentan múltiples filos de corte y se utilizan para procesar planos, ranuras, escalones, cavidades y superficies curvas complejas. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad térmica (resistencia de 600-800 °C) las hacen idóneas para procesar acero, fundición, acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de alta temperatura, satisfaciendo así las necesidades de las industrias aeroespacial, automotriz, de fabricación de moldes y de maquinaria de precisión, que requieren un procesamiento de alta precisión (IT6-IT8) y alta eficiencia.

2. Materiales y fabricación

Composición del material

Se compone principalmente de carburo de tungsteno (WC, que representa un 80-90%) y aglutinantes (como Co y Ni, que representan un 5-15%), y se añade TiC y TaC para mejorar la resistencia al desgaste. Un alto contenido de Co (como WC-10Co) aumenta la tenacidad y es adecuado para el corte intermitente; las aleaciones a base de Ni son resistentes a la corrosión y aptas para el procesamiento en húmedo.

Proceso de fabricación

Metalurgia de polvos: mezcla de polvos de WC y Co (tamaño de partícula 0,5–2 µm), moldeo a presión (presión 300–500 MPa), sinterización al vacío a 1350–1450 °C y la dureza alcanza HV1700–1900.

Rectificado de precisión: Se utiliza una muela de diamante para procesar la hoja y la ranura en espiral, con una agudeza de borde <5 µm y una rugosidad de superficie Ra <0,2 µm, lo que garantiza una descarga suave de la viruta.

Tecnología de recubrimiento: Aplicar recubrimiento PVD o CVD (como TiAlN, AlCrN, TiSiN) con un espesor de 2-5 µm, reduce el coeficiente de fricción a 0,2-0,3 y extiende la vida útil de la herramienta en un 50-100%.

Ventajas: Las fresas de carburo cortan de 2 a 4 veces más rápido (50 a 250 m/min) y duran de 3 a 5 veces más que las fresas de HSS.

3. Tipos y aplicaciones

Fresas de extremo plano de carburo

Para procesamiento de planos y ranuras, adecuado para cavidades de moldes de automóviles (profundidad 10-50 mm, precisión IT7).

Fresas de punta redonda de carburo

La cuchilla de arco es adecuada para el procesamiento de superficies curvas y contornos y se utiliza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en cuchillas de turbinas de aviación con una precisión de IT6.

Fresas de punta esférica de carburo

Procesamiento de superficies 3D complejas, como moldes de implantes médicos, con una rugosidad superficial $Ra < 0,4 \mu\text{m}$.

Fresas de desbaste de carburo

El gran ángulo de hélice ($35-45^\circ$) y el borde en forma de onda son adecuados para la eliminación eficiente de material, como piezas de fuselaje de aleación de aluminio.

Ejemplos de aplicación:

Industria del automóvil: Procesamiento de ranuras para carcasas de cajas de cambios, con una producción anual de más de 10 millones de piezas y una vida útil de herramienta de 50.000 piezas/hoja.

Aeroespacial: Fresado de carcasa de aleación de titanio, velocidad de corte 100 m/min, tolerancia $< 8 \mu\text{m}$.

Fabricación de moldes: el procesamiento de acero para moldes de alta dureza (HRC50-60) puede aumentar la vida útil de la herramienta en un 40%.

2. Características técnicas

Alta eficiencia: velocidad de corte 50–250 m/min, velocidad de avance 0,05–0,3 mm/diente, eficiencia de mecanizado aumentada en un 40–60%.

Alta precisión: tolerancia dimensional $< 8 \mu\text{m}$, rugosidad superficial $Ra 0,4-0,8 \mu\text{m}$, cumpliendo con las normas ISO 1832.

Durabilidad: Las fresas recubiertas tienen una vida útil de 5000 a 15 000 piezas y la frecuencia de cambio de herramientas se reduce en un 50 %.

Reciclabilidad: Las herramientas de desecho se pueden reciclar mediante fusión de zinc o métodos químicos, con una tasa de recuperación de tungsteno de $> 90\%$ y una reducción de costos del 30-40%.

5. Tendencias de desarrollo

Optimización inteligente: Combinado con IA para optimizar la cantidad de bordes (2-6 bordes) y los parámetros de corte, el error de mecanizado se reduce en un 30%.

Fabricación ecológica: investigar y desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co ($< 5\%$) para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje de líquidos iónicos para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 60%.

Recubrimientos avanzados: Desarrollar recubrimientos nanocompuestos (como TiAlN /DLC) que aumenten la resistencia al desgaste en un 60% y extiendan la vida útil 2 veces.

Diseño de alto rendimiento: el ángulo de hélice optimizado ($30-45^\circ$) y las ranuras de viruta reducen las fuerzas de corte en un 20%, adecuado para el mecanizado de alta velocidad.

Las fresas de carburo se han convertido en herramientas clave para el fresado gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, y se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial, automotriz y de fabricación de moldes. En el futuro, mediante la optimización inteligente, el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, las fresas de carburo mejorarán aún más la eficiencia del procesamiento, reducirán los costos y promoverán el desarrollo sostenible, contribuyendo así a mejorar la competitividad de la industria manufacturera de alta gama de China.

apéndice:

Fresa de carburo de múltiples dientes

1. Fresa multidiente de carburo

Las fresas multidientes de carburo son herramientas de corte con carburo de tungsteno (como WC-Co, WC-Ni) como material del cuerpo o la hoja, con múltiples dientes de corte. Se utilizan ampliamente en el fresado de planos, ranuras, escalones, superficies curvas y superficies complejas. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas (retención de la resistencia de 600-800 °C) las hacen ideales para procesar acero, fundición, acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de alta temperatura, satisfaciendo las necesidades de las industrias aeroespacial, automotriz, de fabricación de moldes y energética, que requieren un procesamiento de alta precisión (IT6-IT8) y alta eficiencia.

2. Materiales y fabricación de fresas multidientes de carburo cementado

Composición del material: Principalmente compuesto de carburo de tungsteno (WC, representando un 80-90%) y aglutinante (como Co, Ni, representando un 5-15%), con TiC y TaC añadidos para mejorar la resistencia al desgaste. El alto contenido de Co (como WC-10Co) mejora la tenacidad y es adecuado para el fresado intermitente; las aleaciones a base de Ni son resistentes a la corrosión y aptas para el mecanizado en húmedo.

Proceso de fabricación:

Metalurgia de polvos: mezcla de polvos de WC y Co (tamaño de partícula 0,5–2 μm), moldeo a presión (presión 300–500 MPa), sinterización al vacío a 1350–1450 °C y la dureza alcanza HV1700–1900.

Rectificado de precisión: se utiliza una muela de CBN o diamante para procesar los dientes y las ranuras, con una agudeza de borde $<5 \mu\text{m}$ y una rugosidad de superficie $R_a < 0,2 \mu\text{m}$, lo que garantiza una descarga suave de la viruta.

Tecnología de recubrimiento: Aplicar recubrimiento PVD o CVD (como TiAlN, AlCrN, TiSiN) con un espesor de 2-5 μm , reduce el coeficiente de fricción a 0,2-0,3 y extiende la vida útil de la herramienta en un 50-100%.

Ventajas: En comparación con las fresas de acero de alta velocidad, las fresas de carburo de múltiples dientes tienen una velocidad de corte de 2 a 4 veces mayor (50-250 m/min) y una vida útil de 3 a 5 veces más larga.

3. Tipos y aplicaciones de las fresas multidientes de carburo

Fresas de carburo de múltiples dientes

El diseño de múltiples dientes (4-8 dientes) es adecuado para el procesamiento lateral y de ranuras, como cavidades de moldes automotrices (profundidad de 10 a 50 mm, precisión IT7).

Fresa de planear de carburo de múltiples dientes

Gran diámetro y dientes múltiples (6-12 dientes) para un procesamiento eficiente de superficies planas, adecuado para paneles de alas de aleación de aluminio de aviación (rugosidad de superficie

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ra <0,8 μ m).

Fresa de punta redonda de carburo de múltiples dientes

La cuchilla de arco es adecuada para el procesamiento de superficies curvas y se utiliza en cuchillas de turbina con una precisión de IT6.

Fresa de carburo con dientes múltiples para chaveteros

Procesamiento de chaveteros de alta precisión, como ejes principales de turbinas eólicas (ancho de ranura de 5 a 20 mm, tolerancia <10 μ m).

Ejemplos de aplicación:

Industria del automóvil: Procesamiento de planos de culatas de cilindros de motores, con una producción anual de más de 20 millones de piezas y una vida útil de herramienta de 50.000 piezas/hoja.

Aeroespacial: Fresado de carcasa de aleación de titanio, velocidad de corte 100 m/min, rugosidad superficial Ra<0,4 μ m.

Fabricación de moldes: el procesamiento de acero para moldes de alta dureza (HRC50-60) puede aumentar la vida útil de la herramienta en un 40%.

4. Características técnicas de la fresa multidiente de carburo

Alta eficiencia: velocidad de corte 50–250 m/min, velocidad de avance 0,05–0,3 mm/diente, eficiencia de mecanizado aumentada en un 40–60%.

Alta precisión: tolerancia dimensional <8 μ m, rugosidad superficial Ra0,4–0,8 μ m, cumpliendo con las normas ISO 1832.

Durabilidad: La vida útil de las fresas revestidas es de 5.000 a 15.000 piezas y la frecuencia de cambio de herramientas se reduce en un 50%.

Reciclabilidad: Las herramientas de desecho se pueden reciclar mediante fusión de zinc o métodos químicos, con una tasa de recuperación de tungsteno de >90% y una reducción de costos del 30-40%.

5. Tendencia de desarrollo de las fresas multidientes de carburo cementado

Optimización inteligente

Combinado con la optimización de IA del número de dientes (4-12 dientes) y de los parámetros de corte, el error de mecanizado se reduce en un 30%.

Fabricación ecológica

Desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co (<5%) para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje de líquidos iónicos para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 60%.

Recubrimientos avanzados

Desarrollar recubrimientos nanocompuestos (como TiAlN /Si3N4) para aumentar la resistencia al desgaste en un 60% y extender la vida útil en 2 veces.

Diseño modular

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

Promover la estandarización de insertos indexables y cabezales de corte (ISO 1832), reduciendo los costos de inventario en un 20%.

Las fresas multidientes de carburo se han convertido en herramientas clave para el fresado gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, y se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial, automotriz y de fabricación de moldes. En el futuro, mediante la optimización inteligente, el reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, las fresas multidientes de carburo mejorarán aún más la eficiencia del procesamiento, reducirán los costos y promoverán el desarrollo sostenible, contribuyendo así a la competitividad de la industria manufacturera de alta gama 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:

Broca sólida de carburo

1. Descripción general de la broca sólida de carburo

Las brocas de carburo sólido son herramientas de perforación fabricadas con carburo de tungsteno (como WC-Co y WC-Ni) como material principal, y se utilizan ampliamente en el procesamiento de agujeros, como taladrado y escariado. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas (600-800 °C manteniendo la resistencia) las hacen ideales para procesar acero, fundición, acero inoxidable, aleaciones de aluminio y aleaciones de alta temperatura, satisfaciendo las necesidades de las industrias aeroespacial, automotriz, de fabricación de moldes y energética para un procesamiento de agujeros de alta precisión (IT7-IT9) y alta eficiencia.

2. Materiales y fabricación de brocas de carburo cementado

Composición del material

Se compone principalmente de carburo de tungsteno (WC, que representa un 85-95%) y aglutinante (como Co, que representa un 5-12%), y se añade TiC y VC para mejorar la resistencia al desgaste. Un alto contenido de Co (como WC-10Co) mejora la tenacidad y es adecuado para el corte intermitente; un bajo contenido de Co (como WC-6Co) mejora la dureza y es adecuado para el procesamiento a alta velocidad.

Proceso de fabricación

Metalurgia de polvos: mezcla de polvos de WC y Co (tamaño de partícula 0,4–1,5 μm), moldeo a presión (presión 300–500 MPa), sinterización al vacío a 1350–1450 °C y la dureza alcanza HV1800–2000.

Rectificado de precisión: se utiliza una muela de diamante para procesar el borde de la broca y la ranura en espiral, la agudeza del borde es $<5 \mu\text{m}$ y la rugosidad de la superficie Ra es $<0,2 \mu\text{m}$, lo que garantiza una descarga suave de la viruta.

Tecnología de recubrimiento: Aplicación de recubrimiento PVD (como TiAlN, AlCrN) con un espesor de 2-4 μm , reduce el coeficiente de fricción a 0,2-0,3 y mejora la resistencia al desgaste en un 50-80%.

Ventajas

En comparación con las brocas de acero de alta velocidad, las brocas sólidas de carburo tienen una velocidad de corte 2-3 veces mayor (30-150 m/min) y una vida útil 4-6 veces mayor.

3. Tipos y aplicaciones de brocas sólidas de carburo

Broca helicoidal sólida de carburo

Diseño en espiral estándar, adecuado para el procesamiento de orificios en general, como orificios para bloques de cilindros de motores de automóviles (diámetro de 5 a 50 mm, precisión IT8).

Broca de centro sólido de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se utiliza para posicionamiento y pretaladrado, procesamiento de orificios centrales de piezas de aviación, precisión IT7.

de carburo sólido para agujeros profundos

Alta relación de aspecto ($L/D > 5$), con canal de enfriamiento interno, procesamiento de orificios profundos de cuerpos de válvulas hidráulicas (profundidad 100-500 mm).

Broca escalonada integral de carburo

Procesamiento completo de orificios de varios niveles a la vez, adecuado para piezas de molde y aumenta la eficiencia en un 30%.

Casos de aplicación de broca integral de carburo cementado :

Industria del automóvil: Procesamiento de agujeros para carcasas de cajas de cambios, con una producción anual de más de 100 millones de piezas y una vida útil de perforación de 20.000 agujeros/ hoja.

Aeroespacial: Perforación de orificios para carcasas de aleación de titanio, velocidad de corte 60 m/min, tolerancia del diámetro del orificio $< 10 \mu\text{m}$.

Industria energética: Procesamiento de orificios de husillo de turbinas eólicas, rugosidad de la superficie $R_a < 0,8 \mu\text{m}$, vida útil aumentada en un 50%.

4. Características técnicas de las brocas integrales de carburo

Alta eficiencia: velocidad de corte 30–150 m/min, velocidad de avance 0,05–0,3 mm/rev, eficiencia de mecanizado aumentada en un 40%.

Alta precisión: tolerancia de apertura $< 8 \mu\text{m}$, error de redondez $< 5 \mu\text{m}$, cumpliendo con los estándares ISO 8015.

Durabilidad: Las brocas recubiertas tienen una vida útil de 10 000 a 20 000 orificios y la frecuencia de cambio de herramienta se reduce en un 60 %.

Reciclabilidad: Las brocas usadas se pueden reciclar mediante la fusión de zinc o métodos químicos, con una tasa de recuperación de tungsteno de $> 90\%$ y una reducción de costos del 30 al 40%.

5. Tendencia de desarrollo de brocas integrales de carburo cementado

Diseño inteligente: combinado con IA para optimizar el ángulo de la hélice ($25\text{--}35^\circ$) y los parámetros de corte, el error de mecanizado se reduce en un 25%.

Fabricación ecológica: investigar y desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co ($< 5\%$) para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje electroquímico para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 60%.

Recubrimientos avanzados: Desarrollar recubrimientos nano-multicapa (como TiAlN /DLC), que mejoran la resistencia al desgaste en un 60% y extienden la vida útil en 2 veces.

Tecnología de refrigeración interna: Diseño optimizado del canal de refrigeración interna (presión 10-20 bar), temperatura de corte reducida en un 30%, adecuado para procesamiento en seco o con lubricación mínima.

Gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, las brocas de carburo sólido se utilizan ampliamente en las industrias aeroespacial, automotriz y energética. En el futuro, gracias al

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

diseño inteligente, el reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, mejorarán aún más la eficiencia del procesamiento, reducirán costos y promoverán el desarrollo sostenible, contribuyendo así a la competitividad de la industria manufacturera de alta gama de China.

apéndice:

Herramienta de torneado exterior de carburo

1. Descripción general de las herramientas de torneado exterior de carburo

Las herramientas de torneado exterior de carburo son herramientas de corte cuyo cabezal está hecho de carburo de tungsteno (como WC-Co y WC-Ni). Se utilizan ampliamente para torneear superficies cilíndricas externas, caras frontales, escalones y ranuras. Su alta dureza (HV1600-2000), excelente resistencia al desgaste y estabilidad térmica (retención de resistencia de 600-800 °C) las hacen idóneas para el mecanizado de acero al carbono, acero aleado, acero inoxidable, fundición y aleaciones termorresistentes, satisfaciendo así las necesidades de las industrias automotriz, aeroespacial, de fabricación de moldes y de maquinaria general, que requieren mecanizado de alta precisión (IT6-IT8) y alta eficiencia.

2. Materiales y fabricación de herramientas de torneado exterior de carburo cementado

Composición del material: Principalmente compuesto de carburo de tungsteno (WC, representando un 80-90%) y aglutinantes (como Co y Ni, representando un 5-15%), con adición de TiC y TaC para mejorar la resistencia al desgaste. El Co mejora la tenacidad (como el WC-8Co para mecanizado de desbaste) y el Ni mejora la resistencia a la corrosión (adecuado para corte en húmedo).

Proceso de fabricación:

Metalurgia de polvos: mezcla de polvos de WC y Co (tamaño de partícula 0,5–2 μm), moldeo a presión (presión 200–400 MPa), sinterización al vacío a 1350–1450 °C y la dureza alcanza HV1700–1900.

Rectificado de precisión: Se utiliza una muela de diamante para procesar el cabezal de corte, con una agudeza de borde $<5 \mu\text{m}$ y una rugosidad de superficie $Ra <0,2 \mu\text{m}$, lo que garantiza la precisión de corte.

Tecnología de recubrimiento: Aplicar recubrimiento PVD o CVD (como TiN, TiCN, Al_2O_3) con un espesor de 2-6 μm , reduce el coeficiente de fricción a 0,2-0,3 y extiende la vida útil de la herramienta en un 50-80%.

Ventajas: En comparación con las herramientas de torneado de acero de alta velocidad, las herramientas de torneado de carburo tienen una velocidad de corte de 2 a 4 veces mayor (50-200 m/min) y una vida útil de 3 a 6 veces más larga.

3. Tipos y aplicaciones de herramientas de torneado exterior de carburo cementado

Herramienta de torneado exterior de carburo - herramienta de torneado indexable

Las cuchillas son reemplazables y muy versátiles, lo que las hace adecuadas para la producción en masa, como el mecanizado de cigüeñales de automóviles (diámetro 50-200 mm, precisión IT7).

Herramienta de torneado exterior de carburo - herramienta de torneado soldada

El cabezal de corte está soldado al cuerpo de corte de acero, lo que tiene un bajo costo y es adecuado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para plantas de procesamiento pequeñas y medianas para procesar el círculo exterior del cuerpo de la bomba.

Herramienta de torneado exterior de carburo - herramienta de torneado integral

El cabezal de corte está integrado con el cuerpo de corte, lo que es adecuado para el procesamiento de alta precisión, como ejes de turbinas de aviación (diámetro de 20 a 100 mm, precisión IT6).

Ejemplos de aplicación:

Industria del automóvil: Procesamiento de cilindros de motores, con una producción anual de más de 50 millones de piezas y una vida útil de herramienta de 10.000 piezas/ hoja.

Aeroespacial: Disco de turbina de aleación de titanio torneado, velocidad de corte 80 m/min, rugosidad superficial $Ra < 0,8 \mu m$.

Fabricación de moldes: el procesamiento de acero para moldes de alta dureza (HRC50-60) puede aumentar la vida útil de la herramienta en un 40%.

4. Características técnicas de las herramientas de torneado exterior de carburo cementado

Alta eficiencia: velocidad de corte 50–200 m/min, velocidad de avance 0,1–0,4 mm/rev, eficiencia de mecanizado aumentada en un 30–50%.

Alta precisión: tolerancia dimensional $< 10 \mu m$, rugosidad superficial $Ra 0,4–0,8 \mu m$, cumpliendo con las normas ISO 1832.

Durabilidad: La vida útil de las herramientas de torneado recubiertas alcanza las 5.000-10.000 piezas y la frecuencia de cambio de herramienta se reduce en un 60%.

Reciclabilidad: Las hojas de desecho se pueden reciclar mediante fusión de zinc o métodos químicos, con una tasa de recuperación de tungsteno de $> 90\%$ y una reducción de costos de 30-40%.

5. Tendencia de desarrollo de herramientas de torneado exterior de carburo cementado

Optimización inteligente: combinado con IA para optimizar los parámetros de corte (como el ángulo de desviación principal y la profundidad de corte), la eficiencia del procesamiento mejora en un 20%.

Fabricación ecológica: investigar y desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co ($< 5\%$) para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje electroquímico para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 50%.

Recubrimientos avanzados: Desarrollar recubrimientos nanocompuestos (como TiAlN /Si3N4) que aumenten la resistencia al desgaste en un 60% y extiendan la vida útil 2 veces.

Diseño modular: Promueve la estandarización de insertos indexables (ISO 1832), reduciendo los costos de inventario de herramientas en un 25%.

Gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, las herramientas de torneado exterior de carburo cementado se han convertido en las herramientas clave para el torneado exterior y se utilizan ampliamente en las industrias automotriz, aeroespacial y de fabricación de moldes. En el futuro, mediante la optimización inteligente, el reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, las herramientas de torneado exterior de carburo cementado mejorarán aún más la eficiencia del procesamiento, reducirán los costos y promoverán el desarrollo sostenible,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contribuyendo así a mejorar la competitividad de la industria manufacturera de alta gama 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:

Fresas de carburo para engranajes

1. Descripción general de las herramientas para engranajes de carburo

Las fresas de carburo para engranajes son herramientas de corte especiales fabricadas con carburo de tungsteno (como WC-Co y WC-Ni) como material principal. Se utilizan ampliamente en el procesamiento de engranajes, como el tallado, conformado, afeitado y rectificado. Su alta dureza (HV1600-2000), su excelente resistencia al desgaste y su dureza al rojo a altas temperaturas (600-800 °C manteniendo su alta resistencia) las hacen idóneas para procesar materiales como acero de alta resistencia, acero aleado y acero inoxidable, satisfaciendo así las necesidades de engranajes de alta precisión (con una precisión de hasta ISO 4-6) en las industrias automotriz, aeroespacial, energética y de maquinaria pesada.

2. Materiales y fabricación de herramientas para engranajes de carburo

Composición del material: Principalmente compuesto de carburo de tungsteno (WC, que representa un 80-90%) y aglutinantes (como Co y Ni, que representan un 5-15%), con una pequeña cantidad de TiC y TaC añadida para mejorar la resistencia al desgaste. A mayor contenido de Co, mayor tenacidad (como WC-10Co); las aleaciones a base de Ni son resistentes a la corrosión y aptas para entornos especiales.

Proceso de fabricación:

Metalurgia de polvos: mezclar WC, Co y otros polvos (tamaño de partícula 0,5-2 µm), prensar para darle forma (presión 300-500 MPa) y sinterizar a 1350-1500 °C al vacío o en atmósfera de hidrógeno para lograr una dureza de HV1800.

Rectificado de precisión: La muela de rectificado CBN se utiliza para procesar el perfil del diente de la herramienta, con una rugosidad superficial $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ y un radio del filo de corte $< 10 \mu\text{m}$ para garantizar la precisión del corte.

Tecnología de recubrimiento: Aplicar recubrimiento PVD o CVD (como TiN, TiAlN, AlCrN) con un espesor de 2-5 µm, reduce el coeficiente de fricción (0,2-0,4) y prolonga la vida útil en un 50-100%.

Ventajas: En comparación con el acero de alta velocidad (HSS), la vida útil de la herramienta de carburo es de 3 a 5 veces más larga y la velocidad de corte es de 2 a 3 veces mayor (100 a 300 m/min).

3. Tipos y aplicaciones de las fresas para engranajes de carburo cementado

Fresa de carburo para engranajes

Se utiliza para desbastar y acabar engranajes rectos y helicoidales con alta eficiencia de procesamiento, adecuado para engranajes de transmisión automotriz (módulo 1-10).

Fresa de carburo para dar forma a engranajes

Procesamiento de engranajes internos y formas de dientes especiales con precisión ISO 5 para cajas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de engranajes de aviación.

Cortador de carburo para afeitar engranajes

La superficie del diente está finamente mecanizada, con una rugosidad superficial de $Ra < 0,8 \mu m$, lo que es adecuado para la producción en masa de engranajes de alta precisión.

Cuchilla de carburo para afilar engranajes

La superficie del diente endurecida ($HRC > 60$) se mecaniza utilizando un sustrato de carburo cementado combinado con un recubrimiento de CBN, con una precisión ISO 3-4, para energía eólica y engranajes ferroviarios de alta velocidad.

Ejemplos de aplicación:

Industria del automóvil: Procesamiento de engranajes para cajas de cambios, con una producción anual de más de 100 millones de piezas y una vida útil de herramienta de 100.000 piezas/ hoja.

Aeroespacial: Mecanizado de engranajes de motores de turbina, módulo 0,5-2, precisión ISO 4, reducción del 20% en las fuerzas de corte.

4. Características técnicas de los engranajes de carburo.

Alta eficiencia: velocidad de corte 150-300 m/min, velocidad de avance 0,1-0,5 mm/rev, eficiencia de mecanizado aumentada en un 40%.

Alta precisión: error de perfil de diente $< 5 \mu m$, error de paso de diente $< 3 \mu m$, cumpliendo con el estándar DIN 3962.

Durabilidad: La vida útil de la herramienta de carburo recubierto alcanza las 5.000 a 10.000 piezas, lo que reduce la frecuencia de cambio de herramienta en un 50%.

Reciclabilidad: Las herramientas de desecho se pueden reciclar mediante el método químico o el método de fusión de zinc, con una tasa de recuperación de tungsteno $> 90\%$ y una reducción de costos del 30-40%.

5. Tendencia de desarrollo de engranajes de carburo cementado

Diseño inteligente: combinado con IA para optimizar la forma del diente y los parámetros de corte, el error de procesamiento se reduce en un 30%.

Fabricación ecológica: Desarrollar carburo cementado con bajo contenido de Co ($< 5\%$) o libre de Co para reducir el impacto ambiental; promover la tecnología de reciclaje de líquidos iónicos para reducir las emisiones de líquidos residuales en un 60%.

Recubrimiento compuesto: Investigación y desarrollo de recubrimientos nano multicapa (como TiAlN /DLC), que mejoran la resistencia al desgaste en un 50% y extienden la vida útil en 2 veces.

Fabricación aditiva : explore sustratos de herramientas de carburo impresos en 3D para reducir el costo de fabricación de formas de dientes complejas en un 20%.

Las herramientas de corte de engranajes de carburo se han convertido en herramientas esenciales para el procesamiento de engranajes gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste y alta precisión, y se utilizan ampliamente en las industrias automotriz, aeroespacial y energética. En el futuro, gracias al diseño inteligente, el reciclaje ecológico y la tecnología avanzada de recubrimiento, las herramientas de corte de engranajes de carburo mejorarán aún más la eficiencia, reducirán los costos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y promoverán el desarrollo sostenible, contribuyendo así a la competitividad global de la industria manufacturera de alta gama de China.

apéndice:

Cortador de engranajes de carburo para turbinas eólicas

El cortador de engranajes de carburo para turbinas eólicas se basa en carburo de tungsteno (WC) (WC 8594 % en peso , Co 615 % en peso). Mediante rectificado de precisión y recubrimiento PVD/CVD (como TiAlN , AlCrN (46 μm) alcanza una alta dureza (1800-2200 HV), resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,05 mm^3/h , ASTM G65) y dureza a altas temperaturas (800-1000 $^{\circ}\text{C}$, dureza >1200 HV). Está especialmente diseñado para engranajes de aerogeneradores (42CrMo4, 18CrNiMo76, HRC 5562, módulo 1040), apto para tallado de engranajes , conformado de engranajes, fresado de discos y torneado en duro, con una velocidad de corte de 100-500 m/min, una vida útil de 500-2000 minutos , una precisión de perfil de diente AGMA 1012 y una rugosidad superficial de Ra 0,4-0,8 μm .

Este artículo se basa en normas nacionales (GB/T 183762014, GB/T 79972017) y prácticas de la industria, y explica las herramientas de corte, los procesos de fabricación, el rendimiento, las aplicaciones y las estrategias de optimización. Recomienda moderadamente las capacidades de personalización de herramientas de corte de alto rendimiento de CTIA GROUP LTD y no tiene relación con las nuevas celdas electrolíticas de energía ni con los procesos de carburación/descarburación.

1. Descripción general de las herramientas de engranajes de carburo para energía eólica

1.1 Definición y características de las herramientas de engranajes de carburo cementado para turbinas eólicas

Las fresas para engranajes de turbinas eólicas de carburo cementado cumplen con los requisitos de procesamiento de gran módulo (1040) y alta dureza (HRC 5562) de engranajes de turbinas eólicas a través de sustrato de grano ultrafino/medio-grueso WC (0,22 μm), recubrimiento PVD/CVD (TiAlN / AlCrN) y mecanizado de precisión (desviación del perfil del diente $\leq \pm 0,005 \text{ mm}$).

Características de los cortadores de engranajes de carburo para energía eólica :

Alta dureza: 1800-2200 HV, la resistencia al desgaste es 510 veces mejor que el acero de alta velocidad (HSS, 800 HV).

Resistencia al calor : 800-1000 $^{\circ}\text{C}$, adecuado para corte en seco/con lubricación de cantidad mínima (MQL).

Resistencia al desgaste : tasa de desgaste <0,05 mm^3/h , vida útil 500-2000 minutos.

Resistencia al impacto : resistencia a la flexión 1,82,8 GPa , tenacidad a la fractura KIC 1015 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Aplicaciones : Engranajes de energía eólica (engranajes planetarios, engranajes del eje principal), componentes de cajas de engranajes.

1.2 Tipos de cortadores de engranajes de carburo para turbinas eólicas

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

Fresadora : Fresadora de engranajes de corte grueso y fino , velocidad 100-400 m/min.

Fresa para conformado de engranajes : procesamiento de engranajes internos y externos, velocidad 150300 m/min.

Fresa de disco : fresado de ranuras de dientes, velocidad 200-500 m/min.

Herramienta de torneado duro : torneado duro (HRC 5562), velocidad 80200 m/min.

1.3 Ventajas de las herramientas de engranajes de carburo para energía eólica

Eficiencia: la velocidad de corte es 35 veces mayor que la del HSS y la eficiencia aumenta entre un 30 y un 50 %.

Vida útil : Vida útil de la herramienta recubierta: 500-2000 minutos (HSS 100-300 minutos).

Precisión : Precisión del perfil del diente AGMA 1012, Ra 0,40,8 μm .

Adaptabilidad : Adecuado para gran módulo, mecanizado duro, corte seco/húmedo.

2. Materiales para herramientas de engranajes eólicos de carburo cementado

2.1 Ingredientes

Base de herramienta para engranajes de turbina eólica de carburo :

WC : 8594 % en peso , tamaño de grano 0,22 μm .

Grano ultrafino (0,2-0,5 μm) : dureza 2000-2200 HV, mecanizado fino.

Grano medio grueso (12 μm) : tenacidad KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, mecanizado basto.

Co : 615 % en peso .

Bajo Co (68 % en peso): dureza 1800-2200 HV, fuerte resistencia al desgaste.

Alto Co (1015 % en peso) : resistencia a la flexión 2,22,8 GPa , buena resistencia al impacto.

Aditivo : Cr3C2/VC (0,21 % en peso), dureza aumentada en un 510 %.

Recubrimiento de herramientas para engranajes de turbinas eólicas de carburo :

TiAlN (PVD) : dureza 3000-3300 HV, resistencia al calor 900-1100 °C, vida útil aumentada en un 3050 %.

AlCrN (PVD) : Dureza 3000 HV, coeficiente de fricción 0,3, adecuado para mecanizado duro.

GC4240 (CVD) : Dureza 2800 HV, excelente resistencia al desgaste, adecuado para mecanizado en bruto.

2.2 Estructura de gradiente de la fresa de engranajes de turbina eólica de carburo cementado

Superficie : bajo contenido de Co (68 % en peso), grano ultrafino WC (0,2-0,5 μm) , dureza 2000-2200 HV.

Núcleo : Alto contenido de Co (1012 % en peso), grano medio - grueso WC (12 μm) , KIC 1215 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Ventajas : La resistencia al desgaste aumentó en un 2030%, la resistencia al impacto aumentó en un 1520%, la probabilidad de grietas se redujo en un 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Preparación : Prensado en capas + sinterización HIP (1350°C, 120 MPa).

2.3 Requisitos de rendimiento de las herramientas para engranajes de turbinas eólicas de carburo cementado

Dureza: 18002200 HV (GB/T 79972017).

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

Tenacidad a la fractura: 1015 MPa·m^{1/2}.

Resistencia al desgaste: Tasa de desgaste <0,05 mm³/h (ASTM G65).

Conductividad térmica: 80100 W/ m· K.

3. Proceso de fabricación de cortadores de engranajes de carburo cementado para aerogeneradores

3.1 Preparación del polvo

Materias primas : WC (D50 0,22 μm , pureza >99,9%), Co (D50 12 μm) , Cr3C2 /VC (D50 0,51 μm) .

Molienda de bolas : molino de bolas planetario (bolas de ZrO2, 10:1), 300 rpm, 1624 h, desviación del tamaño de partícula <±0,1 μm , uniformidad >95%.

3.2 Formación

Método : Prensado isostático en frío (CIP).

Parámetros : 250300 MPa, presión de mantenimiento 60 segundos, molde de acero (desviación <±0,05 mm), densidad de la palanquilla 8,710,5 g/cm³ .

Resultados : Desviación dimensional <±0,1 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 ppm), 10⁻² Pa .

Sinterización: 1350-1450°C, 10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa, 23 h.

CADERA: 1350°C, 120 MPa (Ar), 12 h.

Resultados : Densidad 14,815,0 g/cm³ , porosidad <0,001%, dureza 18002200 HV.

3.4 Mecanizado de precisión

Rectificado : Rectificadora CNC, muela de diamante (510 μm) , 3000 rpm, avance 0,010,05 mm/pasada, desviación del perfil del diente <±0,005 mm, Ra 0,10,2 μm .

Pulido : pasta de pulido de diamante (13 μm) , 800 rpm, Ra <0,1 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Recubrimiento

Método : PVD/CVD (objetivos Ti/Al/Cr, >99,99%).

Parámetros : TiAlN / AlCrN ($46\text{ }\mu\text{m}$), 10^{-4} Pa , 300-450 °C, polarización de 80 a 100 V, velocidad de deposición de $1\text{ }\mu\text{m/h}$.

Resultados : Adherencia >80 N, resistencia térmica 900-1100°C, vida útil aumentada en 3050%.

3.6 Detección

Microestructura : SEM (grano $0,22\text{ }\mu\text{m}$), XPS (desviación $\leq \pm 0,1\%$ en peso).

Rendimiento : Desviación de dureza $\leq \pm 50\text{ HV}$ (ISO 6508), volumen de desgaste $< 0,05\text{ mm}^3/\text{h}$ (ASTM G65), resistencia a la flexión 1,82,8 GPa.

Geometría : CMM, desviación de la forma del diente $< \pm 0,005\text{ mm}$ (AGMA 1012).

4. Escenarios de aplicación de herramientas de engranajes de carburo cementado para turbinas eólicas

Las herramientas de corte de engranajes de carburo para turbinas eólicas proporcionan herramientas de corte, parámetros de proceso, datos de prueba y sugerencias de selección para las siguientes condiciones de trabajo para el mecanizado eficiente de engranajes de turbinas eólicas (módulo 1040, HRC 5562):

Tallado de engranajes en bruto (42CrMo4, HRC 55) :

Condiciones de trabajo : material 42CrMo4 (HRC 55), módulo 20, diámetro del engranaje $\varnothing 800\text{ mm}$, mecanizado en bruto.

Cuchillo :

Tipo : Placa de cocción ($\varnothing 200\text{ mm}$, 12 dientes).

Matriz : WC12%Co (grano medio-grueso, D50 $12\text{ }\mu\text{m}$, VC 0,5 % en peso), dureza 1600-1800 HV, KIC $1415\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Recubrimiento : CVD GC4240 ($6\text{ }\mu\text{m}$, dureza 2800 HV, resistencia al calor 1000°C).

Geometría : ángulo de presión 20°, radio de la parte superior del diente 0,5 mm, flancos de los dientes pulidos ($R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

Proceso : molienda de bolas durante 22 horas, CIP 300 MPa, sinterización 1450 °C (10^{-5} Pa , 3 horas), HIP 1350 °C (120 MPa, 2 horas), rectificado (desviación del perfil del diente $\leq \pm 0,005\text{ mm}$), CVD GC4240 (450 °C, adhesión >80 N).

Parámetros de corte : velocidad 200 m/min, avance 2 mm/r, profundidad de corte 5 mm, MQL ($0,2\text{ L/h}$).

Datos de prueba :

Vida útil: 800 minutos (HSS 200 minutos, 4 veces más).

Precisión: AGMA grado 10, $R_a 0,8\text{ }\mu\text{m}$.

Fuerza de corte: 1200 N (HSS 1500 N, reducida en un 20%).

Pérdida por desgaste: VB <0,3 mm, $< 0,05\text{ mm}^3/\text{h}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Recomendación de selección : grano medio-grueso WC + alto contenido de Co (12 % en peso) + GC4240, fresa de Ø 200 mm, MQL + inspección regular del desgaste de la superficie de los dientes.

Tallado de engranajes de precisión (18CrNiMo76, HRC 60) :

Condiciones de trabajo : material 18CrNiMo76 (HRC 60), módulo 15, diámetro del engranaje Ø 600 mm, mecanizado fino.

Cuchillo :

Tipo : Placa de coacción (Ø 180 mm, 10 dientes).

Matriz : WC6%Co (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 2000-2200 HV.

Recubrimiento : PVD TiAlN (4 µm , dureza 3300 HV, resistencia al calor 1100°C).

Geometría : ángulo de presión 20°, radio de la punta del diente 0,3 mm, radio del filo de corte 0,02 mm.

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 (Ra 0,1 µm) , PVD TiAlN (350°C, adhesión >100 N).

Parámetros de corte : velocidad 300 m/min, avance 0,5 mm/r, profundidad de corte 1 mm, corte en seco.

Datos de prueba :

Vida útil: 1200 minutos (HSS 250 minutos, 4,8 veces más) .

AGMA grado 12, Ra 0,4 µm .

Fuerza de corte: 800 N (HSS 1000 N, reducida en un 20%).

Pérdida por desgaste: VB <0,2 mm, <0,04 mm³/h.

Recomendación de selección : grano ultrafino WC + bajo Co (6 % en peso) + TiAlN , fresa de Ø 180 mm , corte en seco + máquina herramienta de alta precisión.

Conformación de engranajes (42CrMo4, HRC 58) :

Condiciones de trabajo : Material 42CrMo4 (HRC 58), módulo 25, engranaje interior Ø 1000 mm.

Cuchillo :

Tipo : Fresa para dar forma a engranajes (Ø 150 mm, 8 dientes).

Matriz : WC10%Co (grano fino, D50 0,51 µm , Cr3C2 0,5 % en peso), dureza 1800-2000 HV.

Recubrimiento : PVD AlCrN (5 µm , dureza 3000 HV, fricción 0,3).

Geometría : ángulo de presión 20°, radio del filo de corte 0,03 mm, lado del diente pulido (Ra <0,1 µm) .

Procesamiento : molienda de bolas durante 18 horas, CIP 280 MPa, sinterización 1420°C (10⁻⁴ Pa, 2 horas), HIP 1350°C (120 MPa, 1,5 horas), molienda (Ra 0,1 µm) , PVD AlCrN (400°C, adhesión >80 N).

Parámetros de corte : velocidad 200 m/min, avance 0,1 mm/carrera, profundidad de corte 2 mm, corte húmedo (10 L/min).

Datos de prueba :

Vida útil: 1000 minutos (HSS 300 minutos, aumentada 3,3 veces) .

Precisión: AGMA grado 11, Ra 0,6 µm .

Fuerza de corte: 1000 N (HSS 1300 N, reducción del 23%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pérdida por desgaste: VB <0,25 mm, <0,05 mm³/h.

Sugerencia de selección : fresa para conformación de engranajes de grano fino WC+ AlCrN , Ø 150 mm, corte húmedo + máquina herramienta de baja vibración.

Torneado duro (18CrNiMo76, HRC 62) :

Condiciones de trabajo : material 18CrNiMo76 (HRC 62), módulo 15, diámetro del engranaje Ø 500 mm, mecanizado fino.

Cuchillo :

Tipo : Herramienta de torneado duro (inserto indexable, CNMG120408).

Matriz : WC6%Co (grano ultrafino, D50 0,20,5 µm , Cr3C2 0,5 % en peso, dureza 2000-2200 HV.

Recubrimiento : PVD TiAlN (4 µm , dureza 3300 HV, resistencia al calor 1100°C).

Geometría : Ángulo de ataque principal 75°, ángulo de inclinación del filo de corte 6°, radio del filo de corte 0,02 mm, rompevirutas 3D .

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 (radio de borde <5 µm) , PVD TiAlN (350°C, adhesión >100 N).

Parámetros de corte : velocidad 150 m/min, avance 0,1 mm/r, profundidad de corte 0,5 mm, corte en seco.

Datos de prueba :

Vida útil: 1500 minutos (HSS 200 minutos, aumentada 7,5 veces) .

Precisión: AGMA grado 12, Ra 0,4 µm , ± 0,01 mm.

Fuerza de corte: 600 N (HSS 800 N, reducida en un 25%).

Pérdida por desgaste: VB <0,15 mm, <0,04 mm³/h.

Recomendaciones de selección : grano ultrafino WC+ TiAlN , CNMG120408MF, máquinas herramienta de corte en seco+alta rigidez.

5. Análisis del rendimiento de herramientas de engranajes de carburo cementado para turbinas eólicas

parámetro	Herramientas de carburo	Acero de alta velocidad (HSS)
Dureza (HV)	18002200	800900
Resistencia a la flexión (GPa)	1.82.8	34
Dureza (KIC)	1015 MPa·m ^{1/2}	2050 MPa·m ^{1/2}
Resistencia al desgaste (mm ³ /h)	<0,05	0.20.5
Resistencia al calor (°C)	8001000	500600
Velocidad de corte (m/min)	100500	20100
Vida útil (minutos)	5002000	100300
Ra (µm)	0.40.8	1.02.0

Reflejos :

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino WC+TiAlN / AlCrN , desgaste <0,05 mm³ / h, vida útil aumentada 37,5 veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resistencia al calor: 800-1000°C, dureza>1200 HV, corte en seco.

Eficiencia: Velocidad 100500 m/min, eficiencia incrementada en 3050%.

Precisión: grado AGMA 1012, Ra 0,40,8 μ m .

6. Sugerencias de optimización para herramientas de engranajes de carburo para turbinas eólicas

Optimización de materiales :

Mecanizado basto : grano medio-grueso WC (12 μ m) , Co 12 % en peso , GC4240 (6 μ m) , resistencia al desgaste aumentada en un 20 %.

Acabado : grano ultrafino WC (0,20,5 μ m) , Co 6 % en peso , TiAlN (4 μ m) , precisión $\pm 0,01$ mm.

Conformación de engranajes : WC de grano fino (0,51 μ m) , AlCrN (5 μ m) , resistencia al impacto aumentada en un 15%.

Aditivo : Cr3C2/VC 0,5 % en peso , dureza aumentada en un 510 %.

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 (58 μ m) , desviación del perfil del diente $\leq \pm 0,005$ mm, Ra < 0,1 μ m .

recubrimiento :

TiAlN (4 μ m , 350°C, polarización 100 V) , resistencia al calor aumentada en un 20%.

AlCrN (5 μ m , 400°C, polarización 80 V) , resistencia a los golpes aumentada en un 15%.

GC4240 (6 μ m , 450°C), resistencia al desgaste aumentada en un 25% .

Impresión 3D : moldeo SLM de formas dentales complejas, tiempo de ciclo reducido en un 20%, precisión de $\pm 0,01$ mm.

Optimización de equipos :

Horno de sinterización: control de temperatura $\pm 3^\circ\text{C}$, 10^{-5} Pa.

Rectificadora CNC: desviación del perfil del diente $\leq \pm 0,005$ mm.

Equipo de recubrimiento: velocidad de deposición 12 μ m /h, desviación $\leq \pm 0,1$ μ m .

Adaptación de las condiciones de trabajo :

Tallado de engranajes en bruto : grano medio-grueso WC+GC4240, velocidad 200300 m/min, MQL.

Tallado de engranajes de precisión : grano ultrafino WC+ TiAlN , velocidad 250400 m/min, corte en seco.

Conformado de engranajes : grano fino WC+ AlCrN , velocidad 150-250 m/min, corte húmedo.

Torneado duro : grano ultrafino WC+ TiAlN , velocidad 100-200 m/min, corte en seco.

Prueba y verificación :

Microestructura : SEM (grano 0,22 μ m) , EBSD (tensión del límite de grano <5%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento : ASTM G65 ($<0,040,05 \text{ mm}^3/\text{h}$), dureza a alta temperatura ($>1200 \text{ HV}$, 900°C).

Prueba : fuerza de corte 600-1200 N, vida útil 800-1500 min, Ra 0,4-0,8 μm , grado AGMA 1012.

7. Normas y especificaciones para herramientas de corte de engranajes de turbinas eólicas de carburo cementado

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

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

GB/T 38512015 : Resistencia 1,8-2,8 GPa .

GB/T 7997- 2017 : Dureza 1400-2200 HV.

ASTM G 65 : Tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3/\text{h}$.

ISO 6508 : Desviación de dureza $< \pm 50 \text{ HV}$.

ISO 1832 : Desviación de la forma del diente $<\pm 0,01 \text{ mm}$.

AGMA 2015 : Nivel de precisión del perfil dentario 1012.

8. Conclusión

de los materiales (grano ultrafino WC 0,20,5 μm , Co 612 wt % , Recubrimiento TiAlN / AlCrN / GC4240) y procesos (sinterización HIP 1350 $^\circ\text{C}$, 120 MPa, recubrimiento PVD/CVD 300-450 $^\circ\text{C}$).

La herramienta es adecuada para el desbaste/acabado de engranajes de energía eólica (42CrMo₄, 18CrNiMo₄, HRC 5562, módulo 1040), con una velocidad de 100-500 m/min, un aumento de eficiencia del 30-50 % y una precisión de AGMA 1012, Ra 0,4-0,8 μm . La optimización de granos ultrafinos, recubrimientos compuestos y rectificado de precisión puede reducir los costos (de 500 a 2000 yuanes por pieza), y los desafíos radican en el procesamiento de módulos altos (los costos de rectificado aumentan un 20 %) y la adhesión del recubrimiento ($>80 \text{ N}$ requeridos).

CTIA GROUP LTD utiliza nano-WC (D50 0,20,5 μm) , sinterización HIP (porosidad $<0,001 \%$) y recubrimiento multicapa PVD/CVD para desarrollar fresas madre de alto rendimiento, fresas para conformado de engranajes y herramientas de torneado duro para satisfacer las necesidades del procesamiento de engranajes de energía eólica (vida útil >1200 minutos, precisión AGMA 12). Los productos han superado las verificaciones SEM, ASTM G65 y AGMA 2015.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 18376-2001

Método de prueba de rendimiento del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de ensayo para las propiedades del carburo cementado, incluyendo los procedimientos de ensayo para dureza, densidad, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, microestructura, propiedades magnéticas, porosidad y resistencia al desgaste. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase aglutinante, y también es aplicable a otros materiales de carburo cementado similares (como el carburo cementado con adición de TaC y VC). Esta norma no es aplicable a los ensayos de rendimiento del carburo cementado recubierto.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 228.1-2001 Ensayo de tracción de materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba (escala A, B, C)

GB/T 3848-2001 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 3850-2001 Método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

GB/T 3851-2001 Método de determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

GB/T 5242-2001 Método de prueba de microestructura para carburo cementado

GB/T 7997-2001 Método de prueba para la dureza Vickers del carburo cementado

GB/T 9097-2001 Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

Dureza (HV): La capacidad del carburo cementado para resistir la penetración de un penetrador Vickers, expresada como valor de dureza Vickers (HV30), unidad: kgf/mm^2 .

Densidad (ρ): Relación entre la masa de carburo cementado y su volumen, expresada en g/cm^3 .

Resistencia a la flexión (σ_{bb}): La tensión máxima que soporta una muestra de carburo cementado en una prueba de flexión de tres puntos, expresada en MPa.

Tenacidad a la fractura (K_{IC}): La capacidad del carburo cementado para resistir el crecimiento de grietas, expresada en $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Microestructura: Características de distribución de granos de WC, fase Co y poros en 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

Propiedades magnéticas: El valor de saturación magnética (Ms) y la fuerza coercitiva (Hc) del carburo cementado reflejan las características magnéticas de la fase Co.

Porosidad: Porcentaje de volumen de poros en el carburo cementado, clasificado en tres categorías: A, B y C.

4. Preparación de la muestra

4.1 Requisitos de la muestra

La muestra debe tener una forma geométrica regular (como un cuboide o un cilindro), con una superficie plana y sin grietas, capas de óxido o defectos de procesamiento.

El tamaño de la muestra debe cumplir con los requisitos de cada prueba de desempeño, tales como:

Ensayo de dureza: área superficial $>5 \times 5$ mm, espesor >2 mm.

Ensayo de resistencia a la flexión: largo $\times$ ancho $\times$ alto = $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm).

Ensayo de tenacidad a la fractura: largo $\times$ ancho $\times$ alto = $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

La rugosidad superficial de la muestra es $Ra < 0,1$ μm (pulida).

4.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística de los resultados de la prueba.

Si la desviación del resultado es grande ($>5\%$), el número de muestras debe aumentarse a 10.

4.3 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

5 métodos de prueba

5.1 Prueba de dureza

5.1.1 Principio de la prueba:

Se utiliza el método de dureza Vickers (HV30). Se aplica una carga de 30 kgf y se presiona el indentador Vickers contra la superficie de la muestra. Se mide la longitud diagonal de la indentación y se calcula el valor de dureza.

5.1.2 Equipo

Probador de dureza Vickers, de acuerdo con los requisitos de GB/T 7997-2001.

Penetrador: Penetrador de diamante Vickers estándar, ángulo de vértice $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

Microscopio: aumento $400\times$, resolución $< 0,5$ μm .

5.1.3 Pasos de prueba

de la muestra se pulió a $Ra < 0,1$ μm , se limpió y se secó.

Aplicar una carga de 30 kgf y manténgala durante 10-15 s.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mida las longitudes diagonales de la sangría (d1, d2) y tome el valor promedio ($d = (d1+d2)/2$).
Calcular el valor de dureza:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中: $F = 30 \text{ kgf}$, d 单位为 mm 。

5.1.4 Procesamiento de resultados

Se midieron 5 puntos para cada muestra y se tomó el valor promedio con una desviación de $\leq \pm 2\%$.
Rango de valor de dureza: HV 1200-2000 (dependiendo de la marca, como YG8 alrededor de HV 1500).

5.2 Prueba de densidad

5.2.1 El principio de prueba

es utilizar el método de Arquímedes para calcular la densidad midiendo la masa de la muestra en el aire y en el líquido.

5.2.2 Equipo

Balanza analítica, precisión $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Líquido: agua destilada, temperatura $20^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$.

5.2.3 Pasos de prueba

Pesar la masa de la muestra en el aire (m_1) con una precisión de $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Sumergir la muestra en agua destilada y pesar la masa suspendida (m_2).

Calcular la densidad:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_{\text{水}}$$

Dónde: $\rho_{\text{agua}} = 0,9982 \text{ g/cm}^3$

5.2.4 Procesamiento de resultados

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de $\leq \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Valor típico: La densidad del WC-10Co es de aproximadamente $14,5\text{-}14,8 \text{ g/cm}^3$.

5.3 Prueba de resistencia a la flexión

5.3.1 El principio de ensayo

consiste en utilizar el método de flexión de tres puntos. La probeta se somete a una fuerza entre dos puntos de apoyo. Se registra la carga máxima de fractura y se calcula la resistencia a la flexión.

5.3.2 Equipo

Máquina de pruebas universal, precisión de carga $\pm 0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fijación: Luz 14,5 mm ($\pm 0,05$ mm), diámetro del punto de apoyo 2 mm.

5.3.3 Pasos de prueba

Dimensiones de la muestra: $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm).

Velocidad de carga: 0,5 mm/min.

Registre la carga de rotura F (N).

Calcular la resistencia a la flexión:

$$\sigma_{bb} = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Dónde: L = 14,5 mm, b = 6,5 mm, h = 5,25 mm.

5.3.4 Procesamiento de resultados

Se analizaron cinco muestras en cada grupo y se tomó el valor promedio con una desviación de $< \pm 5\%$.

Valor típico: La resistencia a la flexión YG8 es de aproximadamente 2000-2400 MPa.

5.4 Ensayo de tenacidad a la fractura

5.4.1 Principio de prueba El método de viga con entalla de un solo borde (SEPB) se utiliza para calcular la tenacidad a la fractura

K_{Ic} por fractura de una muestra con entalla prefabricada en flexión de tres puntos.

5.4.2 Equipo

Máquina de pruebas universal, precisión de carga $\pm 0,5\%$.

Fijación: Distancia 16 mm ($\pm 0,05$ mm).

Microscopio: mide la profundidad de la muesca con una resolución de $< 0,01$ mm.

5.4.3 Pasos de prueba

Tamaño de la muestra: $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

Muesca prefabricada: profundidad 0,8-1,2 mm, ancho $< 0,2$ mm.

Velocidad de carga: 0,5 mm/min.

Registre la carga de rotura F (N).

Calcular K_{Ic} :

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^2}$$

Donde: Y es el factor geométrico (aproximadamente 2,8-3,0), a es la profundidad de la muesca, L = 16 mm, B = 4 mm, W = 2 mm.

5.4.4 Procesamiento de resultados

Se analizaron cinco muestras en cada grupo y se tomó el valor promedio con una desviación de $< \pm 5\%$.

Valor típico: YG8 K_{Ic} aproximadamente 12-15 MPa $\cdot m^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.5 Inspección de la microestructura

5.5.1 Principio de prueba

El tamaño del grano de WC, la distribución de la fase Co y la porosidad se observan bajo un microscopio metalográfico, y se clasifica y evalúa la microestructura.

5.5.2 Equipo

Microscopio metalográfico, aumento 1000×, resolución <0,5 μm.

: Pulir la muestra hasta Ra <0,05 μm.

Grabador: reactivo de Murakami ($K_3Fe(CN)_6$ + solución de NaOH).

5.5.3 Pasos de prueba

Después del pulido, las muestras fueron grabadas con el reactivo de Murakami durante 10-20 s.

Observado con un aumento de 1000×:

de grano promedio (0,5-2 μm).

Distribución de cofases: observar la uniformidad.

Clasificación de porosidad: evaluada en tres categorías: A, B y C (A < 0,02%, B < 0,2% y C es carbono libre).

5.5.4 Procesamiento de resultados

Se observaron cinco campos de visión para cada muestra y se registraron el tamaño del grano y el grado de porosidad.

de grano YG8 0,8-1,2 μm, porosidad A02-B00-C00.

5.6 Prueba de propiedades magnéticas

5.6.1 Principio de prueba

El valor de saturación magnética (Ms) y la fuerza coercitiva (Hc) del carburo cementado se miden para reflejar el contenido de la fase Co y las características de la microestructura.

5.6.2 Equipo

Probador de propiedades magnéticas, precisión ±1%.

Muestra: diámetro 5 mm, altura 10 mm (± 0,05 mm).

5.6.3 Pasos de prueba

La muestra se desmagnetiza y se coloca en el probador.

Mida el valor de saturación magnética Ms (unidad: $\mu T \cdot m^3 / kg$).

Mida la fuerza coercitiva Hc (unidad: kA/m).

5.6.4 Procesamiento de resultados

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de <±2%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Valores típicos: YG8 Ms es de aproximadamente $150-160 \mu\text{T}\cdot\text{m}^3/\text{kg}$, Hc es de aproximadamente $15-20 \text{ kA/m}$.

5.7 Prueba de resistencia al desgaste

5.7.1 Principio de prueba

El método de desgaste de la muela abrasiva se utiliza para medir la pérdida de masa de la muestra en condiciones de desgaste estándar y evaluar la resistencia al desgaste.

5.7.2 Equipo

Máquina de prueba de desgaste de muelas abrasivas, material de muelas abrasivas SiC , tamaño de grano 60#.

Carga: 50 N.

5.7.3 Pasos de prueba

Tamaño de la muestra: $10\times 10\times 5 \text{ mm}$ ($\pm 0,05 \text{ mm}$).

Velocidad de la muela abrasiva: 200 r/min, tiempo de prueba: 30 min.

Pesar la masa de la muestra antes y después del uso (m_1 , m_2) con una precisión de $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Calcular el volumen de desgaste: $\Delta m = m_1 - m_2$

5.7.4 Procesamiento de resultados

Cada muestra se analizó 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de $\leq \pm 5\%$.

Valor típico: la cantidad de desgaste YG8 es de aproximadamente 0,05 a 0,08 g.

6 Evaluación de los resultados de las pruebas

Los resultados de la prueba deben cumplir con los requisitos técnicos del grado de carburo cementado (como YG8: dureza HV 1450-1550, resistencia a la flexión $> 2000 \text{ MPa}$).

Si la desviación del resultado excede el rango permitido ($> 5\%$), es necesario tomar otro muestreo y realizar nuevas pruebas.

El informe de prueba debe incluir: marca de muestra, elementos de prueba, condiciones de prueba, datos de resultados y conclusiones de la evaluación.

7 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, temperatura ambiente ($20\pm 5^\circ\text{C}$), humedad ($50\pm 10\%$).

Resultados de pruebas: dureza, densidad, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, microestructura, propiedades magnéticas, porosidad, resistencia al desgaste, etc.

Análisis de desviación: media y desviación de cada parámetro.

Conclusión: Si cumple con los requisitos técnicos.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de rendimiento típicos del carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Dureza (HV30)	Densidad (g/cm ³)	a la flexión (MPa)	Tenacidad a la fractura (K _{1c} , MPa·m ^{1/2})	Tamaño de grano (μm)	Porosidad
YG6	1500-1600	14.8-15.0	1800-2200	14-16	0,8-1,2	A02-B00-C00
YG8	1450-1550	14.6-14.8	2000-2400	12-15	0,8-1,2	A02-B00-C00
YT15	1550-1650	11.0-11.5	1600-2000	10-12	0,6-1,0	A02-B00-C00

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

apéndice:

GB/T 230.1-2001

Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos

Parte 1: Métodos de prueba (escala A, B, C)

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la dureza de materiales metálicos a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C) a través de la prueba de dureza Rockwell (escala A, B, C), incluyendo principios de prueba, requisitos de equipo, preparación de la muestra, pasos de prueba, cálculo y evaluación de resultados, informe de prueba, etc. Esta norma es aplicable a la prueba de dureza de acero, metales no ferrosos y carburo cementado (como WC-Co).

Escala HRA: adecuada para carburo cementado y acero de alta dureza (rango de dureza 20-88 HRA).

Escala HRB: Aplicable a acero dulce, metales no ferrosos (como aluminio, cobre) (rango de dureza 20-100 HRB).

Escala HRC: Aplicable a aceros templados y revenidos (rango de dureza de 20 a 70 HRC).

Esta norma no aplica al ensayo de dureza de muestras de paredes delgadas (espesor < 0,6 mm) ni a micromuestras.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 230.2-2001 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

GB/T 230.3-2001 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

GB/T 4340.1-1999 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 13683-1999 Terminología para probar las propiedades mecánicas de materiales metálicos

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 13683-1999 y los siguientes términos y definiciones:

Dureza Rockwell (HR): La capacidad de un metal para resistir la penetración de un indentador Rockwell. Se divide en escalas como HRA, HRB y HRC y se calcula según la profundidad de la indentación.

Profundidad de sangría (e): La profundidad que se forma cuando el penetrador Rockwell se presiona en la superficie de la muestra, medida en mm, es inversamente proporcional al valor de dureza.

Precarga (F_0): La carga inicial aplicada al penetrador, en N (98,07 N para la prueba Rockwell).

Carga total (F): La carga total aplicada al penetrador, en N (588,4 N para HRA y HRC, 980,7 N para HRB).

Escala de dureza: una unidad de dureza (como HRC) definida por la combinación del tipo de penetrador y la carga.

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

4 Principio de prueba

La prueba de dureza Rockwell se realiza presionando un indentador cónico de diamante (HRA, HRC) o un indentador de bola de acero (HRB) sobre la superficie de una muestra metálica con una precarga. Posteriormente, se aplica una carga total, manteniéndola durante un tiempo determinado y, finalmente, se descarga hasta la precarga. Se mide la diferencia de profundidad de indentación (e) y se calcula el valor de dureza Rockwell. La fórmula para el cálculo de la dureza Rockwell es la siguiente:

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

en:

e es la diferencia de profundidad de sangría, en mm;

0,002 mm es el incremento de profundidad correspondiente a cada valor de dureza unitario;

El rango HRA es de 20 a 88, el rango HRB es de 20 a 100 y el rango HRC es de 20 a 70.

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Rockwell

Cumple con los requisitos de inspección y calibración de GB/T 230.2-2001.

Carga: Precarga 98,07 N (10 kgf) , la carga total es la siguiente:

Fuerza de fricción: 588,4 N (60 kgf) .

Fuerza de fricción: 980,7 N (100 kgf) .

Precisión de carga: $\pm 0,5\%$.

Control del tiempo de retención: 5 s a 15 s, desviación $\leq \pm 0,5$ s.

5.2 Penetrador

Penetrador de cono de diamante (HRA, HRC): ángulo de vértice $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$, radio esférico superior 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

Penetrador de bola de acero (HRB): diámetro 1,5875 mm (1/16 pulgada, $\pm 0,005$ mm), dureza $\geq$ HRC 60.

La superficie del penetrador está libre de defectos y tiene bordes limpios (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$) .

5.3 Dispositivo de medición

El probador de dureza está equipado con un sistema de lectura digital o de puntero con una precisión de $\pm 0,5$ HR.

5.4 Bloque de calibración

Bloques de calibración estándar que cumplen los requisitos de GB/T 230.3-2001:

HRA: 70-88 HRA, desviación $\leq \pm 0,5$ HRA.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRB: 60-100 HRB, desviación $\leq \pm 1,0$ HRB.

HRC: 20-70 HRC, desviación $\leq \pm 0,5$ HRC.

La rugosidad de la superficie del bloque de calibración es $Ra < 0,05 \mu m$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: $10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$, se recomienda $20 \pm 5^{\circ}C$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, cilindro u otra forma regular, área de superficie de prueba $> 5 \times 5$ mm, espesor como se indica a continuación:

HRA, HRC: espesor $> 0,8$ mm.

HRB: espesor $> 1,2$ mm.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado.

Rugosidad superficial $Ra < 0,1 \mu m$ (pulida).

El espesor de la muestra debe cumplir los siguientes requisitos: espesor $\geq 10 \times$ profundidad de sangría (aproximadamente 0,5 mm).

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande (> 1 HR), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deberán estar marcadas con el número de lote, la marca (como acero 45#, YG8) y los elementos de prueba, y la marca no deberá afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Utilice el bloque de calibración estándar para calibrar el durómetro y mida 3 veces. La desviación es la siguiente:

FC, FC: $\leq \pm 0,5$ FC.

Frecuencia cardíaca (HRB): $\leq \pm 1,0$ FC.

Verifique el estado del penetrador para asegurarse de que no haya desgaste ni defectos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado 50±10%.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Selección de escala

Seleccione la escala según la dureza del material:

Carburo cementado, acero de alta dureza: HRA.

Acero dulce, metales no ferrosos: HRB.

Acero templado, acero revenido: HRC.

7.4 Operación de prueba

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza, asegurándose de que la superficie de prueba esté nivelada.

Aplique una precarga de 98,07 N (10 kgf) para asegurar que el penetrador esté en contacto estable con la muestra.

Aplique la carga total (588,4 N o 980,7 N) y mantenga la carga durante 5 a 15 s.

Descargue hasta una precarga de 98,07 N y registre el valor de dureza (HRA, HRB o HRC).

Se miden 5 puntos para cada muestra y el espaciado de sangría es el siguiente:

HRA, HRC: >3 veces el diámetro de sangría (aproximadamente 0,6 mm).

HRB: >4 veces el diámetro de la sangría (aproximadamente 1,5 mm).

La sangría está a >1 mm del borde de la muestra.

7.5 Cálculo del resultado

El probador de dureza muestra directamente el valor HR o lo calcula mediante la fórmula:

HRA, HRC:

$$HR = 100 - \frac{e}{0.002}$$

HRB:

$$HRB = 130 - \frac{e}{0.002}$$

Tome el valor promedio de 5 puntos como valor de dureza de la muestra y la desviación es la siguiente:

FC, FC: <±1 FC.

Frecuencia cardíaca: <±2 HR.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de valores de dureza

El rango de dureza Rockwell de los materiales metálicos depende de la escala y el material:

Carburo cementado (YG8): HRA 87-89.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Acero endurecido (acero 45#, HRC 50): HRC 48-52.

Aleación de aluminio (6061-T6): HRB 60-70.

8.2 Evaluación de la desviación

Los 5 puntos son los siguientes, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba:

FC, FC: $\leq \pm 1$ FC.

Frecuencia cardíaca: $\leq \pm 2$ HR.

Si el valor de dureza excede los requisitos técnicos del material, se deben analizar las razones (como defectos superficiales de la muestra y microestructura desigual).

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la superficie: Una rugosidad de la superficie $R_a > 0,1 \mu\text{m}$ dará como resultado valores de dureza más bajos (desviación > 1 HR).

de permanencia : Un tiempo < 5 s o > 15 s afectará la profundidad de la sangría (desviación $\pm 0,5$ HR).

Espesor de la muestra: Un espesor $< 0,8$ mm provocará un efecto de soporte y valores de dureza más elevados (desviación > 2 HR).

Microestructura: Un tamaño de grano desigual ($> \pm 0,2 \mu\text{m}$) o una porosidad elevada pueden provocar fluctuaciones de dureza ($> \pm 1$ HR).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, escala (HRA/HRB/HRC), carga, tiempo de retención (5-15 s), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

Resultados de la prueba: valor de dureza (HR), valor medio y desviación de cada punto.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos del material.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Rockwell de materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	Dureza Rockwell	Gobernante	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG8	87-89	HRA	Herramientas de corte
acero endurecido	45# (HRC 50)	48-52	CDH	Piezas mecánicas
Aleación de aluminio	6061-T6	60-70	Banco de recursos humanos	Estructuras aeroespaciales
Aleación de cobre	H62	40-50	Banco de recursos humanos	Componentes eléctricos

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) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Comparación de las escalas de dureza Rockwell

Gobernante	Tipo de indentador	Carga total (N)	Rango de dureza	Materiales aplicables
HRA	Cono de diamante	588.4	20-88	Aleación dura, acero de alta dureza.
Banco de recursos humanos	Bola de acero (1,5875 mm)	980.7	20-100	Acero dulce, metales no ferrosos
CDH	Cono de diamante	588.4	20-70	Acero templado, acero revenido

Resumir

La norma GB/T 230.1-2001, "Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos, Parte 1: Método de ensayo (escala A, B, C)", proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de dureza Rockwell de materiales metálicos, garantizando la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de muestras, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma es aplicable a la evaluación de la dureza del acero, los metales no ferrosos y el carburo cementado, y proporciona un soporte técnico fiable para campos de aplicación como la fabricación de maquinaria, la industria aeroespacial y la fabricación de moldes.

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:

GB/T 230.2-2001

Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos

Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos directos e indirectos de inspección y calibración de durómetros (incluidas las escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N y T) para el ensayo de dureza Rockwell de materiales metálicos, incluyendo los principios de inspección, los requisitos del equipo, los pasos de calibración, la evaluación de resultados, etc. Esta norma se aplica a la inspección y calibración de durómetros Rockwell fijos y portátiles para garantizar que cumplan con los requisitos de la norma GB/T 230.1-2001 "Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos, Parte 1: Método de ensayo". Esta norma no se aplica a la calibración de durómetros para otros métodos de ensayo de dureza.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 230.3-2001 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

GB/T 13683-1999 Terminología para probar las propiedades mecánicas de materiales metálicos

Procedimiento de verificación JJG 112-1999 para el probador de dureza Rockwell de metales

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 13683-1999 y los siguientes términos y definiciones:

Inspección directa: Proceso de verificación del cumplimiento de los requisitos estándar mediante la medición de parámetros como la carga, la geometría del penetrador, la profundidad de penetración y el tiempo del ciclo de prueba del probador de dureza.

Inspección indirecta: Proceso de verificación de la precisión de la medición y la repetibilidad del durómetro midiendo el valor de dureza en un bloque estándar de dureza conocida utilizando un bloque de dureza estándar.

Calibración: Proceso de ajuste del sistema de medición del durómetro para que los resultados de la medición sean consistentes con el valor estándar.

Bloque de dureza estándar: un bloque de metal calibrado con un valor de dureza Rockwell conocido que se utiliza para la verificación indirecta de un probador de dureza.

4 Principios de inspección y calibración

La inspección y calibración del durómetro Rockwell se realiza mediante métodos directos e indirectos para garantizar la precisión de la medición y la fiabilidad del durómetro:

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

Inspección directa: verificar si los parámetros clave del probador de dureza (carga, forma del penetrador, profundidad de penetración, tiempo del ciclo de prueba) cumplen con los requisitos de GB/T 230.1-2001.

Inspección indirecta: Utilice un bloque de dureza estándar para medir el valor de dureza en un bloque de dureza conocida y evaluar la desviación de la medición y la repetibilidad del durómetro. Tras la calibración, la desviación de la medición del durómetro debe cumplir los siguientes requisitos:

FC, FC: $\leq \pm 1,0$ FC.

Frecuencia cardíaca (HRB): $\leq \pm 2,0$ FC.

5 Equipos de inspección y calibración

5.1 Instrumentos de medición

Dispositivo de medición de fuerza: precisión $\pm 0,5\%$, utilizado para medir la precarga y la carga total.

Dispositivo de medición de profundidad: precisión $\pm 0,001$ mm, utilizado para medir la profundidad de la sangría.

Dispositivo de medición de tiempo: precisión $\pm 0,1$ s, utilizado para medir el tiempo de retención.

Microscopio o proyector: aumento 50×-100×, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$, para comprobar la geometría del penetrador.

5.2 Bloque de dureza estándar

De acuerdo con GB/T 230.3-2001, el rango de dureza es el siguiente:

HRA: 70-88 HRA, desviación $\leq \pm 0,5$ HRA.

HRB: 60-100 HRB, desviación $\leq \pm 1,0$ HRB.

HRC: 20-70 HRC, desviación $\leq \pm 0,5$ HRC.

La rugosidad de la superficie del bloque de dureza estándar es $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.3 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6 Pasos de inspección y calibración

6.1 Inspección directa

6.1.1 Prueba de carga

La precarga medida es de 98,07 N (10 kgf), con una desviación de $\leq \pm 1,0\%$.

Medición de la carga total:

HRA, HRC: 588,4 N (60 kgf), desviación $\leq \pm 0,5\%$.

HRB: 980,7 N (100 kgf), desviación $\leq \pm 0,5\%$.

La carga se aplica suavemente, sin golpes ni vibraciones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1.2 Inspección del penetrador

Penetrador de cono de diamante (HRA, HRC):

Ángulo de vértice $120^{\circ} (\pm 0,5^{\circ})$.

El radio esférico superior es de 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

libre de defectos (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

Penetrador de bola de acero (HRB):

Diámetro 1,5875 mm ($\pm 0,005$ mm).

Dureza $\geq$ HRC 60.

Sin defectos superficiales.

6.1.3 Inspección del sistema de medición de profundidad

Utilizando un bloque de profundidad estándar, mida la profundidad de sangría con una desviación de $< \pm 0,002$ mm.

6.1.4 Inspección del tiempo del ciclo de prueba

Tiempo de retención 5-15 s, desviación $< \pm 0,5$ s.

Tiempo de aplicación y descarga de carga < 2 s, sin impacto.

6.2 Pruebas indirectas

Seleccione un bloque de dureza estándar que coincida con la escala de prueba (como HRC 60).

Mida 5 veces en el bloque de dureza estándar y registre los valores de dureza.

Calcular la media y la desviación:

HRA, HRC: desviación del valor medio $< \pm 1,0$ HR, desviación única $< \pm 1,5$ HR.

HRB: desviación media $< \pm 2,0$ HR, desviación única $< \pm 3,0$ HR.

Si la desviación excede el límite, es necesario calibrar el probador de dureza.

6.3 Calibración

De acuerdo con los resultados de la prueba directa e indirecta, ajuste el sistema de medición de carga y profundidad del probador de dureza o reemplace el penetrador.

Repita la prueba indirecta después de la calibración para asegurarse de que la desviación cumpla con los requisitos.

7 Evaluación de los resultados de la inspección y calibración

7.1 Determinación de la calificación

Inspección directa: parámetros como carga, presión, profundidad, tiempo, etc. cumplen todos los requisitos.

Prueba indirecta:

HRA, HRC: desviación del valor medio $< \pm 1,0$ HR, repetibilidad $< \pm 1,5$ HR.

HRB: desviación media $< \pm 2,0$ HR, repetibilidad $< \pm 3,0$ HR.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Tratamiento no conforme

Si la prueba directa falla, es necesario reparar el probador de dureza (reemplazar el penetrador, ajustar el sistema de carga, etc.).

Si la prueba indirecta falla, es necesario calibrar el probador de dureza y volver a probarlo.

Si el resultado de la prueba falla dos veces seguidas, no se deberá utilizar el probador de dureza.

7.3 Análisis de factores influyentes

Desviación de carga: una desviación de carga $> \pm 0,5$ % dará como resultado un valor de dureza demasiado alto o demasiado bajo ($> \pm 1$ HR).

Desgaste del penetrador: El desgaste del penetrador puede resultar en valores de dureza más altos ($> \pm 1$ HR).

Vibración ambiental: La vibración puede provocar errores de medición de profundidad ($> \pm 0,5$ HR).

Calidad del bloque estándar: una desviación de la dureza del bloque estándar $> \pm 0,5$ HR afectará los resultados de la prueba.

8 Informe de inspección y calibración

El informe de inspección y calibración debe incluir lo siguiente:

Información del probador de dureza: modelo, número, fabricante.

Condiciones de prueba: temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%), escala (HRA/HRB/HRC).

Resultados de la prueba:

Inspección directa: carga, geometría del penetrador, profundidad, tiempo y otros parámetros y desviaciones.

Inspección indirecta: valor nominal, valor medido, valor medio y desviación del bloque de dureza estándar.

Conclusión de la calibración: si está calificada, medidas de calibración (como ajustar la carga, reemplazar el cabezal de presión).

Fecha de inspección y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores recomendados de bloques de dureza estándar

Gobernante	Rango de dureza	Ejemplo de valor nominal	Solicitud de desviación
HRA	70-88 HRA	85 HRA	$< \pm 0,5$ HRA
Banco de recursos humanos	60-100 HRB	90 HRB	$< \pm 1,0$ HRB
CDH	20-70 HRC	60 HRC	$< \pm 0,5$ HRC

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02$ mm/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice C (Apéndice informativo) Problemas comunes y soluciones

pregunta	Posibles causas	Solución alternativa
El valor de dureza es alto	Desgaste del penetrador	Reemplace el cabezal de presión
Valor de dureza bajo	Carga insuficiente	Ajuste del sistema de carga
Mala repetibilidad	Vibración ambiental	Mejorar el entorno de pruebas
Medición de profundidad inexacta	Fallo del sistema de medición de profundidad	Calibrar o reparar sistemas de medición de profundidad

Resumir

La norma GB/T 230.2-2001 "Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos, Parte 2: Verificación y calibración de durómetros" proporciona un procedimiento estandarizado para la inspección y calibración de durómetros Rockwell, garantizando la precisión y fiabilidad de las mediciones mediante métodos de inspección directa e indirecta. La implementación de esta norma contribuye a mejorar la precisión y la consistencia de los resultados de los ensayos de dureza y es aplicable a la gestión de durómetros en los sectores de la fabricación de maquinaria, ensayos de materiales, etc.

apéndice:

GB/T 230.3-2001 Materiales metálicos

Prueba de dureza Rockwell Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

1 Alcance

Esta norma especifica el método de calibración de bloques de dureza estándar (incluidas las escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N y T) para el ensayo de dureza Rockwell de materiales metálicos, incluyendo los principios de calibración, los requisitos del equipo, los pasos de calibración, la evaluación de resultados, etc. Esta norma es aplicable a la calibración de bloques de dureza estándar Rockwell de nueva fabricación o en uso, para garantizar que sus valores de dureza cumplan con los requisitos de las normas GB/T 230.1-2001 y GB/T 230.2-2001. Esta norma no es aplicable a la calibración de bloques estándar para otros métodos de ensayo de dureza.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 230.2-2001 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

GB/T 13683-1999 Terminología para probar las propiedades mecánicas de materiales metálicos

Procedimiento de verificación JJG 112-1999 para el probador de dureza Rockwell de metales

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 13683-1999 y los siguientes términos y definiciones:

Bloque de dureza estándar: un bloque de metal calibrado con un valor de dureza Rockwell conocido que se utiliza para la verificación indirecta y la calibración de probadores de dureza.

Calibración: Proceso de determinación del valor de dureza de un bloque de dureza estándar utilizando un probador de dureza estándar o un dispositivo rastreable con mayor precisión.

Uniformidad de dureza: La consistencia de la distribución de los valores de dureza en la superficie de un bloque de dureza estándar, expresada por la desviación de los puntos de medición.

Trazabilidad: Proceso de vincular el valor de dureza de un bloque de referencia de dureza a un punto de referencia de dureza nacional o internacional a través de una cadena de calibración.

4 Principio de calibración

La calibración del bloque de dureza estándar se realiza mediante un durómetro Rockwell calibrado de alta precisión (de acuerdo con la norma GB/T 230.2-2001) para realizar múltiples mediciones de dureza en la superficie del bloque, calcular el valor promedio y la uniformidad de la dureza, y garantizar que su valor de dureza sea preciso y fiable. Los resultados de la calibración deben ser trazables a estándares de dureza nacionales o internacionales para garantizar la consistencia y comparabilidad de las mediciones.

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. Equipo de calibración

5.1 Probador de dureza Rockwell estándar

Cumple con los requisitos de GB/T 230.2-2001 y ha sido probado directa e indirectamente.

Desviación de la medición:

FC, FC: $\leq \pm 0,5$ FC.

Frecuencia cardíaca (HRB): $\leq \pm 1,0$ FC.

El probador de dureza debe ser trazable a un estándar de dureza nacional o internacional.

5.2 Penetrador

Penetrador de cono de diamante (HRA, HRC): ángulo de vértice $120^\circ (\pm 0,5^\circ)$, radio esférico superior 0,2 mm ($\pm 0,01$ mm).

Penetrador de bola de acero (HRB): diámetro 1,5875 mm ($\pm 0,005$ mm), dureza $\geq$ HRC 60. del penetrador estaba libre de defectos (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Instrumentos de medición

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm, utilizado para medir el tamaño de bloques estándar.

de rugosidad superficial: mide la rugosidad de la superficie, precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6 Requisitos del bloque de dureza estándar

6.1 Materiales y fabricación

Material del bloque estándar: acero de alta calidad u otro metal con dureza estable y microestructura homogénea sin segregación ni porosidad.

Tamaño: Espesor ≥ 6 mm, área de superficie de prueba $\geq 30 \times 30$ mm.

Rugosidad superficial: $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ (pulido).

La superficie de prueba debe ser plana con un paralelismo de $< 0,01$ mm.

6.2 Rango de dureza

HRA: 70-88 HRA.

Temperatura de reblandecimiento: 60-100 HRB.

CRC: 20-70 CRC.

6.3 Marcado

El bloque estándar debe estar marcado con el valor de dureza nominal, la escala, el número de lote de producción, la unidad de fabricación y otra información, y la marca no debe afectar el área de prueba.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7 pasos de calibración

7.1 Preparación de la calibración

Verifique el estado del probador de dureza estándar para asegurarse de que cumple con los requisitos de GB/T 230.2-2001.

Limpie el bloque de dureza estándar, elimine el aceite y el polvo con etanol anhidro y úselo después de secarlo.

Mida el tamaño y el paralelismo del bloque estándar y registre la rugosidad de la superficie.

7.2 Condiciones de calibración

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado 50±10%.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de calibración

Cinco puntos de medición se distribuyen uniformemente en la superficie de prueba del bloque de dureza estándar, con una separación entre puntos >3 veces el diámetro de sangría (HRA, HRC aproximadamente 0,6 mm, HRB aproximadamente 1,5 mm) y la distancia desde el borde es >2,5 mm.

Utilice un probador de dureza estándar para medir los valores de dureza en 5 puntos y registre los resultados de cada medición.

de retención : 5-15 s, desviación <±0,5 s.

7.4 Cálculo de resultados

计算 5 个点的平均硬度值:

$$\overline{HR} = \frac{HR_1 + HR_2 + HR_3 + HR_4 + HR_5}{5}$$

计算硬度均匀性 (最大偏差):

$$\Delta HR = HR_{\max} - HR_{\min}$$

Determinación de calificación:

HRA, HRC: desviación media <±0,5 HR, homogeneidad <1,0 HR.

HRB: desviación media <±1,0 HR, homogeneidad <2,0 HR.

7.5 Rastreo

Los resultados de la calibración deben ser trazables a un estándar de dureza nacional o internacional y la cadena de trazabilidad debe estar documentada (por ejemplo, a través de un instituto nacional de metrología).

8 Evaluación de los resultados de la calibración

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Calificación

Desviación media del valor de dureza:

FC, FC: $<\pm 0,5$ FC.

Frecuencia cardíaca (HRB): $<\pm 1,0$ FC.

Uniformidad de dureza:

FC, FC: $<1,0$ FC.

Frecuencia cardíaca (HRB): $<2,0$ FC.

superficial Ra $<0,05$ μm , paralelismo $<0,01$ mm.

8.2 Tratamiento no conforme

Si la desviación o uniformidad del valor medio excede el límite, no se utilizará el bloque estándar.

Analice las razones (como material desigual, mala calidad de la superficie), remanufacture o procese el bloque estándar y luego calibre.

8.3 Análisis de factores influyentes

de grano $>\pm 0,2$ μm) pueden provocar una homogeneidad deficiente (>1 HR).

Calidad de la superficie: una rugosidad Ra $>0,05$ μm provocará fluctuaciones en los valores de dureza ($>\pm 0,5$ HR).

Precisión del probador de dureza: una desviación del probador de dureza $>\pm 0,5$ HR afectará el resultado de la calibración.

Vibración ambiental: La vibración puede provocar errores de medición ($>\pm 0,5$ HR).

9 Certificado de calibración

El certificado de calibración debe contener lo siguiente:

Información del bloque de dureza estándar: valor de dureza nominal, escala, número de lote de producción, unidad de fabricación.

Condiciones de calibración: modelo de durómetro, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30% - 80%).

Resultados de la calibración: valor de dureza, valor promedio, uniformidad, desviación en 5 puntos.

Información de trazabilidad: cadena de trazabilidad y referentes nacionales/internacionales.

Conclusión de la calibración: si está calificada o no.

Fecha de calibración y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Ejemplos de valores de calibración de bloques de dureza estándar

Gobernante	Valor nominal	Valor de medición (FC)	Promedio (FC)	Uniformidad (HR)	Desviación (HR)
HRA	85	85.1, 85.0, 84.9, 85.2, 85.0	85.0	0.3	$\pm 0,1$
Banco de recursos humanos	90	90.2, 89.8, 90.0, 90.1, 89.9	90.0	0.4	$\pm 0,2$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Gobernante	Valor nominal	Valor de medición (FC)	Promedio (FC)	Uniformidad (HR)	Desviación (HR)
CDH	60	60,1, 60,0, 59,9, 60,2, 60,0	60.0	0.3	±0,1

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Problemas comunes y soluciones

pregunta	Posibles causas	Solución alternativa
Mala uniformidad de dureza	Microestructura de material no homogéneo	Reemplace el material o recaliente el tratamiento.
Se superó la desviación del valor medio	El probador de dureza no es lo suficientemente preciso	Calibración del durómetro
La rugosidad de la superficie supera el estándar	Pulido insuficiente	Repulido
Grandes fluctuaciones en los valores medidos	Vibración ambiental	Mejorar el entorno de pruebas

Resumir

La norma GB/T 230.3-2001 "Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos, Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar" proporciona un procedimiento estandarizado para la calibración de bloques de dureza estándar Rockwell y garantiza la precisión y fiabilidad de los valores de dureza de los bloques mediante pasos de calibración estandarizados y la evaluación de resultados. La implementación de esta norma contribuye a mejorar la trazabilidad y la consistencia de los ensayos de dureza y es aplicable a campos como el ensayo de materiales y la calibración metrológica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 3848-2001

Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la densidad de los materiales de carburo cementado. La densidad se calcula pesando la masa de la muestra en aire y en líquido, utilizando el principio de Arquímedes. Esta norma es aplicable a los carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase aglutinante, incluyendo los carburos cementados con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no es aplicable a muestras de carburo cementado porosas o agrietadas, ni a la determinación de la densidad de otros materiales (como acero o cerámica).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 3847-1983 Método para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 3850-1983 Terminología del carburo cementado

JJG 196-1990 Procedimientos de verificación para instrumentos de medición de vidrio de uso común

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 3850-1983 y los siguientes términos y definiciones:

Densidad (ρ): La masa de una muestra de carburo cementado dividida por su volumen, expresada en g/cm^3 .

Principio de Arquímedes: Cuando una muestra se sumerge en un líquido, la flotabilidad que experimenta es igual a la masa del líquido que desplaza, y la flotabilidad es igual a la diferencia entre la masa de la muestra en el aire y la masa en el líquido.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4. Principio de determinación

La densidad del carburo cementado se determina según el principio de Arquímedes y se calcula mediante los siguientes pasos:

Pesar la masa de la muestra en el aire (m_1);

Pesar la masa de la muestra en el líquido (generalmente agua desionizada) (m_2);

El volumen de la muestra se calcula en función de la flotabilidad, y la densidad de la muestra se calcula en función de la densidad del líquido.

La fórmula para calcular la densidad es la siguiente:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

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

en:

ρ es la densidad de la muestra, en g/cm^3 ;

m_1 es la masa de la muestra en el aire, en g ;

m_2 es la masa de la muestra en el líquido, en g;

ρ_0 es la densidad del líquido en g/cm^3 (0,9982 g/cm^3 para agua desionizada a 20° C) .

5. Equipo de medición

5.1 Balanza analítica

Precisión: $\pm 0,1$ mg.

Rango de medición: 0-200 g.

Equipado con un dispositivo de suspensión para pesar la masa de la muestra en el líquido.

5.2 Medio líquido

Agua desionizada, la pureza cumple con los requisitos de GB/T 6682-1992.

Temperatura: 20 ± 5 ° C, precisión de medición $\pm 0,1$ ° C.

cm^3 a 20° C) .

5.3 Equipo auxiliar

Termómetro: Precisión $\pm 0,1$ °C.

Alambre metálico fino: diámetro $< 0,1$ mm, utilizado para suspender la muestra.

Vaso de precipitados: Capacidad 100-500 mL, de acuerdo a JJG 196-1990.

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, utilizado para limpiar muestras.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20 ± 5 °C.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: forma geométrica regular (como cuboide, cilindro), masa 5-50 g.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, poros o capas de óxido.

Las muestras deben cumplir con los requisitos de preparación de GB/T 3847-1983.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($> 0,02$ g/cm^3) , el número de muestras debe aumentarse a 5.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Limpieza de muestras

Utilice etanol anhidro o acetona para limpiar la superficie de la muestra y eliminar el aceite y el polvo.

Limpiar en limpiador ultrasónico durante 5 min (frecuencia 40 kHz).

Después del lavado, secar a 60°C durante 30 minutos o secar al aire hasta peso constante.

6.4 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

La balanza analítica fue calibrada utilizando pesas patrón con una desviación de $<\pm 0,1$ mg.

Mida la temperatura del líquido y registre la densidad del agua desionizada (consulte el Apéndice A).

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C, se recomienda $20\pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50\pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de medición

Pesar la masa de la muestra en el aire (m_1) utilizando una balanza analítica y registrarla con una precisión de 0,1 mg.

La muestra fue suspendida por un alambre metálico delgado y sumergida en agua desionizada, asegurando que la muestra estuviera completamente sumergida y libre de burbujas.

Pesar la masa de la muestra en agua desionizada (m_2) y registrarla con una precisión de 0,1 mg.

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio.

Registre la temperatura del líquido y determine la densidad del líquido (ρ_0) a partir de una tabla.

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la densidad de la muestra:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \times \rho_0$$

El valor promedio de 3 mediciones se toma como densidad de la muestra, con una desviación de $<\pm 0,02$ g/cm³.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de densidad

El rango de densidad del carburo cementado depende del grado:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG6 (6% Co): 14,6-14,9 g/cm³ .
YG8 (8% Co): 14,5-14,8 g/cm³ .
YT15 (5% Co + TiC) : 12,8-13,2 g/cm³ .

8.2 Evaluación de la desviación

La desviación de densidad de las tres mediciones es $\leq \pm 0,02$ g/cm³ , de lo contrario es necesario repetir la prueba.

Si el valor de densidad está fuera del rango esperado, se debe analizar la causa (como porosidad de la muestra, limpieza incompleta).

8.3 Análisis de factores influyentes

Adherencia de burbujas: las burbujas en la superficie de la muestra harán que el m₂ sea demasiado grande y la densidad demasiado baja (desviación $> 0,05$ g/cm³) .

Temperatura del líquido: la desviación de temperatura $> \pm 5$ °C afecta a ρ_0 , desviación de densidad $> 0,01$ g/cm³ .

Porosidad de la muestra: Una porosidad $> 0,5$ % da como resultado una densidad menor (desviación $> 0,1$ g/cm³) .

Precisión de la balanza: Las desviaciones de la balanza $> \pm 0,1$ mg afectan al cálculo de la densidad (desviación $> 0,01$ g/cm³) .

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, medio líquido (agua desionizada), temperatura (°C), humedad (%).

Resultados de la prueba: masa en el aire (m₁) , masa en el líquido (m₂) , densidad (ρ), valor promedio y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Tabla de la relación entre la densidad del agua desionizada y la temperatura

Temperatura (°C)	Densidad (ρ_0) (g/cm ³)
15	0.9991
20	0.9982
25	0.9970
30	0.9957

Apéndice B (Apéndice informativo) Valores de referencia típicos de densidad de carburo

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

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Densidad (g/cm ³)	Aplicaciones típicas
YG6	6	14.6-14.9	brocas para minería
YG8	8	14.5-14.8	Herramientas de corte
YT15	5	12.8-13.2	Herramientas de acabado

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Resumir

La norma GB/T 3848-2001, «Determinación de la densidad del carburo cementado», proporciona un procedimiento estandarizado para la determinación de la densidad del carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados de las pruebas mediante el principio de Arquímedes. La implementación de esta norma facilita el control de calidad de los materiales de carburo cementado y proporciona soporte técnico fiable para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

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:

GB/T 3850-2001

Método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la resistencia a la flexión de los materiales de carburo cementado. El método de ensayo de flexión en tres puntos se utiliza para calcular la resistencia a la flexión (resistencia a la rotura transversal, TRS) mediante la aplicación de una carga hasta la rotura de la muestra. Esta norma es aplicable a los carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluyendo los carburos cementados con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no es aplicable a muestras de carburo cementado porosas o agrietadas, ni a la determinación de la resistencia a la flexión de otros materiales (como acero o cerámica).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 3847-1983 Método para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 3851-1983 Terminología del carburo cementado

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 3851-1983 y los siguientes términos y definiciones:

Resistencia a la flexión (σ_{bb}) o resistencia a la ruptura transversal (TRS): La tensión máxima que una muestra de carburo cementado puede soportar en una prueba de flexión de tres puntos, expresada en MPa.

Ensayo de flexión de tres puntos: método de ensayo en el que la muestra se coloca sobre dos puntos de apoyo y se aplica una carga en el centro hasta que la muestra se rompe.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

El método de ensayo de flexión en tres puntos se utiliza para determinar la resistencia a la flexión del carburo cementado. La muestra se coloca sobre dos puntos de apoyo y se aplica una carga en el centro de la muestra hasta que se rompe. Se registra la carga máxima de rotura (P) y se calcula la resistencia a la flexión en función del tamaño y la longitud de la muestra. La fórmula para calcular la resistencia a la flexión es la siguiente:

$$\sigma_{bb} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

en:

σ_{bb} es la resistencia a la flexión, en MPa ;

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

P es la carga de rotura, en N;
L es la distancia entre puntos de apoyo, en mm;
b es el ancho de la muestra, en mm;
h es el espesor de la muestra en mm.

5. Equipo de medición

5.1 Máquina de pruebas universal

Rango de carga: 0-50 kN , precisión $\pm 0,5\%$.

Control de velocidad de carga: 0,5-5 mm/min, desviación $< \pm 0,1$ mm/min.

Equipado con un dispositivo de flexión de tres puntos, la distancia de los puntos de apoyo es ajustable.

5.2 Accesorio

Diámetro del punto de apoyo y carga: 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Distancia entre puntos de apoyo: 30 mm ($\pm 0,05$ mm).

La dureza de la superficie del punto de apoyo y del punto de carga es $\geq \text{HRC } 60$ y la rugosidad de la superficie es $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Herramientas de medición

Calibrador Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Micrómetro: Precisión $\pm 0,001$ mm, utilizado para medición precisa de espesores.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones $35 \times 5 \times 5$ mm ($\pm 0,1$ mm).

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, poros o capas de óxido.

Las muestras deben cumplir con los requisitos de preparación de GB/T 3847-1983.

La rugosidad superficial de la muestra es $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (pulida).

Los cuatro lados largos de la muestra fueron biselados $0,1 \times 45^\circ$ para reducir la concentración de tensión.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($> 10\%$), el número de muestras debe aumentarse a 8.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Limpieza de muestras

Utilice etanol anhidro para limpiar la superficie de la muestra para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

6.4 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.5 Medición de la muestra

El ancho (b) y el espesor (h) de las muestras se midieron utilizando un calibrador vernier y un micrómetro con una precisión de $\pm 0,02$ mm.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

La máquina de prueba se calibró utilizando un sensor de fuerza estándar con una desviación de carga de $< \pm 0,5\%$.

Verifique la distancia entre los puntos de apoyo del dispositivo, la desviación es $< \pm 0,05$ mm.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de medición

Coloque la muestra sobre los dos puntos de apoyo del dispositivo de flexión de tres puntos, asegurándose de que la muestra esté horizontal y que la distancia L sea de 30 mm ($\pm 0,05$ mm).

Ajuste el punto de carga de manera que quede ubicado en el centro de la muestra.

Aplicar carga a una velocidad de 1 mm/min ($\pm 0,1$ mm/min).

Registre la carga máxima (P) cuando la muestra se rompe, en N.

Cada muestra se probó una vez y se repitió entre 5 y 8 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la resistencia a la flexión:

$$\sigma_{bl} = \frac{3PL}{2bh^2}$$

Tome el valor promedio de 5-8 muestras, con una desviación de $< \pm 10\%$.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de resistencia a la flexión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El rango de resistencia a la flexión del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): 2000-2500 MPa.

YG8 (8% Co): 1800-2200 MPa.

YT15 (5% Co + TiC) : 1300-1600 MPa.

8.2 Evaluación de la desviación

de 5 a 8 muestras es $\leq \pm 10\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de resistencia a la flexión está fuera del rango esperado, se debe analizar la causa (como defectos de la muestra, accesorios desalineados).

8.3 Análisis de factores influyentes

Defectos de la muestra: Una porosidad $> 0,5\%$ o microfisuras darán como resultado una menor resistencia (desviación $> 15\%$).

Alineación de los accesorios: la desalineación de los puntos de apoyo puede provocar concentración de tensiones y baja resistencia (desviación $> 10\%$).

Velocidad de carga: Una velocidad > 5 mm/min dará como resultado una mayor resistencia (desviación $> 5\%$).

Microestructura: Un tamaño de grano desigual ($> \pm 0,2 \mu\text{m}$) o una distribución desigual de la fase de unión reducirán la resistencia (desviación $> 10\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, distancia entre ejes (L), velocidad de carga, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30% - 80%).

σ_{bb} , valor medio y desviación de cada ejemplar.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de la resistencia a la flexión de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	a la flexión (MPa)	Aplicaciones típicas
YG6	6	2000-2500	brocas para minería
YG8	8	1800-2200	Herramientas de corte
YT15	5	1300-1600	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30% - 80% , $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02$ mm/m.

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

Resumir

La norma GB/T 3850-2001, "Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la determinación de dicha resistencia y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados de las pruebas mediante el método de flexión en tres puntos. La implementación de esta norma facilita la evaluación de las propiedades mecánicas de los materiales de carburo cementado y proporciona soporte técnico fiable para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

apéndice:

GB/T 3851-2001

Método de determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la tenacidad a la fractura (expresada como factor de intensidad de tensión KIC) de materiales de carburo cementado. El método de ensayo de viga entallada de un solo borde (SENB) se utiliza para calcular la tenacidad a la fractura mediante la aplicación de una carga a la muestra. Esta norma es aplicable a carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluyendo carburos cementados con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no es aplicable a muestras de carburo cementado porosas o agrietadas, ni a la determinación de la tenacidad a la fractura de otros materiales (como acero o cerámica).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 3847-1983 Método para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 3850-1983 Terminología del carburo cementado

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 3850-1983 y los siguientes términos y definiciones:

Tenacidad a la fractura (K_{IC}): La capacidad de las muestras de carburo cementado para resistir la fractura en un estado agrietado, expresada por el factor de intensidad de tensión crítica, con la unidad de $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Ensayo de viga con entalla de un solo borde (SENB): método de ensayo en el que se crea una fisura previa en un lado de la muestra y se aplica una carga hasta la fractura utilizando el método de flexión de tres puntos.

Pre-grieta: Una grieta inicial preparada mediante mecanizado o pre-grietaje por fatiga para simular defectos reales.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La tenacidad a la fractura del carburo cementado se determina mediante el método de ensayo de viga entallada de un solo borde (SENB). Se crea una grieta prefabricada en un lado de la muestra, esta se coloca en un dispositivo de flexión de tres puntos, se aplica una carga hasta su rotura, se registra la carga máxima de fractura (P) y se calcula la tenacidad a la fractura en función del tamaño de la muestra, la longitud de la grieta y la luz. La fórmula para el cálculo de la tenacidad a la fractura es la siguiente:

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

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

en:

K_{IC} es la tenacidad a la fractura, en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;

P es la carga de rotura, en N;

L es la distancia entre puntos de apoyo, en mm;

B es el espesor de la muestra, en mm;

W es el ancho de la muestra, en mm;

Y es un factor geométrico que depende de la longitud relativa de la grieta a/W (ver Apéndice A).

5. Equipo de medición

5.1 Máquina de pruebas universal

Rango de carga: 0-50 kN, precisión $\pm 0,5\%$.

Control de velocidad de carga: 0,05-0,5 mm/min, desviación $\leq \pm 0,01$ mm/min.

Equipado con un dispositivo de flexión de tres puntos, la distancia de los puntos de apoyo es ajustable.

5.2 Accesorio

Diámetro del punto de apoyo y carga: 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Distancia entre puntos de apoyo: 20 mm ($\pm 0,05$ mm).

La dureza de la superficie del punto de apoyo y del punto de carga es $\geq \text{HRC } 60$ y la rugosidad de la superficie es $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Equipo de preparación de grietas

Máquina de corte de precisión: se utiliza para procesar incisiones iniciales, con un ancho de incisión $< 0,2$ mm y una precisión de profundidad de $\pm 0,01$ mm.

Microscopio: aumento $50\times$ - $200\times$, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$, utilizado para medir la longitud de la grieta.

5.4 Herramientas de medición

Calibrador Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Micrómetro: Precisión $\pm 0,001$ mm, utilizado para medición precisa de espesores.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones $20 \times 4 \times 2,5$ mm ($\pm 0,1$ mm).

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas o capas de óxido.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las muestras deben cumplir con los requisitos de preparación de GB/T 3847-1983.

Rugosidad superficial $Ra < 0,2 \mu m$ (pulida).

6.2 Grietas prefabricadas

Posición de corte: ubicada en el centro inferior de la muestra, con una longitud a de 0,2-0,5 veces el ancho W de la muestra (es decir, $a/W = 0,2 - 0,5$).

Ancho del inciso: $< 0,2 \text{ mm}$, punta de la incisión roma a un radio de 0,05 mm.

Los recortes se pueden preparar mediante mecanizado o pre-agrietamiento por fatiga, se recomienda el pre-agrietamiento por fatiga para simular grietas naturales.

6.3 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si los resultados tienen una gran desviación ($> 10\%$), el número de muestras debe aumentarse a 8.

6.4 Limpieza de muestras

Utilice etanol anhidro para limpiar la superficie de la muestra para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

6.5 Medición de la muestra

El ancho de la muestra (W), el espesor (B) y la longitud de la grieta (a) se midieron utilizando un calibrador vernier y un micrómetro con una precisión de $\pm 0,02 \text{ mm}$.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

La máquina de prueba se calibró utilizando un sensor de fuerza estándar con una desviación de carga de $< \pm 0,5\%$.

Verifique la distancia entre los puntos de apoyo del dispositivo, la desviación es $< \pm 0,05 \text{ mm}$.

La medición de la longitud de la grieta se calibró utilizando un microscopio con una desviación de $< \pm 0,01 \text{ mm}$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de medición

La probeta se colocó sobre los dos puntos de apoyo del dispositivo de flexión de tres puntos con una distancia L de 20 mm ($\pm 0,05 \text{ mm}$).

Ajuste el punto de carga de manera que quede ubicado en el centro de la muestra y alineado con la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grieta prefabricada.

Aplicar carga a una velocidad de 0,1 mm/min ($\pm 0,01$ mm/min).

Registre la carga máxima (P) cuando la muestra se rompe, en N.

Cada muestra se probó una vez y se repitió entre 5 y 8 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

7.4 Cálculo de resultados

Calcule el factor geométrico Y (basado en la tabla a/W, ver Apéndice A).

Calcular la tenacidad a la fractura:

$$K_{IC} = \frac{PL}{BW^{3/2}} \cdot Y$$

Tome el valor promedio de 5-8 muestras, con una desviación de $\leq \pm 10\%$.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de tenacidad a la fractura

El rango de tenacidad a la fractura del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): $10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG8 (8% Co): $12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YT15 (5 % Co + TiC) : $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

8.2 Evaluación de la desviación

de 5 a 8 muestras es $\leq \pm 10\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de tenacidad a la fractura está fuera del rango esperado, es necesario analizar la causa (como la calidad de la grieta, defectos de la muestra).

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la grieta: KIC puede ser demasiado alta (desviación $> 10\%$) si el ancho de corte es $> 0,2$ mm o la punta no está roma de manera uniforme.

Alineación de los accesorios: los puntos de apoyo desalineados darán como resultado una distribución desigual de la tensión y un K_{IC} bajo (desviación $> 5\%$).

Velocidad de carga: Una velocidad $> 0,5$ mm/min afectará el comportamiento de la fractura y el K_{IC} será demasiado alto (desviación $> 5\%$).

Microestructura: La distribución desigual de la fase de enlace (fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$) reducirá K_{IC} (desviación $> 10 \%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño, longitud de la grieta (a).

Condiciones de prueba: modelo del equipo, distancia entre ejes (L), velocidad de carga, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

K_{IC}), valor medio y desviación de cada muestra.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Tabla del factor geométrico Y

a/W	Y
0.2	1.90
0.3	2.10
0.4	2.40
0.5	2.80

注: Y 值为近似值, 实际应用中可参考标准提供的详细表或插值计算。

Apéndice B (Apéndice informativo) Valores de referencia de tenacidad a la fractura de carburos cementados típicos

牌号	Co 含量 (wt%)	断裂韧性 (K_{IC}) (MPa·m ^{1/2})	典型应用
YG6	6	10-12	采矿钻头
YG8	8	12-15	切削工具
YT15	5	8-10	精加工刀具

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Resumir

La norma GB/T 3851-2001, "Método para la determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados de las pruebas mediante el método de ensayo de viga con entalla de una sola cara. La implementación de esta norma facilita la evaluación de la resistencia al agrietamiento de los materiales de carburo cementado y proporciona soporte técnico fiable para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

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

apéndice:

GB/T 9097-2001

Método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de las propiedades magnéticas de los materiales de carburo cementado, incluyendo la determinación de la intensidad de saturación magnética (intensidad de magnetización) y la fuerza coercitiva (H_c), mediante el método de inducción electromagnética y el método del bucle de histéresis. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no es aplicable a materiales no ferromagnéticos ni a carburo cementado sin cobalto.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 3847-1983 Método para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 3850-1983 Terminología del carburo cementado

GB/T 3848-2001 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 3850-1983 y los siguientes términos y definiciones:

Intensidad de saturación magnética (M_s): La intensidad magnética de una muestra de carburo cementado cuando alcanza la saturación magnética bajo un campo magnético externo suficientemente fuerte, expresada en kA/m o emu/g.

Fuerza coercitiva (H_c): después de que se magnetiza la muestra de carburo cementado, la intensidad del campo magnético requerida para que el campo magnético externo se invierta y haga que la intensidad de magnetización de la muestra sea cero, la unidad es kA/m.

Bucle de histéresis: curva cerrada que se forma cuando la intensidad de magnetización de una muestra cambia con la intensidad del campo magnético bajo la acción de un campo magnético externo, que se utiliza para medir la fuerza coercitiva.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado se basa en el método de inducción electromagnética y el método del bucle de histéresis:

Intensidad de saturación magnética (M_s): La intensidad de saturación magnética de la muestra se mide colocándola en un campo magnético intenso (generalmente >1000 kA/m) para que la fase de cobalto alcance la saturación magnética. La intensidad de saturación magnética está relacionada con el contenido de cobalto y permite evaluar la calidad de la fase de cobalto.

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

de la fuerza coercitiva (H_c): Dibujando el bucle de histéresis de la muestra, registre la intensidad del campo magnético que hace que la intensidad de magnetización disminuya a cero cuando se invierte el campo magnético externo; es decir, la fuerza coercitiva. Esta fuerza refleja la microestructura magnética y el tamaño de grano del material.

5. Equipo de medición

5.1 Probador de propiedades magnéticas

Tipo de equipo: Instrumento de bucle de histéresis (como un magnetómetro de muestra oscilante VSM o un instrumento de método de fuerza electromagnética).

Rango de campo magnético: 0-2000 kA/m, precisión $\pm 0,5\%$.

Rango de medición de intensidad de magnetización: 0-1000 kA/m o 0-200 emu/g, precisión $\pm 0,1\%$.

Equipado con electroimanes o imanes superconductores para proporcionar un campo magnético uniforme.

5.2 Equipo auxiliar

Balanza analítica: precisión $\pm 0,1$ mg, utilizada para pesar la masa de la muestra.

Calibrador Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

5.3 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, recomendado $< 60\%$.

Sin vibraciones, sin interferencias del campo magnético externo (campo magnético ambiental $< 0,1$ kA/m).

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, el tamaño recomendado es $6 \times 6 \times 10$ mm o 6 mm de diámetro y 10 mm de altura.

Masa de la muestra: 0,5-5 g, según los requisitos del equipo.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas o capas de óxido.

Las muestras deben cumplir con los requisitos de preparación de GB/T 3847-1983.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($> \pm 2\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Limpieza de muestras

Utilice etanol anhidro para limpiar la superficie de la muestra para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote y la marca, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.5 Medición de la muestra

Pesar la masa de la muestra con una precisión de $\pm 0,001$ g.

Mida el tamaño de la muestra con una precisión de $\pm 0,02$ mm.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Utilice muestras estándar (como níquel puro o carburo cementado estándar) para calibrar el probador de propiedades magnéticas.

Calibre la intensidad del campo magnético con una desviación de $< \pm 0,5\%$.

Medición de magnetización calibrada con desviación $< \pm 0,1\%$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 20 ± 5 °C .

Humedad relativa: $< 30\% - 80\%$.

Sin interferencias del campo magnético externo ($< 0,1$ kA/m).

7.3 Determinación de la intensidad de saturación magnética

Coloque la muestra en la platina de muestra del probador de propiedades magnéticas, asegurándose de que el eje de la muestra sea paralelo a la dirección del campo magnético.

Aplicar un campo magnético fuerte (> 1000 kA/m) para que la muestra alcance la saturación magnética.

Registre la magnetización de la muestra (M) en kA/m o emu/g.

Según la masa y densidad de la muestra, calcule la intensidad de saturación magnética:

或

$$M_s = \frac{M}{m}$$
$$M_s = \frac{M \cdot \rho}{V}$$

en:

M_s es la intensidad de saturación magnética, en emu/g o kA/m;

M es el valor medido en emu o kA/m;

m es la masa de la muestra, en g;

ρ es la densidad de la muestra, en g/cm³ ;

V es el volumen de la muestra en cm³ .

7.4 Determinación de la coercitividad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La muestra se coloca en el estado desmagnetizado inicial (el campo magnético externo es 0).
Se aplica un campo magnético que aumenta gradualmente hasta que la muestra alcanza la saturación magnética.

Aplique el campo magnético en la dirección opuesta, dibuje el bucle de histéresis y registre la intensidad del campo magnético externo correspondiente a la intensidad de magnetización de 0, es decir, la fuerza coercitiva H_c .

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio.

7.5 Cálculo del resultado

Intensidad de saturación magnética: Calcular el valor promedio de 3 mediciones, con una desviación de $<\pm 2\%$.

Coercitividad: Calcular el valor promedio de 3 mediciones, con una desviación de $<\pm 2\%$.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas del carburo cementado varían según el grado y el contenido de cobalto:
YG6 (6% Co): intensidad de saturación magnética 90-110 emu/g, fuerza coercitiva 5-10 kA/m.
YG8 (8% Co): intensidad de saturación magnética 110-130 emu/g, fuerza coercitiva 4-8 kA/m.
YT15 (5% Co + TiC) : intensidad de saturación magnética 70-90 emu/g, fuerza coercitiva 8-12 kA/m.

8.2 Evaluación de la desviación

La intensidad de saturación magnética y la desviación de la fuerza coercitiva de las tres muestras son $<\pm 3\%$; de lo contrario, es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de la propiedad magnética excede el rango esperado, se debe analizar la causa (como la distribución desigual de la fase de cobalto y los defectos microestructurales).

8.3 Análisis de factores influyentes

Distribución de fases de cobalto : Las fluctuaciones en el contenido de cobalto ($>\pm 0,5\%$) o una distribución desigual pueden provocar desviaciones en las propiedades magnéticas ($>3\%$).
del grano WC ($>\pm 0,5 \mu m$) afecta la coercitividad (desviación $>\pm 2\%$).

Interferencia magnética externa : un campo magnético ambiental $>0,1$ kA/m provocará errores de medición ($>\pm 5\%$).

Calidad de la muestra: Una porosidad $> 0,5\%$ reducirá la intensidad de saturación magnética (desviación $> 5\%$).

9 Informe de prueba y

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño y calidad.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, temperatura ambiente ($10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$), humedad (30%-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

80%), interferencia del campo magnético externo.

Resultados de la prueba: intensidad de saturación magnética (Ms), fuerza coercitiva (Hc), valor promedio y desviación de cada muestra.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de las propiedades magnéticas de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Intensidad de saturación magnética (emu/g)	Fuerza coercitiva (kA/m)	Aplicaciones típicas
YG6	6	90-110	5-8	brocas para minería
YG8	8	110-130	4-8	Herramientas de corte
YT15	5	70-90	8-12	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5 °C.

Humedad: 30%-80%, recomendado <60%.

Sin vibraciones externas, sin interferencias del campo magnético externo (<0,1 kA/m).

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Resumir

La norma GB/T 9097-2001, "Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado, incluyendo la determinación de la intensidad de saturación magnética y la coercitividad, con el fin de garantizar la precisión y repetibilidad de los resultados de las pruebas. La implementación de esta norma facilita la evaluación de la calidad y la microestructura de la fase de cobalto en el carburo cementado, y proporciona soporte técnico para la producción de materiales y el control de calidad. Es aplicable a herramientas de corte, perforadoras mineras y otros campos.

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:

GB/T 3849-2008

Método de prueba de dureza Vickers de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de prueba para la dureza Vickers (HV) del carburo cementado, incluyendo el principio de prueba, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos de prueba, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe de prueba, etc. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, y también al carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no se aplica al carburo cementado revestido ni al carburo cementado después del refuerzo de la superficie (como la prueba de dureza de la capa carburizada).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 230.1-2004 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo (escala A, B, C)

GB/T 4340.1-1999 Prueba de dureza Vickers de metales Parte 1: Método de prueba

GB/T 5249-2008 Especificación general para la preparación de muestras de carburo cementado
Procedimiento de verificación JJG 151-2006 para el probador de dureza Vickers

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

Dureza Vickers (HV): La capacidad del carburo cementado para resistir la penetración de un penetrador Vickers, expresada como el valor de dureza Vickers, siendo la unidad kgf/mm^2 .

Esta norma adopta principalmente HV30 (carga 30 kgf) como condición de prueba estándar.

Diagonal de sangría: La longitud de las dos diagonales de la sangría cuadrada que se forma cuando se presiona el penetrador Vickers en la superficie de la muestra, en mm.

4 Principio de prueba

La prueba de dureza Vickers se realiza presionando un indentador de diamante Vickers estándar (ángulo de vértice de 136°) sobre la superficie de la muestra de carburo cementado con una carga específica (generalmente 30 kgf), manteniéndolo durante un tiempo determinado y luego descargándolo. Se mide la longitud de las dos diagonales de la indentación (d_1 , d_2), se calcula la longitud diagonal promedio (d) y, a continuación, se calcula el valor de dureza Vickers (HV). La fórmula de cálculo es la siguiente:

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

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

其中:

- F 为试验载荷, 单位为 kgf (本标准为 30 kgf) ;
- d 为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$.

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Vickers

Cumplir con los requisitos de la normativa de verificación JJG 151-2006.

Rango de carga: 5-50 kgf, precisión $\pm 0,5\%$.

Control del tiempo de retención: 5-60 s, desviación $\leq \pm 0,5$ s.

5.2 Altura de presión

Penetrador de diamante Vickers estándar, ángulo de vértice $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

La superficie del penetrador está libre de defectos y tiene bordes limpios (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Dispositivo de medición

Microscopio: aumento $400\times$ - $600\times$, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipado con un sistema de lectura digital con una precisión de medición de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloque de calibración

Bloques de calibración estándar de carburo, rango de dureza HV 1200-2000, desviación $\leq \pm 2\%$.

La rugosidad de la superficie del bloque de calibración es $Ra < 0,05 \mu\text{m}$.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

La muestra debe tener una forma geométrica regular (como un cuboide o un cilindro), con un área de superficie de prueba $> 5 \times 5$ mm y un espesor > 2 mm.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido, marcas de mecanizado o defectos microscópicos.

Rugosidad superficial $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ (pulida).

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística de los resultados de la prueba.

Si la desviación del resultado es grande ($> 3\%$), el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Marcado de muestra

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

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

El probador de dureza se calibró utilizando un bloque de calibración estándar, una carga de 30 kgf y se midió 3 veces, con una desviación de $<\pm 1\%$.

Verifique el estado del penetrador para asegurarse de que no haya desgaste ni defectos.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $20\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad relativa: $50\pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza, asegurándose de que la superficie de prueba esté nivelada.

Seleccione una carga de 30 kgf (HV30) y un tiempo de retención de 10 a 15 s.

El penetrador se presiona lentamente en la superficie de la muestra y se descarga automáticamente después de mantener la carga.

Las longitudes de las dos diagonales de la sangría (d_1 , d_2) se midieron utilizando un microscopio con una precisión de $\pm 0,001$ mm.

Se medirán 5 puntos de sangría para cada muestra, con una separación entre sangrías > 3 veces la longitud diagonal ($> 0,3$ mm) y una distancia desde el borde de la muestra $> 0,5$ mm.

7.4 Cálculo de resultados

Calcula la longitud diagonal promedio de la sangría en cada punto:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calcular el valor de dureza Vickers en cada punto:

$$HV = \frac{1.8544 \times 30}{d^2}$$

Se toman cinco puntos de sangría como valor de dureza de la muestra, con una desviación de $<\pm 3\%$.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de valores de dureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El valor de dureza Vickers del carburo cementado suele ser HV 1200-2000, y el rango específico depende del grado:

YG6: Alto voltaje 1500-1600.

YG 8:HV 1450-1550.

YT 15:HV 1550-1650.

8.2 Evaluación de la desviación

Los 5 puntos de sangría son $<\pm 3\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de dureza de la muestra excede los requisitos técnicos del grado, es necesario analizar las razones (como microestructura desigual y porosidad excesiva) y volver a tomar la muestra y realizar la prueba.

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la superficie: Una rugosidad de la superficie $R_a > 0,1 \mu m$ dará como resultado valores de dureza más bajos (desviación $> 5\%$).

Tiempo de carga: Un tiempo de retención de $<10 s$ o $>15 s$ afectará el tamaño de la sangría (desviación $\pm 2\%$).

de WC desigual ($>\pm 0,2 \mu m$) o una porosidad alta ($>A02$) pueden provocar fluctuaciones de dureza ($>\pm 3\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, carga (30 kgf), tiempo de retención (10-15 s), temperatura ambiente ($20\pm 5^\circ C$), humedad ($50\pm 10\%$).

Resultados de la prueba: longitud diagonal de cada punto de sangría (d_1, d_2), valor de dureza (HV), valor de dureza promedio y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos de la marca.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Vickers de carburos cementados típicos

Marca	Dureza Vickers (HV30)	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Aplicaciones típicas
YG6	1500-1600	6	0,8-1,2	brocas para minería
YG8	1450-1550	8	0,8-1,2	Herramientas de corte
YT15	1550-1650	5	0,6-1,0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno 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

Temperatura: 20±5°C.
Humedad: 50±10%.
Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.
Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Tabla comparativa del valor de dureza Vickers y la longitud diagonal (carga 30 kgf)

Longitud diagonal media d (mm)	Dureza Vickers HV30	Longitud diagonal media d (mm)	Dureza Vickers HV30
0.100	5558	0.150	2469
0.110	4587	0.160	2166
0.120	3855	0.170	1915
0.130	3283	0.180	1713
0.140	2832	0.190	1542

Resumir

La norma GB/T 3849-2008, "Método de ensayo para la dureza Vickers del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la prueba de dureza Vickers del carburo cementado, garantizando la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de muestras, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de la norma facilita el control de calidad y la evaluación del rendimiento del carburo cementado, y proporciona soporte técnico confiable para campos de aplicación como herramientas de corte, taladros para minería y moldes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 7997-2010

Método de ensayo para la tenacidad a la fractura del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de prueba para la tenacidad a la fractura (K_{Ic}) del carburo cementado, incluyendo los principios de prueba, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos de prueba, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe de prueba, etc. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, y también al carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no se aplica al carburo cementado revestido ni al carburo cementado después del refuerzo de la superficie (como la prueba de tenacidad a la fractura de la capa carburizada).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 3851-2001 Método de determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

GB/T 5249-2008 Especificación general para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 6397-2002 Método de ensayo para el crecimiento de grietas por fatiga unidireccional en materiales metálicos

Procedimiento de verificación JJG 151-2006 para el probador de dureza Vickers

ISO 23146:2008 Carburo cementado – Método para la determinación de la tenacidad a la fractura

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

Tenacidad a la fractura (K_{Ic}): La capacidad del carburo cementado para resistir la propagación de grietas, medida en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, que refleja la resistencia a la fractura del material cuando existe una muesca o grieta.

Viga con entalla de un solo borde (SEPB): un tipo de muestra utilizada para pruebas de tenacidad a la fractura que tiene una entalladura en un lado para simular una grieta.

4 Principio de prueba

El ensayo de tenacidad a la fractura se basa en el método de viga con entalla de un solo borde (SEPB), en el que se prefabrica una entalla de un solo borde sobre la probeta y esta se somete a una carga de flexión de tres puntos hasta su fractura. Se registra la carga de fractura y se calcula la tenacidad a la fractura K_{Ic} a partir de las dimensiones geométricas de la probeta y los parámetros de la entalla.

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 fórmula de cálculo es:

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

en:

F es la carga de rotura, en N;

L es la distancia entre apoyos, en mm;

a es la profundidad de la muesca, en mm;

B es el espesor de la muestra, en mm;

W es la altura de la muestra, en mm;

Y es el factor geométrico, que depende de la relación a/W (normalmente determinada a partir de tablas o fórmulas estándar).

5 Equipo de prueba

5.1 Máquina de pruebas universal

Rango de carga: 0-50 kN , precisión $\pm 0,5\%$.

Control de velocidad de carga: 0,1-1 mm/min, desviación $\leq \pm 0,05$ mm/min.

5.2 Accesorio

Dispositivo de flexión de tres puntos con distancia entre apoyos de 16 mm ($\pm 0,05$ mm).

El punto de apoyo tiene un diámetro de 2 mm ($\pm 0,02$ mm) y una superficie lisa sin aristas ni esquinas.

5.3 Equipo de preparación de entallas

Máquina de corte por hilo o sierra de diamante, ancho de entalladura $< 0,2$ mm, precisión de profundidad $\pm 0,01$ mm.

Microscopio: aumento 100 $\times$, resolución $< 0,01$ mm, utilizado para medir la profundidad de la muesca.

5.4 Herramientas de medición

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm.

Micrómetro digital: precisión $\pm 0,001$ mm.

5.5 Control ambiental

Temperatura: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones $20 \times 4 \times 2$ mm ($\pm 0,02$ mm).

La superficie de la muestra debe ser plana, libre de grietas, capa de óxido o defectos de procesamiento y la rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (tratamiento de pulido).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los bordes de las muestras fueron biselados $0,1 \times 45^\circ$ para reducir la concentración de tensión.

6.2 Preparación del hueco

veces la altura de la muestra W (0,4-1,0 mm).

El ancho de la muesca es $<0,2$ mm y el radio inferior de la muesca es $<0,05$ mm (inspección al microscopio).

6.3 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística de los resultados de la prueba.

Si la desviación del resultado es grande ($>5\%$), el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.4 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.5 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

La máquina de pruebas universal se calibra utilizando un sensor de fuerza estándar con una desviación de carga de $\leq \pm 0,5\%$.

Verifique la precisión del equipo de preparación de la muesca y del accesorio, y que la desviación de la profundidad de la muesca sea $\leq \pm 0,01$ mm.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en un dispositivo de flexión de tres puntos con la muesca orientada hacia el punto de carga.

Velocidad de carga: 0,5 mm/min.

Cargue lentamente hasta que la muestra se rompa y registre la carga de rotura máxima F (N).

La profundidad de la muesca a se midió utilizando un microscopio (precisión $\pm 0,01$ mm).

Mida el espesor de la muestra B y la altura W (precisión $\pm 0,02$ mm).

7.4 Determinación de factores geométricos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Consulte la tabla o calcule el factor geométrico Y de acuerdo con la relación a/W (ISO 23146:2008 proporciona una tabla estándar).

Por ejemplo: cuando a/W=0,3, Y≈2,9.

7.5 Cálculo del resultado

Calcular la tenacidad a la fractura:

$$K_{Ic} = Y \times \frac{3FL\sqrt{a}}{2BW^{1.5}}$$

Cada muestra se calcula una vez y se toma el valor promedio de 5 muestras con una desviación de <±5%.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de tenacidad a la fractura

El valor de tenacidad a la fractura del carburo cementado suele ser K_{Ic} 10-20 MPa·m^{1/2}, y el rango específico depende del grado:

YG6: K_{Ic} 14-16 MPa·m^{1/2}.

YG8: K_{Ic} 12-15 MPa·m^{1/2}.

YT15: K_{Ic} 10-12 MPa·m^{1/2}.

8.2 Evaluación de la desviación

La desviación del valor de K_{Ic} de las 5 muestras es <±5%, de lo contrario es necesario volver a tomar muestras y realizar pruebas.

Si el valor K_{Ic} excede los requisitos técnicos de grado, se deben analizar las razones (como mala calidad de la entalla, microestructura desigual) y volver a realizar la prueba.

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la entalla: un ancho de entalla > 0,2 mm o un radio inferior > 0,05 mm darán como resultado un K_{Ic} más bajo (desviación > 10 %).

Velocidad de carga: Velocidades >1 mm/min o <0,1 mm/min afectarán la carga de rotura (desviación ±5%).

Microestructura: Un tamaño de grano de WC desigual (>±0,2 μm) o una distribución desigual de la fase Co pueden provocar fluctuaciones de K_{Ic} (>±6%).

Informe de prueba 9

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño, profundidad de muesca.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, velocidad de carga (0,5 mm/min), temperatura ambiente (20±5°C), humedad (50±10%).

Valor de K_{Ic} de cada muestra y su valor promedio y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos de la marca.

Fecha de prueba y firma del operador.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de tenacidad a la fractura de carburos cementados típicos

Marca	Tenacidad a la fractura (K_{Ic} , $MPa \cdot m^{1/2}$)	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Aplicaciones típicas
YG6	14-16	6	0,8-1,2	brocas para minería
YG8	12-15	8	0,8-1,2	Herramientas de corte
YT15	10-12	5	0,6-1,0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Tabla del factor geométrico Y (relación a /W)

a/W 0.2 0.3 0.4 0.5

Y 2.6 2.9 3.2 3.5

Nota: El valor Y es aproximado. Para valores específicos, consulte la tabla de la norma ISO 23146:2008.

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 20±5°C.

Humedad: 50±10%.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

La norma GB/T 7997-2010, Método de Ensayo para la Tenacidad a la Fractura del Carburo Cementado, proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de tenacidad a la fractura del carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación estandarizada de la muestra, la preparación de la entalla, los pasos de ensayo y la evaluación de los resultados. La implementación de esta norma facilita el control de calidad y la evaluación del rendimiento del carburo cementado, y proporciona soporte técnico fiable para aplicaciones como herramientas de corte, taladros para minería y moldes.

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:

GB/T 3488-2008

Método de inspección de la microestructura del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de inspección de la microestructura del carburo cementado, incluyendo el principio de inspección, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos de la inspección, la clasificación y evaluación de la microestructura, el informe de inspección, etc. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, y también al carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no se aplica al carburo cementado revestido ni al carburo cementado después del refuerzo de la superficie (como la inspección de la microestructura de la capa carburizada).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 5249-2008 Especificación general para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 4295-2008 Método para evaluar defectos microestructurales en carburo cementado

GB/T 5242-2001 Método de prueba de microestructura para carburo cementado (abolido, pero se hace referencia a algunas cláusulas)

ISO 4499-2:2008 Carburo cementado. Examen de microestructura. Parte 2: Método para la determinación del tamaño de grano.

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

carburo cementado

Un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión mediante pulvimetalurgia.

Microestructura

Características de distribución de granos de WC, fase Co, poros, carbono libre y fase η (fase de defecto de carburo) en carburo cementado.

Porosidad

El porcentaje de volumen de poros en el carburo cementado se clasifica en tres categorías: A, B y C.

Clase A: Microporos (diámetro $< 10 \mu\text{m}$).

Clase B: Poros grandes (10-25 μm de diámetro).

Clase C: Carbono libre.

fase η

La fase de defecto de carburo (como $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$) formada debido a un contenido insuficiente de carbono en el carburo cementado suele ser de color negro o gris oscuro.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tamaño de grano: El tamaño promedio de los granos de WC, en μm .

4 Principio de inspección

La inspección microestructural del carburo cementado se realiza mediante la observación de la superficie pulida y grabada de la muestra con un microscopio metalográfico, analizando el tamaño de grano de WC, la distribución de la fase Co, la porosidad, el carbono libre y las características de la fase η , y clasificándolo y evaluándolo según las normas. El proceso de inspección incluye:

Las muestras fueron pulidas hasta obtener un acabado de espejo ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$).

Utilice un agente de grabado como el reactivo de Murakami para revelar la microestructura.

Observar y evaluar las características del tejido con aumentos específicos ($100\times$, $1000\times$).

5. Equipo de inspección

5.1 Microscopio metalográfico

Aumento: se recomiendan $50\times$ - $1000\times$, $100\times$ (evaluación de porosidad) y $1000\times$ (medición del tamaño de grano).

Resolución: $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipado con un sistema de imágenes digitales para registrar fotografías microscópicas.

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: utilizada para muestreo, hoja de sierra de diamante, velocidad de corte $< 500 \text{ r/min}$.

Máquina de montaje: resina de montaje en caliente, temperatura 150 - 180°C , presión 20 - 30 MPa .

Máquina pulidora y rectificadora: tamaño de partícula de papel de lija $400\#$ - $2000\#$, velocidad del disco de pulido 200 - 300 r/min .

Agente de pulido: líquido de pulido de diamante (tamaño de partícula $0,5$ - $1 \mu\text{m}$).

5.3 Agente de grabado

Reactivo de Murakami: $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ (10 g) + NaOH (10 g) + agua destilada (100 mL).

Después de la preparación, revuelva bien antes de usar y guarde en un recipiente resistente a la luz.

5.4 Herramientas de medición

Escala del microscopio: precisión $\pm 0,001 \text{ mm}$.

de análisis de imágenes: se utiliza para estadísticas de tamaño de grano, precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6.1 Requisitos de la muestra

Tamaño de muestra: se recomienda $10 \times 10 \times 5$ mm ($\pm 0,1$ mm) o una muestra según el tamaño real de la pieza.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de procesamiento.

6.2 Corte de muestras

Utilice una hoja de sierra de diamante para cortar, agua como refrigerante, velocidad de corte < 500 r/min y evite el sobrecalentamiento (temperatura $< 60^{\circ}\text{C}$).

6.3 Montaje de la muestra

Cuando la muestra es pequeña, es necesario montarla utilizando resina de montaje en caliente a una temperatura de $150-180^{\circ}\text{C}$, una presión de $20-30$ MPa y un tiempo de enfriamiento de $5-10$ minutos.

6.4 Esmerilado y pulido de probetas

Lijado grueso: utilice papel de lija de $400\#$ a $1200\#$ para eliminar gradualmente las marcas de corte a una velocidad de 200 r/min.

Lijado fino: utilice papel de lija de $1500\#-2000\#$, velocidad 200 r/min.
de partícula $0,5\ \mu\text{m}$), velocidad del disco de pulido 300 r/min, pulido a $Ra < 0,05\ \mu\text{m}$ (estado de espejo).

6.5 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar los residuos de pulido y úsela después de secarla.

6.6 Grabado de muestra

Sumerja la muestra en el reactivo de Murakami y grabe durante $10-20$ s (ajustado según el grado de exposición del tejido).

Inmediatamente después del grabado, enjuague con agua destilada, limpie con etanol anhidro y seque.

6.7 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística de los resultados de la prueba.

Si la desviación del resultado es grande (diferencia de grado de porosidad > 1 grado), el número de muestras debe aumentarse a 5 .

6.8 Marcado de muestras

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

7 pasos de inspección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.1 Calibración del equipo

El microscopio metalográfico se calibró utilizando una regla de microscopio estándar, con una desviación de aumento de $\leq \pm 1\%$.

Verifique el brillo de la fuente de luz para garantizar la uniformidad del campo de visión (desviación de brillo $< 5\%$).

7.2 Condiciones de inspección

Temperatura ambiente: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Prueba de porosidad

Ampliación: $100\times$.

Observe la superficie de la muestra en al menos 5 campos de visión (área del campo de visión de aproximadamente 1 mm^2).

La porosidad se evalúa en tres categorías: A, B y C:

Categoría A: microporos (diámetro $< 10\text{ }\mu\text{m}$), clasificados A00 (sin poros), A02 ($< 0,02\%$), A04 ($< 0,04\%$), A06 ($< 0,06\%$), A08 ($< 0,08\%$).

diámetro $10\text{--}25\text{ }\mu\text{m}$), clasificados B00 (sin poros), B02 ($< 0,02\%$), B04 ($< 0,04\%$), B06 ($< 0,06\%$), B08 ($< 0,08\%$).

Categoría C: Carbono libre, clasificado como C00 (ninguno), C02 (una pequeña cantidad), C04 (medio), C06 (más) y C08 (una gran cantidad).

Registre el grado de porosidad de cada campo de visión y tome la peor calificación como resultado de la evaluación de la muestra.

Prueba de fase 7.4 η

Ampliación: $100\times\text{--}400\times$.

Observe la superficie de la muestra y busque la fase η (áreas negras o gris oscuro).

Evaluación de calificación: E00 (sin fase η), E02 (cantidad pequeña), E04 (cantidad media), E06 (cantidad grande), E08 (cantidad grande).

Registre la distribución y el contenido de la fase η y tome la peor calificación como resultado de la evaluación.

7.5 Medición del tamaño del grano

Ampliación: $1000\times$.

Se seleccionaron aleatoriamente cinco campos de visión y se midió el tamaño del grano WC utilizando un software de análisis de imágenes o el método de intersección de líneas.

Método de intersección: dibuje 5 líneas rectas al azar, cuente la cantidad de granos en cada línea recta y calcule el tamaño promedio de grano:

$$d = \frac{L}{N \times M}$$

en:

L es la longitud total de la línea de corte (mm);

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

N es el número de granos;

M es el aumento.

Se midieron 50 granos en cada campo de visión y se tomó el valor promedio con una desviación de $<\pm 10\%$.

7.6 Observación de la distribución de la fase Co

Ampliación: $1000\times$.

Observe si la fase Co (área gris clara) está distribuida uniformemente y si hay depósitos de Co (diámetro $> 5\ \mu\text{m}$).

Evaluación: uniforme (sin reserva de Co), ligeramente desigual (una pequeña cantidad de reserva de Co), severamente desigual (una gran cantidad de reserva de Co).

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Evaluación de la porosidad

La porosidad del carburo cementado debe cumplir con los requisitos técnicos del grado:

YG6:A02-B00-C00.

YG8:A02-B00-C00.

YT15:A02-B00-C00.

Si el grado de porosidad excede el requisito (por ejemplo, $A > A02$ o $B > B00$), la muestra no está calificada.

8.2 Evaluación de la fase η

El contenido de la fase η debe cumplir con los requisitos de grado:

YG6:E00-E02.

YG8:E00-E02.

YT15:E00-E02.

Si el grado de la fase η es $> E02$, la muestra no está calificada y debe analizarse para determinar el contenido de carbono ($< 6,1\%$ en peso conducirá a la formación de la fase η).

8.3 Evaluación del tamaño del grano

El tamaño del grano debe cumplir con los requisitos de grado:

YG6: $0,8-1,2\ \mu\text{m}$.

YG8: $0,8-1,2\ \mu\text{m}$.

YT15: $0,6-1,0\ \mu\text{m}$.

Una desviación $> \pm 10\%$ o un tamaño de grano fuera de rango requiere un análisis del proceso de sinterización (por ejemplo, temperatura $> 1450\ ^\circ\text{C}$).

8.4 Evaluación de la distribución de la fase Co

La distribución de la fase Co debe ser uniforme, sin depósitos de Co evidentes (diámetro $> 5\ \mu\text{m}$).

Si hay una gran cantidad de depósitos de Co, es necesario analizar el proceso de mezcla o la uniformidad de sinterización.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.5 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Un pulido insuficiente ($R_a > 0,05 \mu\text{m}$) puede provocar una interpretación errónea de la porosidad (desviación > 1 grado).

Tiempo de grabado: demasiado corto (< 10 s) dará como resultado una microestructura poco clara; demasiado largo (> 20 s) dará como resultado un grabado excesivo (los límites de grano de WC se ven borrosos).

Microestructura: Las fluctuaciones en el contenido de carbono (desviación $> 0,1$ % en peso) pueden conducir a la formación de carbono libre o fase η .

9 Informe de inspección

El informe de inspección debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de inspección: modelo del equipo, aumento, agente grabador y tiempo de grabado, temperatura ambiente ($20 \pm 5^\circ\text{C}$), humedad ($50 \pm 10\%$).

Resultados de la prueba: grado de porosidad, grado de fase η , tamaño de grano (valor promedio y desviación) y evaluación de la distribución de la fase Co.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos de la marca.

Fecha de inspección y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Características de la microestructura del carburo cementado típico

Marca	Porosidad	fase η	Tamaño de grano (μm)	Distribución de cofases	Aplicaciones típicas
YG6	A02-B00-C00	E00-E02	0,8-1,2	Uniforme	brocas para minería
YG8	A02-B00-C00	E00-E02	0,8-1,2	Uniforme	Herramientas de corte
YT15	A02-B00-C00	E00-E02	0,6-1,0	Uniforme	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Diagrama estándar de evaluación de porosidad

A02: El número de microporos en el campo de visión es menor a 10 y el diámetro es menor a $10 \mu\text{m}$.

B04: Hay de 5 a 10 agujeros grandes en el campo de visión, con un diámetro de 10 a $25 \mu\text{m}$.

C06: El área de distribución de carbono libre dentro del campo de visión es del $0,1$ % al $0,2$ %.

Nota: Para diagramas estándar específicos, consulte la norma ISO 4499-2:2008.

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50 \pm 10\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación de la mesa de prueba: desviación < 0,02 mm/m.

Resumir

La norma GB/T 3488-2008, "Métodos de ensayo para la microestructura del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la inspección de la microestructura del carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados de la inspección mediante la preparación de muestras, los pasos de inspección y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma facilita el control de calidad y la evaluación del rendimiento del carburo cementado, y proporciona soporte técnico fiable para herramientas de corte, brocas para minería, moldes y otras aplicaciones.

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:

¿Cuáles son las series de estándares ISO relacionados con el carburo ?

1. Serie ISO 3850: Terminología

ISO 3850:2018

Definiciones de la terminología del carburo cementado. La terminología y las definiciones del carburo cementado y materiales relacionados abarcan la composición del material (como fase dura, fase aglutinante), el proceso de preparación (como pulvimetalurgia, sinterización), la microestructura (como grano, poro), las pruebas de rendimiento (como resistencia a la flexión, dureza) y las áreas de aplicación (como herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste). Esta norma constituye la base de las normas de la serie de carburos cementados y proporciona un soporte terminológico unificado.

2. Serie ISO 3847: Preparación de muestras de ensayo

La norma ISO 3847:2005, método de preparación de muestras de carburo cementado

, especifica el método de preparación de muestras de carburo cementado, incluyendo los pasos de corte, montaje, rectificado, pulido y limpieza, para garantizar que la superficie de la muestra sea plana y sin daños, apta para posteriores ensayos de rendimiento (como resistencia a la flexión y dureza) o inspección de microestructura. Esta norma es aplicable a carburos cementados con WC como fase dura principal y Co como fase de enlace.

3. Serie ISO 4499: Inspección de microestructura

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado. Examen de microestructura. Parte 1: Directrices generales.

Proporciona principios generales para el examen de microestructura del carburo cementado, incluidos los requisitos básicos para la preparación de muestras, los métodos de observación microscópica y la evaluación de defectos, sentando las bases para las partes posteriores (como la determinación del tamaño del grano).

ISO 4499-2:2008 Carburo cementado. Examen de microestructura. Parte 2: Método para la determinación del tamaño de grano

especifica un método para la determinación del tamaño de grano de carburo de tungsteno (WC) en carburo cementado utilizando un microscopio metalográfico en combinación con el método de sección lineal o el método de sección planificada, adecuado para la optimización del rendimiento y el control de calidad.

ISO 4499-3:2016 Carburo cementado - Examen de microestructura Parte 3: Evaluación de poros, inclusiones, carbono libre y fase η

especifica el método de evaluación para defectos tales como poros, inclusiones, carbono libre y fase η en la microestructura del carburo cementado, utilizando un microscopio metalográfico para observar y comparar con atlas estándar para la evaluación de grado.

4. Serie ISO 4489: pruebas de rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ISO 4489:2010 Método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

especifica el método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado utilizando una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, que es adecuado para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales.

ISO 4489-2:2020 Método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado Parte 2: Condiciones de alta temperatura

complementa el método para la determinación de la resistencia a la flexión en un entorno de alta temperatura (como 800 °C-1200 °C), que es adecuado para escenarios de aplicación de alta temperatura (como el aeroespacial).

5. Serie ISO 3326: Ensayo de dureza

El método de ensayo de dureza Vickers de carburo cementado ISO 3326:2013

especifica el método para determinar la dureza Vickers del carburo cementado utilizando un probador de dureza Vickers con una carga de 10 a 50 kgf , que es adecuado para evaluar la resistencia del material a la indentación.

6. Serie ISO 3878: Prueba de dureza Rockwell

La norma ISO 3878:1983, Método de ensayo para la dureza Rockwell del carburo cementado (escala HRA),

especifica el método para determinar la dureza Rockwell del carburo cementado (escala HRA). Es adecuada para la detección rápida de la dureza del material y no ha sido revisada.

7. Serie ISO 28079: Ensayo de tenacidad a la fractura

La norma ISO 28079:2009 Método para la determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

especifica el método para la determinación de la tenacidad a la fractura (K_{IC}) del carburo cementado utilizando el método de prueba de viga con entalla de un solo borde (SENB), que es adecuado para evaluar la resistencia a la fisura de los materiales.

8. Serie ISO 3369: Determinación de la densidad

ISO 3369:2006 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

especifica un método para la determinación de la densidad del carburo cementado utilizando el principio de Arquímedes y es adecuado para el control de calidad y la verificación de la composición del material.

9. Serie ISO 4884: Ensayo de propiedades magnéticas

La norma ISO 4884:2019 Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

especifica el método para la determinación de la fuerza de saturación magnética y la coercitividad (H_c) del carburo cementado utilizando el método de bucle de histéresis, que es adecuado para evaluar la calidad y la microestructura de la fase de cobalto.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10. Serie ISO/TR 19041: Informes técnicos

ISO/TR 19041:2015 Informe técnico sobre la inspección de la microestructura del carburo cementado: orientación complementaria sobre la evaluación de defectos

Proporciona orientación técnica complementaria sobre la evaluación de defectos microestructurales, incluidos métodos de evaluación más detallados para la porosidad, las inclusiones, el carbono libre y la fase η , que no es obligatorio.

La serie de normas ISO sobre carburo cementado abarca diversos aspectos, como la definición de términos, la preparación de muestras, la inspección de la microestructura, las pruebas de rendimiento (resistencia a la flexión, dureza, tenacidad a la fractura, densidad, propiedades magnéticas), etc., y proporciona un soporte técnico integral para la fabricación, las pruebas y la aplicación del carburo cementado. Estas normas se aplican principalmente a carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, ampliamente utilizados en herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste y en el sector militar. La norma ISO 3850:2018, como base terminológica, forma un sistema completo con otras normas (como ISO 4499 e ISO 4489) para impulsar la estandarización e internacionalización de la industria global 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

apéndice:

ISO/TR 19041:2015 Carburo cementado
Informe técnico de inspección de microestructura: directrices complementarias
para la evaluación de defectos

1 Introducción

Como complemento a la serie de normas ISO 4499, este informe técnico proporciona directrices detalladas para la evaluación de defectos microestructurales en carburo cementado, con el objetivo de ayudar a los usuarios a implementar con mayor precisión la norma ISO 4499-3:2016 "Carburo Cementado - Examen Microestructural Parte 3: Evaluación de Porosidad, Inclusiones, Carbono Libre y Fase η ". Este informe se centra en los detalles operativos de la evaluación de defectos, el análisis de los factores influyentes, las sugerencias de mejora y los casos típicos, y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace. Este informe es un documento no obligatorio y solo tiene carácter de referencia.

2 Alcance

Este informe técnico proporciona orientación adicional para la evaluación de defectos microestructurales en carburo cementado, que incluye:

Detalles de los procedimientos para la evaluación de la porosidad (tipo A y B), inclusiones, carbono libre y fase eta.

Análisis de factores que afectan los resultados de la evaluación de defectos y sugerencias de mejora. Casos de evaluación de defectos y datos de referencia para grados típicos de carburo cementado.

Este informe es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase aglutinante, y resulta adecuado para el control de calidad, la investigación y el desarrollo, y la optimización de procesos.

3 Referencias normativas

Los siguientes documentos están relacionados con este informe técnico y se proporcionan como referencia:

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 1: Guía general

ISO 4499-3:2016 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 3: Evaluación de porosidad, inclusiones, carbono libre y fase eta

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

4 Términos y definiciones

Este informe técnico adopta los términos y definiciones definidos en las normas ISO 3850:2018 e ISO 4499-3:2016, incluidos:

Porosidad : Poros o espacios en una microestructura, divididos en Tipo A (diámetro $<10\ \mu\text{m}$) y Tipo B (diámetro $10\text{--}25\ \mu\text{m}$).

Inclusiones : Impurezas no metálicas (como óxidos y sulfuros) que existen en forma de partículas.

Carbono libre : Carbono que no forma compuestos con metales y existe en forma de grafito.

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

Fase η : Una fase frágil formada debido a un contenido insuficiente de carbono, como W3Co3C o Co6W6C.

5 Directrices complementarias para la evaluación de defectos

5.1 Sugerencias para mejorar la preparación de muestras

Corte : Se recomienda que la velocidad de corte sea $<0,05$ mm/s y el caudal de refrigerante sea $>0,5$ L/min para evitar microfisuras causadas por efectos térmicos.

Montaje : utilice resina de baja contracción (como resina epoxi) y controle la temperatura por debajo de 130 °C para evitar la deformación de los bordes de la muestra.

Esmerilado y pulido : Extienda el tiempo de pulido a 10-15 minutos, utilice líquido de pulido de $0,1$ μm y asegúrese de que la rugosidad de la superficie sea $R_a < 0,01$ μm .

Grabado : Reactivo Murakumi (10 g $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10$ g $\text{KOH} + 100$ mL H_2O) El tiempo de grabado se controla entre 3 y 5 s para evitar el grabado excesivo y cubrir defectos.

5.2 Detalles de la operación de observación microscópica

Selección de aumento : se recomienda $200\times$ para la observación de rutina y $500\times$ para la confirmación de características sutiles de inclusiones y la fase η .

Modos de iluminación :

Porosidad e inclusiones: utilice la observación de campo claro para mejorar el contraste.

Carbono libre y fase η : cuando se observa con luz polarizada, el carbono libre aparece de color blanco brillante y la fase η aparece de color gris oscuro.

Número de campos de visión

Se recomienda aumentar el número de campos a 10 con un área ≥ 1 mm² para mejorar la precisión estadística.

5.3 Método de mejora de la evaluación de defectos

Evaluación de la porosidad :

Se utilizó un software de análisis de imágenes para contar el número y el área de poros con una precisión de $\pm 0,1$ μm .

Los poros de tipo A y B se clasifican por separado y se requiere el análisis del proceso de sinterización para poros superiores a A06-B04 (por ejemplo, grado de vacío <10 Pa).

Evaluación de inclusión :

de inclusión es >20 μm , se debe registrar la composición química (por ejemplo, análisis del tipo de óxido utilizando EDS).

Para I04 y superiores, se debe verificar la pureza de las materias primas (impurezas $< 0,05\%$).

Evaluación gratuita de carbono :

Cuando la relación de área es $>1\%$, la desviación del contenido de carbono ($\leq \pm 0,1\%$) debe confirmarse en combinación con un análisis químico.

Para CO4 y superiores, es necesario optimizar el proceso de mezcla (por ejemplo, ampliando el tiempo de molienda de bolas a 48 h).

Evaluación de la fase η :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cuando la relación de área es $>1\%$, es necesario combinar la prueba de propiedades magnéticas para confirmar la influencia de la fase η (la intensidad de saturación magnética disminuye en $>5\%$). Por encima de η_{04} , es necesario ajustar la temperatura de sinterización ($<1450\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el contenido de carbono ($>0,1\%$).

5.4 Análisis de factores influyentes

Porosidad : Un vacío de sinterización insuficiente ($<10\text{ Pa}$), una velocidad de enfriamiento demasiado rápida ($>50\text{ }^{\circ}\text{C/min}$) o partículas de materia prima desiguales ($>2\text{ }\mu\text{m}$) provocan un aumento de la porosidad ($>A_{04}$).

Inclusiones : El contenido de óxido o sulfuro en las materias primas es $>0,05\%$, o una mezcla desigual (tiempo de molienda de bolas $<24\text{ h}$) conduce a un aumento de las inclusiones ($>I_{04}$).

Carbono libre : Un contenido de carbono demasiado alto ($>0,2\%$) o una distribución desigual (tiempo de mezcla $<24\text{ h}$) conduce a un aumento de carbono libre ($>C_{04}$).

Fase η : Un contenido de carbono insuficiente ($<0,1\%$), una temperatura de sinterización elevada ($>1450\text{ }^{\circ}\text{C}$) o una velocidad de enfriamiento lenta ($<10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$) conducen a la formación de la fase η ($>\eta_{04}$).

6 Análisis de casos típicos

6.1 Evaluación de defectos del carburo cementado de grado YG6

Información de muestra : Contenido de Co 6% , tamaño de grano $0,8\text{--}1,2\text{ }\mu\text{m}$, área de aplicación: brocas para minería.

Condiciones de prueba : microscopio metalográfico $200\times$, 10 campos de visión, área 1 mm^2 .

Resultado : A02-B02-I02-C02- η_{02} .

Análisis : La presencia de poros e inclusiones es baja, lo que indica un proceso de sinterización adecuado (vacío de 5 Pa , velocidad de enfriamiento de $30\text{ }^{\circ}\text{C/min}$). El carbono libre y la fase η se encuentran dentro del estándar, y el contenido de carbono está bien controlado (desviación $<\pm 0,05\%$).

6.2 Evaluación de defectos del carburo cementado de grado YG8

Información de la muestra : Contenido de Co 8% , tamaño de grano $1,0\text{--}1,5\text{ }\mu\text{m}$, área de aplicación: herramientas de corte.

Condiciones de prueba : microscopio metalográfico $200\times$, 10 campos de visión, área 1 mm^2 .

Resultado : A04-B04-I02-C04- η_{02} .

Análisis : El nivel de porosidad es alto (A04-B04), lo cual podría deberse a una velocidad de enfriamiento demasiado rápida ($>50\text{ }^{\circ}\text{C/min}$). El carbono libre es alto (C04); se recomienda verificar el contenido de carbono ($>0,2\%$) y la uniformidad de la mezcla (tiempo de molienda de bolas $<24\text{ h}$).

6.3 Evaluación de defectos del carburo cementado de grado YT15

Información de la muestra : Contenido de Co 5% , que contiene TiC, tamaño de grano $0,6\text{--}1,0\text{ }\mu\text{m}$, área de aplicación: herramientas de acabado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de prueba : microscopio metalográfico 500×, 10 campos de visión, área 1 mm².

Resultado : A02-B02-I04-C02-η04.

Análisis : Las inclusiones son altas (I0⁻), lo que podría deberse a impurezas en la materia prima de TiC (>0,05%). La fase η es alta (η0⁻), por lo que se recomienda reducir la temperatura de sinterización (<1450 °C) y ajustar el contenido de carbono (>0,1%).

7 sugerencias de mejora

Optimización de procesos :

Mejora la pureza de la materia prima: contenido de impurezas <0,03%.

Prolongar el tiempo de mezcla: tiempo de molienda de bolas >48 h para garantizar la uniformidad.

Optimizar los parámetros de sinterización: grado de vacío <5 Pa, velocidad de enfriamiento 20-30°C/min.

Mejoras en las pruebas :

(<±0,1 μm).

Aumente el número de campos de visión a 10-15 para mejorar la confiabilidad estadística.

Combine el análisis químico y las pruebas de propiedades magnéticas para evaluar integralmente el impacto de los defectos.

8 Conclusión

Este informe técnico proporciona una guía complementaria detallada para la evaluación de defectos microestructurales en carburo cementado. Ofrece a los usuarios referencias prácticas que mejoran la preparación de muestras, la observación microscópica y los métodos de evaluación de defectos, además del análisis de factores influyentes y casos típicos. La implementación de este informe contribuirá a mejorar la aplicación de la norma ISO 4499-3:2016 y apoyará el control de calidad y la optimización de procesos del carburo cementado.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia para la evaluación de defectos típicos del carburo cementado

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Nivel de defecto	Aplicaciones típicas
YG6	6	A02-B02-I02-C02-η02	brocas para minería
YG8	8	A04-B04-I02-C04-η02	Herramientas de corte
YT15	5	A02-B02-I04-C02-η04	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±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.

Apéndice C (Apéndice informativo) Herramienta de mejora de la evaluación de defectos

Software de análisis de imágenes : como ImageJ, para estadísticas de poros e inclusiones con una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

precisión de $<0,1 \mu\text{m}$.

Analizador EDS : se utiliza para el análisis de la composición de inclusión, límite de detección $<0,01\%$.

Probador de propiedades magnéticas : evalúa la influencia de la fase η , desviación de la intensidad de saturación magnética $<5\%$.

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:

ISO 4884:2019

Método de determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la fuerza de saturación magnética y la fuerza coercitiva (H_c) del carburo cementado, utilizando el método de bucle de histéresis, y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluido el carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , NbC , VC). Esta norma se aplica a la evaluación de la calidad y la microestructura de la fase de cobalto, y se utiliza ampliamente en el control de calidad del proceso de fabricación de carburo cementado.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

IEC 60404-4:1995 Materiales magnéticos Parte 4: Métodos de medición de propiedades magnéticas

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta ISO 3850:2018 e IEC 60404-4:1995 y los siguientes términos y definiciones:

Intensidad de saturación magnética: La intensidad de magnetización de saturación alcanzada por la fase de cobalto en carburo cementado bajo un fuerte campo magnético externo, medida en T (Tesla), que refleja el contenido y la pureza de la fase de cobalto.

Fuerza coercitiva (H_c): La intensidad del campo magnético necesaria para desmagnetizar la intensidad de magnetización del carburo cementado desde el estado de saturación a cero, expresada en A/m (amperio /metro), que refleja las características microestructurales.

Bucle de histéresis: curva cerrada que muestra el cambio de intensidad de magnetización con el campo magnético externo, utilizada para medir propiedades magnéticas.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La determinación de las propiedades magnéticas se basa en el método del bucle de histéresis, que consiste en colocar la muestra en un circuito magnético cerrado, aplicar un campo magnético externo variable, registrar la relación entre la intensidad de magnetización y la intensidad del campo magnético, y dibujar un bucle de histéresis. La intensidad de saturación magnética se mide a partir de la región de saturación del bucle de histéresis, y la fuerza coercitiva se determina a partir de la intensidad del campo magnético en el punto cero durante el proceso de desmagnetización.

Intensidad de saturación magnética: Mide la intensidad máxima de magnetización de una muestra

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

en un campo magnético fuerte (>500 kA/m), normalmente estandarizado como valor de magnetización por unidad de masa o unidad de volumen.

Coercitividad (H_c): Medida de la intensidad del campo magnético necesaria para revertir la magnetización de saturación a cero.

5. Equipo de medición

5.1 Probador de rendimiento magnético

Rango de intensidad del campo magnético: 0-1000 kA/m, precisión $\pm 1\%$.

Rango de medición de intensidad de magnetización: 0-2 T, precisión $\pm 0,5\%$.

Frecuencia: 50-60 Hz, adecuado para mediciones de CC o baja frecuencia.

Equipado con un dispositivo de circuito magnético cerrado (como un electroimán o una bobina toroidal).

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte $<0,5$ mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.3 Control ambiental

Temperatura: 15°C a 30°C , se recomienda $23\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50\pm 10\%$ recomendado.

Sin interferencias de campo magnético externo (<5 A/m), sin vibraciones y sin entorno de gas corrosivo.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, tamaño recomendado: $10\times 10\times 5$ mm o 10 mm de diámetro y 5 mm de altura.

de óxido y la rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es $>5\%$, el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $<0,1$ mm/s y etanol o agua como refrigerante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $Ra < 0,1 \mu m$.

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibre la intensidad del campo magnético del comprobador de rendimiento magnético con una desviación de $\leq \pm 1\%$.

Calibre la precisión de la medición de la intensidad de magnetización, la desviación es $\leq \pm 0,5\%$.

Utilice una muestra estándar (como níquel puro) para verificar el equipo, con una desviación de $\leq \pm 2\%$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $15^{\circ}C$ a $30^{\circ}C$, se recomienda $23 \pm 2^{\circ}C$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin interferencias de campo magnético externo ($< 5 A/m$), sin vibraciones y sin entorno de gas corrosivo.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en un aparato de circuito magnético cerrado, asegurándose de que la muestra esté alineada con la bobina o los polos magnéticos.

Se aplicó un campo magnético externo que aumentaba gradualmente hasta alcanzar la saturación ($> 500 kA/m$).

Registre los cambios en la intensidad de magnetización y la intensidad del campo magnético y dibuje el bucle de histéresis.

La intensidad de saturación magnética (normalizada por unidad de masa o volumen) se lee desde el bucle de histéresis.

La coercitividad (H_c), es decir, la intensidad del campo magnético en la que la magnetización es cero, se lee a partir del proceso de desmagnetización.

Repita la medición de 3 a 5 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Intensidad de saturación magnética: medida en T o $A \cdot m^2/kg$, normalmente convertida a $4\pi Ms$ (unidad de Gauss, $1 T \approx 10^4$ Gauss).

Fuerza coercitiva (H_c): medida en A/m .

Calcular el promedio:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$\bar{M}_s = \frac{\sum M_{s_i}}{n}, \quad \bar{H}_c = \frac{\sum H_{c_i}}{n}$$

Dónde está la Sra. M_{s_i} y H_{c_i} son valores de medición individuales y n es el número de mediciones.
Calcular la desviación estándar:

$$s_{M_s} = \sqrt{\frac{\sum (M_{s_i} - \bar{M}_s)^2}{n-1}}, \quad s_{H_c} = \sqrt{\frac{\sum (H_{c_i} - \bar{H}_c)^2}{n-1}}$$

Juicio de calificación: desviación del valor medio $< \pm 5\%$, desviación estándar $< 5\%$ (intensidad de saturación magnética), < 50 A/m (fuerza coercitiva).

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de propiedades magnéticas

Las propiedades magnéticas del carburo cementado varían según el grado:

YG6 (6% Co): intensidad de saturación magnética 0,15-0,18 T, fuerza coercitiva 10-20 kA/m.

YG8 (8% Co): intensidad de saturación magnética 0,20-0,24 T, fuerza coercitiva 8-15 kA/m.

YT15 (5% Co + TiC) : intensidad de saturación magnética 0,12-0,15 T, fuerza coercitiva 15-25 kA/m.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $< \pm 5\%$, la desviación estándar es $< 5\%$ (intensidad de saturación magnética) y < 50 A/m (fuerza coercitiva); de lo contrario, se requiere volver a realizar la prueba.

Si el resultado es inferior al requisito técnico, se deben analizar las razones (como la distribución desigual de la fase de cobalto y la influencia de las impurezas).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,1 \mu\text{m}$ o una porosidad $> 0,5\%$ pueden reducir la intensidad de saturación magnética entre un 3 % y un 5 %.

Interferencia del campo magnético: un campo magnético externo > 5 A/m puede provocar errores de medición del 2%-3%.

Composición del material: La fluctuación del contenido de cobalto $> \pm 0,5\%$ o la presencia de la fase η pueden reducir la intensidad de saturación magnética entre un 5% y un 10% y aumentar la fuerza coercitiva entre un 10% y un 20%.

Calibración del equipo: Una desviación en la intensidad del campo magnético $> 1\%$ puede resultar en una desviación del 2%-5% en los resultados.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño ($10 \times 10 \times 5$ mm o diámetro 10 mm, altura 5 mm).

Condiciones de prueba: modelo de comprobador, intensidad del campo magnético (> 500 kA/m), temperatura ambiente (15°C a 30°C), humedad (30%-70%).

Resultados de la prueba: intensidad de saturación magnética y coercitividad de cada muestra, valor

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

medio, desviación estándar y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de las propiedades magnéticas de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Intensidad de saturación magnética (T)	Fuerza coercitiva (kA/m)	Aplicaciones típicas
YG6	6	0,15-0,18	10-20	brocas para minería
YG8	8	0,20-0,24	8-15	Herramientas de corte
YT15	5	0,12-0,15	15-25	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 15°C a 30°C, se recomienda 23±2°C.

Humedad: 30%-70%, 50±10% recomendado.

Sin interferencias de campo magnético externo (<5 A/m), sin vibraciones y sin entorno de gas corrosivo.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Resumir

La norma ISO 4884:2019, «Métodos para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado», proporciona un procedimiento internacional estandarizado para la determinación de la fuerza de saturación magnética y la coercitividad del carburo cementado, y garantiza la precisión y comparabilidad de los resultados mediante el método del bucle de histéresis. La implementación de esta norma facilita la evaluación de la calidad y la microestructura de la fase de cobalto y proporciona soporte técnico para el control de calidad del proceso de fabricación de carburo cementado.

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

apéndice:

ISO 3369:2006

Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la densidad del carburo cementado, utilizando el principio de Arquímedes, y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluido el carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , NbC , VC). Esta norma se aplica al control de calidad y la verificación de la composición de materiales, y se utiliza ampliamente en herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste y otros campos de aplicación.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:2018 y los siguientes términos y definiciones:

Densidad: Medida de masa por unidad de volumen, expresada en g/cm³, que refleja la compacidad del carburo cementado.

Principio de Arquímedes: método de medición de la densidad basado en la relación entre el volumen de líquido desplazado por un objeto en un líquido y su masa.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La densidad se determina según el principio de Arquímedes. La densidad de la muestra se calcula midiendo su masa en el aire y la masa que flota en el líquido. La fórmula es:

$$\rho = \frac{m_a \cdot \rho_l}{m_a - m_l}$$

其中:

- ρ 为试样密度 (g/cm³) ,
- m_a 为试样在空气中的质量 (g) ,
- m_l 为试样在液体中的质量 (g) ,
- ρ_l 为液体的密度 (g/cm³, 通常为去离子水的 0.997 g/cm³, 20°C) .

en:

ρ es la densidad de la muestra (g/cm³) ,

m_a es la masa de la muestra en el aire (g),

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

ml es la masa de la muestra en el líquido (g),

ρ_l es la densidad del líquido (g/cm^3), normalmente $0,997 \text{ g}/\text{cm}^3$ para agua desionizada a 20°C .

5. Equipo de medición

5.1 Equilibrio

Rango de medición: 0-200 g, precisión $\pm 0,0001 \text{ g}$.

Equipado con un dispositivo de suspensión para medición en líquidos.

5.2 Contenedor de líquido

Material: vidrio resistente a la corrosión o acero inoxidable.

Líquido: agua desionizada, temperatura controlada a $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

5.3 Termómetro

Rango de medición: 0°C a 50°C , precisión $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

5.4 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte $< 0,5 \text{ mm}$, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 15°C a 25°C , se recomienda $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cualquier forma, tamaño recomendado $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ o masa total $\geq 5 \text{ g}$ de óxido y la rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es $> 0,05 \text{ g}/\text{cm}^3$, el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $< 0,1 \text{ mm/s}$ y etanol o agua como refrigerante.

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

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $Ra < 0,1 \mu m$.

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

La precisión de la balanza calibrada es $\leq \pm 0,0001 g$.

El termómetro fue calibrado con una desviación de $< \pm 0,1^\circ C$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $15^\circ C$ a $25^\circ C$, se recomienda $20 \pm 1^\circ C$.

Temperatura del líquido: $20 \pm 1^\circ C$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Mida la masa de la muestra en el aire, m_a a m_a , y regístrela con una precisión de 0,0001 g.

Suspenda la muestra bajo una balanza, sumérjala en agua desionizada, mida su masa en el líquido (m_l a m_l) y registre hasta 0,0001 g.

Asegúrese de que la muestra esté completamente sumergida y libre de burbujas de aire.

Repita la medición de 3 a 5 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la densidad de cada muestra:

$$\rho = \frac{m_a + \rho_l}{m_a - m_l}$$

donde $\rho_l = 0,997 g/cm^3$ ($20^\circ C$).

Calcular el promedio:

$$\bar{\rho} = \frac{\sum \rho_i}{n}$$

Donde ρ_i es la densidad de una sola muestra y n es el número de muestras.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\rho_i - \bar{\rho})^2}{n - 1}}$$

Juicio de calificación: desviación de densidad media $\leq \pm 0,5\%$, desviación estándar $< 0,05 g/cm^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de densidad

El rango de densidad del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): 14,8-15,0 g/cm³.

YG8 (8% Co): 14,6-14,8 g/cm³.

YT15 (5% Co + TiC) : 11,5-12,0 g/cm³.

8.2 Evaluación de la desviación

La desviación de densidad promedio de 3 a 5 muestras es $\leq \pm 0,5\%$ y la desviación estándar es $< 0,05$ g/cm³; de lo contrario, es necesario volver a realizar la prueba.

Si la densidad es inferior a los requisitos técnicos, es necesario analizar las razones (como alta porosidad y desviación de la composición).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,1 \mu\text{m}$ o grietas $> 0,05 \text{ mm}$ pueden provocar errores de medición de densidad de 0,1%-0,2%.

Temperatura del líquido: una desviación de temperatura de $> 1^\circ\text{C}$ respecto de 20°C puede resultar en una desviación de densidad de entre el 0,05 % y el 0,1 %.

Adherencia de burbujas: las burbujas en la superficie de la muestra pueden reducir el valor medido entre un 0,1% y un 0,3%.

Composición del material: Las fluctuaciones del contenido de Co $> \pm 0,5\%$ o un contenido de WC insuficiente pueden afectar la uniformidad de la densidad.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ o masa total $\geq 5 \text{ g}$).

Condiciones de prueba: modelo de balanza, temperatura del líquido ($20 \pm 1^\circ\text{C}$), temperatura ambiente (15°C a 25°C), humedad (30%-70%).

Resultados de la prueba: densidad, valor medio, desviación estándar y desviación de cada muestra.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia típicos de densidad de carburo

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Densidad (g/cm ³)	Aplicaciones típicas
YG6	6	14.8-15.0	brocas para minería
YG8	8	14.6-14.8	Herramientas de corte
YT15	5	11.5-12.0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 15°C a 25°C , se recomienda $20 \pm 1^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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 3369:2006, «Determinación de la densidad del carburo cementado», proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la determinación de la densidad del carburo cementado, garantizando la precisión y comparabilidad de los resultados mediante el principio de Arquímedes. La implementación de esta norma facilita el control de calidad y la verificación de la composición del material, y proporciona soporte técnico para áreas de aplicación como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

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:

ISO 28079:2009

Método de determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la tenacidad a la fractura (K_{IC}) del carburo cementado, utilizando el método de prueba de viga con entalla de un solo borde (SENB), y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluido el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, NbC, VC). Esta norma se aplica a la evaluación de la capacidad del carburo cementado para resistir la propagación de grietas y se utiliza ampliamente para el análisis de rendimiento en campos de aplicación de alta tensión, como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

ISO 12135:2002 Materiales metálicos — Métodos de ensayo para tenacidad a la fractura

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta las normas ISO 3850:2018 e ISO 12135:2002 y los siguientes términos y definiciones:

Tenacidad a la fractura (K_{IC}): La capacidad de un material para resistir el crecimiento de grietas, expresada en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, medido en condiciones de deformación plana.

Viga con entalla de un solo borde (SENB): una muestra de viga con una entalla en un lado, utilizada para pruebas de tenacidad a la fractura.

Prefisura: grieta inicial generada por la carga de fatiga en el extremo entallado de la muestra.

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La tenacidad a la fractura (K_{IC}) se determina mediante el ensayo de viga con entalla de un solo borde (SENB), que mide el factor crítico de intensidad de tensión en el momento de la fractura de una muestra mediante la aplicación de una carga concentrada. La K_{IC} se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$K_{IC} = \frac{F}{B\sqrt{W}} \cdot Y \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$$

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

其中:

- K_{IC} 为断裂韧性 ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) ,
 - F 为断裂载荷 (N) ,
 - B 为试样厚度 (m) ,
 - W 为试样宽度 (m) ,
 - a 为切口深度 (m) ,
 - Y 为几何因子 (取决于 a/W 比) ,
 - $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 为校正函数 (基于标准表或公式) ,
- a/W 比通常在 0.45 至 0.55 之间。

5. Equipo de medición

5.1 Máquina de prueba

Capacidad de carga: 0-50 kN , precisión $\pm 1\%$.

Velocidad de carga: 0,1-1 mm/min, ajustable.

Equipado con sensor de fuerza y sensor de desplazamiento con resolución $<0,01$ N y $<0,01$ mm.

5.2 Equipo de carga por fatiga

Frecuencia de carga: 10-30 Hz, precisión ± 1 Hz.

Carga máxima: no más del 80% de la resistencia a la flexión, precisión $\pm 1\%$.

5.3 Accesorio

Dispositivo de flexión de tres puntos: radio del punto de apoyo 1-2 mm, radio del punto de carga 1 mm, distancia de apoyo 16-20 mm.

Material de la abrazadera: acero endurecido, dureza $>\text{HRC } 60$.

5.4 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión de baja velocidad, ancho de corte $<0,1$ mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $23\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50\pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, tamaño recomendado: $20\times 4\times 2$ mm (largo $\times$ ancho $\times$ alto), tolerancia $\pm 0,02$ mm.

Incisión: Profundidad a a a es el ancho de la muestra W $45\%-55\%$ de W , ancho de incisión $<0,1$

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

mm, radio de la punta $<0,05$ mm.

de óxido y la rugosidad superficial $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es $>0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $<0,05$ mm/s y etanol o agua como refrigerante.

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: Utilice líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$, rugosidad de la superficie $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.4 Preparación previa a la fisura

Se utilizó un dispositivo de carga de fatiga para generar una grieta previa en el extremo de la entalla, con un rango de carga del 50% al 80% de la resistencia a la flexión y una frecuencia de 10 a 30 Hz. La longitud previa a la grieta aumentó entre 0,5 y 1 mm y el radio de la punta fue $<0,01$ mm.

6.5 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibre la precisión de carga de la máquina de prueba, desviación $\leq \pm 1\%$.

Calibrar el centrado del accesorio, desviación $< 0,02$ mm.

Calibre la carga y frecuencia del equipo de carga por fatiga con una desviación de $\leq \pm 1\%$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación 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

La muestra se colocó en un dispositivo de flexión de tres puntos con el punto de apoyo alineado con el punto de carga y una distancia de 16 mm.

Ajuste la velocidad de carga a $0,5 \pm 0,2$ mm/min.

Aplique carga hasta que la muestra se rompa y registre la carga máxima F y el desplazamiento de la fractura.

Se midieron la profundidad de la muesca a y el ancho de la muestra W y se calculó la relación a/W .

Repita el experimento de 5 a 10 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Calcule la tenacidad a la fractura KIC de cada muestra de acuerdo con la fórmula de la Sección 4.

几何因子 Y 和校正函数 $f\left(\frac{a}{W}\right)$ 参考标准表 (附录 A) 。

Calcular el promedio:

$$\bar{K}_{IC} = \frac{\sum K_{ICi}}{n}$$

Dónde está KIC ; es la tenacidad a la fractura de una sola muestra y n es el número de muestras.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (K_{ICi} - \bar{K}_{IC})^2}{n - 1}}$$

Juicio de calificación: desviación promedio de tenacidad a la fractura $< \pm 5\%$, desviación estándar $< 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de tenacidad a la fractura

El rango de tenacidad a la fractura del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): $12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG8 (8% Co): $10-13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YT15 (5 % Co + TiC) : $8-11 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

8.2 Evaluación de la desviación

5-10 muestras es $< \pm 5\%$ y la desviación estándar es $< 0,2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la tenacidad a la fractura es inferior a los requisitos técnicos, se deben analizar las razones (como grietas previas desiguales y defectos de la muestra).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Un ancho de entalladura $> 0,1$ mm o grietas previas irregulares pueden reducir la tenacidad a la fractura entre un 5% y un 10%.

Condiciones de carga: Una velocidad de carga > 1 mm/min o una desviación del centrado del accesorio $> 0,05$ mm pueden provocar una desviación del resultado del 3%-5%.

Composición del material: La fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$ o el tamaño del grano de WC $> 2 \mu\text{m}$ pueden afectar la uniformidad de la tenacidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño (20×4×2 mm), profundidad de muesca a y relación a/W .

Condiciones de prueba: modelo de máquina de prueba, tipo de fijación (tres puntos), velocidad de carga (0,5 ± 0,2 mm/min), temperatura ambiente (10 °C a 35 °C), humedad (30 %-70 %).

Resultados de la prueba: tenacidad a la fractura, valor medio, desviación estándar y variación de cada probeta.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice normativo) Factores geométricos y tablas de funciones de corrección

relación a/w	Factor de geometría Y	Función de corrección f(aW)
0.45	1.92	3.08
0,50	2.00	3.47
0,55	2.10	3.92

Nota: Los valores específicos se interpolan a partir de tablas estándar en función de la geometría de la muestra y las condiciones de carga.

Apéndice B (Apéndice informativo) Valores de referencia de tenacidad a la fractura de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tenacidad a la fractura (MPa · m ^{1/2})	Aplicaciones típicas
YG6	6	12-15	brocas para minería
YG8	8	10-13	Herramientas de corte
YT15	5	8-11	Herramientas de acabado

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°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 28079:2009, "Método para la determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la determinación de la tenacidad a la fractura (KIC) del carburo cementado y garantiza la precisión y comparabilidad de los resultados mediante el ensayo de viga entallada de un solo filo (SENB). La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento del carburo cementado y proporciona soporte

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

técnico para aplicaciones de alta tensión, como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.



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:

ISO 3878:1983

Método de prueba de dureza Rockwell de carburo cementado (escala HRA)

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la dureza Rockwell (escala HRA) del carburo cementado, utilizando un durómetro Rockwell para aplicar una carga inicial de 10 kgf (98,07 N) y una carga total de 60 kgf (588,4 N). Es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, NbC, VC). Esta norma es adecuada para la evaluación rápida de la resistencia a la indentación del carburo cementado y se utiliza ampliamente en el control de calidad de herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

ISO 6508-1:2005 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo (escalas A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta las normas ISO 3850:2018 e ISO 6508-1:2005 y los siguientes términos y definiciones:

Dureza Rockwell (HRA): Valor de dureza basado en la diferencia de profundidad tras presionar el penetrador Rockwell en la superficie de la muestra. Esta unidad es HRA y es adecuada para materiales de alta dureza.

Penetrador de cono de diamante: un penetrador de diamante con un ángulo de vértice de 120° utilizado en los probadores de dureza Rockwell.

Carga inicial: La fuerza inicial aplicada a la muestra, que tiene un valor de 10 kgf (98,07 N).

Carga total: Carga preliminar más carga principal, valor 60 kgf (588,4 N).

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La dureza Rockwell (escala HRA) se determina con un durómetro Rockwell, que mide la diferencia de profundidad tras presionar el penetrador en la superficie de la muestra aplicando una carga inicial de 10 kgf y una carga total de 60 kgf. El valor de dureza se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

HRA es el valor de dureza Rockwell, h es la diferencia entre la profundidad de la

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

indentación tras retirar la carga total y la profundidad de la carga inicial (mm), y 0,002 mm es la unidad de profundidad de la escala de dureza Rockwell. La escala HRA se aplica al rango de dureza de 20 a 88 HRA y se utiliza habitualmente para materiales de alta dureza, como el carburo cementado.

5. Equipo de medición

5.1 Probador de dureza Rockwell

Rango de carga: 10 kgf (carga preliminar) + 50 kgf (carga principal) = 60 kgf (carga total), precisión $\pm 0,5\%$.

Penetrador: cono de diamante con ángulo de vértice de 120° , radio de la punta de 0,2 mm, precisión de $\pm 0,01$ mm.

de profundidad: resolución 0,001 mm, precisión $\pm 0,5 \mu\text{m}$.

Tiempo de carga: carga preliminar 2-8 s, carga total 10-15 s, precisión ± 1 s.

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte $< 0,5$ mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.3 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, el tamaño recomendado es $10 \times 10 \times 5$ mm o 10 mm de diámetro y 5 mm de altura.

de óxido y la rugosidad superficial $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es > 2 HRA, el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $< 0,1$ mm/s y etanol o agua como refrigerante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: Utilice líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$, rugosidad de la superficie $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibrar la carga del probador de dureza Rockwell, desviación $< \pm 0,5\%$.

Calibre el sistema de medición de penetración y profundidad con una precisión de $< \pm 0,5 \mu\text{m}$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en el banco de trabajo del probador de dureza Rockwell y ajuste el nivel de la superficie.

Aplique una carga inicial de 10 kgf, manténgala durante 2 a 8 s y registre la profundidad inicial.

Se aplicó una carga total de 60 kgf y se mantuvo durante 10-15 s, y se registró la diferencia de profundidad después de retirar la carga principal.

Mida al menos 3 posiciones diferentes en la superficie de la muestra, con un intervalo de $\geq 2,5 \text{ mm}$.

Repita el experimento de 5 a 10 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Lea directamente el valor HRA que muestra el probador de dureza Rockwell.

Calcular el promedio:

$$\bar{HRA} = \frac{\sum HRA_i}{n}$$

Dónde está HRA_i es un valor de medición único y n es el número de mediciones.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HRA_i - \bar{HRA})^2}{n - 1}}$$

Juicio de calificación: desviación media de dureza $< \pm 2\%$, desviación estándar $< 2 \text{ HRA}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de dureza

El rango de dureza Rockwell (HRA) del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): 85-90 HRA.

YG8 (8% Co): 83-88 HRA.

YT15 (5% Co + TiC) : 87-92 HRA.

8.2 Evaluación de la desviación

de 5 a 10 puntos de medición es $<\pm 2\%$ y la desviación estándar es <2 HRA, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la dureza es inferior a los requisitos técnicos, es necesario analizar las razones (como defectos de superficie y carga desigual).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,02 \mu\text{m}$ o grietas $> 0,05 \text{ mm}$ pueden reducir la dureza entre un 2 % y un 5 %.

Tiempo de carga: Un tiempo de carga total $<10 \text{ s}$ o $>15 \text{ s}$ puede resultar en un error de medición del 1%-2%.

Condiciones ambientales: La humedad $>70\%$ o las fluctuaciones de temperatura $>5^\circ\text{C}$ pueden afectar la precisión de la medición de profundidad.

Composición del material: La fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$ o el tamaño de grano de WC $> 2 \mu\text{m}$ pueden afectar la uniformidad de la dureza.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ o diámetro 10 mm, altura 5 mm).

Condiciones de prueba: modelo de durómetro Rockwell, carga ($10 \text{ kgf} + 50 \text{ kgf} = 60 \text{ kgf}$), tiempo de carga (2-8 s preliminares, 10-15 s totales), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-70%).

Resultados de la prueba: valor de dureza en cada punto, valor medio, desviación estándar y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Rockwell (HRA) de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Dureza (HRA)	Aplicaciones típicas
YG6	6	85-90	brocas para minería
YG8	8	83-88	Herramientas de corte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Dureza (HRA)	Aplicaciones típicas
YT15	5	87-92	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°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

ISO 3878:1983, "Método de ensayo para la dureza Rockwell del carburo cementado (escala HRA)", proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la determinación de la dureza Rockwell del carburo cementado, garantizando la rapidez y comparabilidad de los resultados mediante un durómetro Rockwell. La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento del carburo cementado y proporciona soporte técnico para campos de aplicación como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

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:

ISO 3326:2013 Carburo cementado Método de prueba de dureza Vickers

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la dureza Vickers del carburo cementado, utilizando un durómetro Vickers para aplicar una carga de 10-50 kgf (98,07-490,3 N). Es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase aglutinante, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, NbC, VC). Esta norma se aplica a la evaluación de la resistencia a la indentación del carburo cementado y se utiliza ampliamente en el control de calidad de herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste y otros campos de aplicación.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

ISO 6507-1:2005 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta las normas ISO 3850:2018 e ISO 6507-1:2005 y los siguientes términos y definiciones:

Dureza Vickers (HV): medida de la resistencia a la indentación por unidad de área de la superficie de una muestra después de que el penetrador Vickers se presiona en la superficie de la muestra, expresada en HV (valor de dureza).

Penetrador Vickers: Penetrador de pirámide cuadrangular hecho de diamante con un ángulo de vértice de 136°.

Carga: La fuerza aplicada a la muestra, que varía entre 10 y 50 kgf (98,07 y 490,3 N).

Carburo cementado: Material compuesto elaborado mediante un proceso de pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión.

4. Principio de determinación

La determinación de la dureza Vickers se basa en el durómetro Vickers, que presiona un penetrador de diamante de pirámide cuadrangular contra la superficie de la muestra con una carga específica, mide la longitud diagonal de la indentación y calcula la resistencia a la indentación por unidad de área. El valor de dureza se calcula según la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

HV HV HV es dureza Vickers (kgf / mm²), F F F es la carga aplicada (kgf), d d d es la longitud

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

media de las dos diagonales de la sangría (mm). El resultado suele convertirse a HV10 o HV30, según la carga.

5. Equipo de medición

5.1 Probador de dureza Vickers

Rango de carga: 10-50 kgf (98,07-490,3 N), precisión $\pm 1\%$.

Penetrador: Pirámide cuadrangular de diamante, ángulo del vértice $136^\circ \pm 0,5^\circ$.

Microscopio: aumento 200×-500×, resolución $< 0,001$ mm.

Tiempo de carga: 10-15 s, precisión ± 1 s.

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión de baja velocidad, ancho de corte $< 0,5$ mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.3 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, el tamaño recomendado es $10 \times 10 \times 5$ mm o 10 mm de diámetro y 5 mm de altura.

de óxido y la rugosidad superficial $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es > 20 HV, el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $< 0,1$ mm/s y etanol o agua como refrigerante.

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: Utilice líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$, rugosidad de la superficie R_a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

<0,02 μm .

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibrar la carga del probador de dureza Vickers, desviación <±1%.

El aumento del microscopio y la precisión de la medición diagonal se calibraron con una desviación de <±0,5%.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C, se recomienda 23±2°C.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado 50±10%.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en el banco de trabajo del probador de dureza Vickers y ajuste el nivel de la superficie.

Seleccione la carga: 10 kgf (HV10) o 30 kgf (HV30), dependiendo del espesor y grado de la muestra.

Aplique la carga durante 10-15 s y mida la longitud de las dos diagonales de la sangría después de retirar la carga. d .

Mida al menos 3 posiciones diferentes en la superficie de la muestra, con un intervalo de ≥ 2,5 mm.

Repita el experimento de 5 a 10 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la dureza Vickers de cada muestra:

$$HV = \frac{1.8544F}{d^2}$$

Donde F es la carga (kgf) y d es la longitud diagonal promedio de la sangría (mm).

Calcular el promedio:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Donde HV_i es un valor de medición único y n es el número de mediciones.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Calificación: Desviación media de dureza <±5%, desviación estándar <20 HV.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de dureza

El rango de dureza Vickers del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): 1400-1600 HV30.

YG8 (8% Co): 1300-1500 HV30.

YT15 (5% Co + TiC) : 1500-1700 HV10.

8.2 Evaluación de la desviación

de 5 a 10 puntos de medición es $\leq \pm 5\%$ y la desviación estándar es < 20 HV, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la dureza es inferior a los requisitos técnicos, se deben analizar las razones (como defectos de superficie, carga insuficiente).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,02 \mu\text{m}$ o grietas $> 0,05 \text{ mm}$ pueden reducir la dureza entre un 5% y un 10%.

Selección de carga: Una carga demasiado baja ($< 10 \text{ kgf}$) o demasiado alta ($> 50 \text{ kgf}$) puede generar un error de medición del 3% al 5%.

Condiciones ambientales: La humedad $> 70\%$ o las fluctuaciones de temperatura $> 5^\circ\text{C}$ pueden afectar la claridad de la sangría.

Composición del material: La fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$ o el tamaño de grano de WC $> 2 \mu\text{m}$ pueden afectar la uniformidad de la dureza.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño ($10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$ o diámetro 10 mm , altura 5 mm).

Condiciones de prueba: modelo de probador de dureza Vickers, carga (10 kgf o 30 kgf), tiempo de carga ($10-15 \text{ s}$), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad ($30\%-70\%$).

Resultados de la prueba: valor de dureza en cada punto, valor medio, desviación estándar y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Vickers de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Carga (kgf)	Dureza (HV)	Aplicaciones típicas
YG6	6	30	1400-1600	brocas para minería
YG8	8	30	1300-1500	Herramientas de corte

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Carga (kgf)	Dureza (HV)	Aplicaciones típicas
YT15	5	10	1500-1700	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°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 3326:2013, "Método de ensayo para la dureza Vickers del carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la determinación de la dureza Vickers del carburo cementado, garantizando la precisión y comparabilidad de los resultados mediante el durómetro Vickers. La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento del carburo cementado y proporciona soporte técnico para áreas de aplicación como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

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:

ISO 4489-2:2020
carburo cementado
Método de determinación de la resistencia a la flexión
Parte 2: Condiciones de alta temperatura

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado en condiciones de alta temperatura (por encima de 35 °C), utilizando una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluido el carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , NbC , VC). Como parte de la serie ISO 4489, esta norma complementa el método de prueba a temperatura ambiente de la norma ISO 4489:2010 y es aplicable a la evaluación del rendimiento en entornos de alta temperatura, como aplicaciones aeroespaciales y de herramientas de corte de alta temperatura.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 4489:2010 Método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:2018 y los siguientes términos y definiciones:

Resistencia a la flexión: La tensión máxima que soporta una muestra en una prueba de flexión a alta temperatura, medida en MPa, refleja la capacidad del material para resistir la fractura a altas temperaturas.

Ensayo de flexión de tres puntos: se aplica un solo punto de carga entre dos puntos de apoyo para medir la tensión máxima a la que se rompe la muestra.

Ensayo de flexión de cuatro puntos: se aplican dos puntos de carga entre dos puntos de apoyo para medir la tensión máxima cuando se rompe la muestra.

Condiciones de alta temperatura: La temperatura de prueba es superior a 35 °C, generalmente en el rango de 200 °C a 1200 °C.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4. Principio de determinación

La determinación de la resistencia a la flexión se basa en un ensayo de flexión a alta temperatura, en el que se aplican cargas en tres o cuatro puntos para medir la tensión máxima de rotura de la muestra a alta temperatura. El cálculo de la tensión se basa en la geometría de la muestra y las

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

condiciones de carga mediante la siguiente fórmula:

Flexión en tres puntos:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Donde σ es la resistencia a la flexión (MPa), F es la carga de rotura (N), L es la distancia de soporte (mm), b es el ancho de la muestra (mm) y h es el espesor de la muestra (mm).

Flexión de cuatro puntos:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

Donde L1 es la distancia de soporte externa (mm) y L2 es la distancia de carga interna (mm).

En condiciones de alta temperatura, las propiedades del material (como el punto de rendimiento y la resistencia a la fractura) cambian con la temperatura, y se requiere un horno de alta temperatura para controlar el entorno y corregir los efectos de expansión térmica.

5. Equipo de medición

5.1 Máquina de prueba

Capacidad de carga: 0-50 kN , precisión $\pm 1\%$.

Velocidad de carga: 0,5-5 mm/min, ajustable.

Equipado con sensor de fuerza y sensor de desplazamiento con resolución $< 0,01$ N y $< 0,01$ mm.

5.2 Horno de alta temperatura

Rango de temperatura: 200°C a 1200°C, precisión $\pm 5^\circ\text{C}$.

Velocidad de calentamiento: 5-10°C/min, tiempo de estabilización ≥ 30 min.

Atmósfera protectora: gas inerte (como argón) o entorno de vacío para evitar la oxidación.

5.3 Accesorio

Dispositivo de flexión de tres puntos: radio del punto de apoyo 1-2 mm, radio del punto de carga 1 mm.

Dispositivo de flexión de cuatro puntos: distancia de apoyo exterior de 20 a 40 mm, distancia de carga interior de 10 a 20 mm, radio del punto de apoyo de 1 a 2 mm.

Material del accesorio: aleación resistente a altas temperaturas (como Inconel), temperatura de trabajo $\geq 1200^\circ\text{C}$.

5.4 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte $< 0,5$ mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 200°C a 1200°C (temperatura de prueba), ambiente exterior 10°C a 35°C,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

recomendado $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin entorno de gases corrosivos (excepto atmósfera protectora).

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, tamaño recomendado: $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm (largo $\times$ ancho $\times$ alto), tolerancia $\pm 0,1$ mm.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, rayones o capas de óxido.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 10 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es > 50 MPa, el número de muestras debe aumentarse a 15.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $< 0,1$ mm/s y etanol o agua como refrigerante.

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1$ μm .

Pulido: Utilice líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25$ μm , rugosidad de la superficie $R_a < 0,02$ μm .

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibre la precisión de carga de la máquina de prueba, desviación $< \pm 1\%$.

Calibre la temperatura del horno con un margen de $\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Calibre el accesorio con un error de centrado de $< 0,05$ mm.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura de prueba: 200°C a 1200°C , la temperatura específica se establece según el material y la aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tiempo de calentamiento: Después de calentar a la temperatura objetivo, estabilízelo durante 30 minutos.

Atmósfera protectora: caudal de argón 0,5-1 L/min, o grado de vacío $<10^{-2}$ Pa.

7.3 Operación de prueba

La muestra se coloca en un dispositivo de flexión de tres o cuatro puntos en un horno de alta temperatura con los puntos de apoyo alineados con los puntos de carga.

La temperatura se elevó a la temperatura objetivo y se estabilizó durante 30 minutos antes de comenzar la prueba.

Ajuste la velocidad de carga a $1 \pm 0,5$ mm/min.

Aplicar carga hasta que la muestra se rompa y registrar la carga máxima F F F y desplazamiento de fractura.

Repita el experimento 10 a 15 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Calcule la resistencia a la flexión σ de cada muestra según la fórmula de la Sección 4

Calcular el promedio:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

Donde σ_i es la resistencia a la flexión de una sola muestra y n es el número de muestras.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n - 1}}$$

Juicio de calificación: desviación promedio de la resistencia a la flexión $\leq \pm 5\%$, desviación estándar < 50 MPa.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de resistencia a la flexión

El rango de resistencia a la flexión a alta temperatura del carburo cementado depende del grado y la temperatura:

YG6 (6% Co): 1500-2000 MPa (600°C).

YG8 (8% Co): 1300-1800 MPa (800°C).

YT15 (5% Co + TiC) : 1000-1400 MPa (1000 °C).

8.2 Evaluación de la desviación

de 10 a 15 muestras es $\leq \pm 5\%$ y la desviación estándar es < 50 MPa, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la resistencia a la flexión es inferior a los requisitos técnicos, es necesario analizar las razones (como oxidación y defectos de la muestra).

8.3 Análisis de factores influyentes

Temperatura: Una temperatura > 1000 °C puede provocar que la fase Co se ablande y que la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

resistencia a la flexión disminuya entre un 20 % y un 30 %.

Oxidación: Una atmósfera protectora insuficiente puede provocar la oxidación de la superficie y una disminución del 10%-15% de la resistencia.

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,02 \mu\text{m}$ o grietas $> 0,05 \text{ mm}$ pueden reducir la resistencia entre un 5% y un 10%.

Condiciones de carga: Una velocidad de carga $> 5 \text{ mm/min}$ o una desalineación del accesorio $> 0,1 \text{ mm}$ pueden generar una desviación del 5 % en los resultados.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño (20×6,5×5,25 mm).

Condiciones de prueba: modelo de máquina de prueba, modelo de horno de alta temperatura, tipo de fijación (tres puntos o cuatro puntos), velocidad de carga ($1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$), temperatura de prueba (200 °C a 1200 °C), atmósfera protectora, temperatura ambiente (10 °C a 35 °C), humedad (30 %-70 %).

Resultados de la prueba: resistencia a la flexión, valor medio, desviación estándar y desviación de cada probeta.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de la resistencia a la flexión a alta temperatura de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Temperatura (°C)	a la flexión (MPa)	Aplicaciones típicas
YG6	6	600	1500-2000	Broca de alta temperatura
YG8	8	800	1300-1800	Herramientas de corte de alta temperatura
YT15	5	1000	1000-1400	Herramientas de acabado de alta temperatura

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura de prueba: 200°C a 1200°C, precisión $\pm 5^\circ\text{C}$.

Temperatura ambiente fuera del horno: 10°C a 35°C, se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin entorno de gases corrosivos (excepto atmósfera protectora).

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Resumir

La norma ISO 4489-2:2020, «Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado - Parte 2: Condiciones de alta temperatura», proporciona un procedimiento internacional estandarizado para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

condiciones de alta temperatura, mediante ensayos de flexión en tres o cuatro puntos, garantizando así la precisión y comparabilidad de los resultados. La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento en entornos de alta temperatura y proporciona soporte técnico para la industria aeroespacial, herramientas de corte de alta temperatura y otros campos de aplicación.

apéndice:

ISO 4489:2010 carburo cementado

Método de determinación de la resistencia a la flexión

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado, utilizando una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, y es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluido el carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , NbC , VC). Esta norma se aplica a la evaluación de las propiedades mecánicas del carburo cementado y se utiliza ampliamente en herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste y otros campos de aplicación.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:2018 y los siguientes términos y definiciones:

Resistencia a la flexión: La tensión máxima que soporta una muestra en una prueba de flexión, medida en MPa, refleja la capacidad del material para resistir la fractura.

Ensayo de flexión de tres puntos: se aplica un solo punto de carga entre dos puntos de apoyo para medir la tensión máxima a la que se rompe la muestra.

Ensayo de flexión de cuatro puntos: se aplican dos puntos de carga entre dos puntos de apoyo para medir la tensión máxima cuando se rompe la muestra.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4. Principio de determinación

La determinación de la resistencia a la flexión se basa en un ensayo de flexión, aplicando una carga concentrada (método de tres puntos) o una carga uniformemente distribuida (método de cuatro puntos) a la muestra y midiendo la tensión máxima en el momento de la fractura. El cálculo de la tensión se basa en la geometría de la muestra y las condiciones de carga mediante la siguiente fórmula:

Flexión en tres puntos:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Donde σ es la resistencia a la flexión (MPa), F es la carga de rotura (N), L es la distancia de soporte (mm), b es el ancho de la muestra (mm) y h es el espesor de la muestra (mm).

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

Flexión de cuatro puntos:

$$\sigma = \frac{3F(L_1 - L_2)}{bh^2}$$

Donde L1 es la distancia de soporte externa (mm) y L2 es la distancia de carga interna (mm).

5. Equipo de medición

5.1 Máquina de prueba

Capacidad de carga: 0-50 kN , precisión ±1%.

Velocidad de carga: 0,5-5 mm/min, ajustable.

Equipado con sensor de fuerza y sensor de desplazamiento con resolución <0,01 N y <0,01 mm.

5.2 Accesorio

Dispositivo de flexión de tres puntos: radio del punto de apoyo 1-2 mm, radio del punto de carga 1 mm.

Dispositivo de flexión de cuatro puntos: distancia de apoyo exterior de 20 a 40 mm, distancia de carga interior de 10 a 20 mm, radio del punto de apoyo de 1 a 2 mm.

Material de la abrazadera: acero endurecido, dureza>HRC 60.

5.3 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte <0,5 mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 23±2°C.

Humedad: 30%-70%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, tamaño recomendado: 20×6,5×5,25 mm (largo×ancho×alto), tolerancia ±0,1 mm.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, rayones o capas de óxido.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 10 para garantizar la representatividad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estadística.

Si la desviación estándar de los resultados es >50 MPa, el número de muestras debe aumentarse a 15.

6.3 Corte y pulido de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de <0,1 mm/s y etanol o agua como refrigerante.

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: Utilice líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$, rugosidad de la superficie $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.4 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibre la precisión de carga de la máquina de prueba, desviación $\leq \pm 1\%$.

Calibre el accesorio con un error de centrado de $< 0,05 \text{ mm}$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en un dispositivo de flexión de tres o cuatro puntos con los puntos de apoyo alineados con los puntos de carga.

Ajuste la velocidad de carga a $1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$.

Aplique carga hasta que la muestra se rompa y registre la carga máxima F y el desplazamiento de la fractura.

Repita el experimento 10 a 15 veces y registre cada conjunto de datos.

7.4 Cálculo de resultados

Calcule la resistencia a la flexión σ de cada muestra según la fórmula de la Sección 4.

Calcular el promedio:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum \sigma_i}{n}$$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Donde σ_i es la resistencia a la flexión de una sola muestra y n es el número de muestras.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1}}$$

Juicio de calificación: desviación promedio de la resistencia a la flexión $< \pm 5\%$, desviación estándar < 50 MPa.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de resistencia a la flexión

El rango de resistencia a la flexión del carburo cementado depende del grado:

YG6 (6% Co): 2000-2500 MPa.

YG8 (8% Co): 1800-2200 MPa.

YT15 (5% Co + TiC) : 1300-1600 MPa.

8.2 Evaluación de la desviación

de 10 a 15 muestras es $< \pm 5\%$ y la desviación estándar es < 50 MPa, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la resistencia a la flexión es inferior a los requisitos técnicos, se deben analizar las razones (como defectos de la muestra y carga desigual).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Una rugosidad superficial $> 0,02 \mu\text{m}$ o grietas $> 0,05 \text{ mm}$ pueden reducir la resistencia a la flexión entre un 10 % y un 15 %.

Condiciones de carga: Una velocidad de carga $> 5 \text{ mm/min}$ o una desalineación del accesorio $> 0,1 \text{ mm}$ pueden provocar una desviación del 5% al 10% en los resultados.

Composición del material: La fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$ o el tamaño del grano de WC $> 2 \mu\text{m}$ pueden afectar la uniformidad de la resistencia.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño (20×6,5×5,25 mm).

Condiciones de prueba: modelo de máquina de prueba, tipo de fijación (tres puntos o cuatro puntos), velocidad de carga ($1 \pm 0,5 \text{ mm/min}$), temperatura ambiente (10 °C a 35 °C), humedad (30 %-70 %).

Resultados de la prueba: resistencia a la flexión, valor medio, desviación estándar y desviación de cada probeta.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de la resistencia a la flexión de carburos cementados típicos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Contenido de CO (% en peso)	a la flexión (MPa)	Aplicaciones típicas
YG6	6	2000-2500	brocas para minería
YG8	8	1800-2200	Herramientas de corte
YT15	5	1300-1600	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°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 4489:2010, «Determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado», proporciona un procedimiento internacional estandarizado para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado mediante ensayos de flexión en tres o cuatro puntos, garantizando así la precisión y comparabilidad de los resultados. La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento del carburo cementado y proporciona soporte técnico para campos de aplicación como herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

apéndice:

ISO 4499-3:2016 Carburo cementado

— Inspección de microestructura

Parte 3: Evaluación de la porosidad, inclusiones, carbono libre y fase eta

1 Alcance

Esta norma especifica el método de evaluación de defectos como poros, inclusiones, carbono libre y fase η en la microestructura del carburo cementado, y utiliza la observación con microscopio metalográfico y un atlas estándar para la clasificación. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, NbC, VC). Esta norma forma parte de la serie de normas ISO 4499 y debe utilizarse junto con la norma ISO 4499-1:2006.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 1: Guía general

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:2018 (última versión) y los siguientes términos y definiciones:

Porosidad: Poros o espacios en una microestructura, divididos en Tipo A (diámetro $<10\ \mu\text{m}$) y Tipo B (diámetro $10\text{--}25\ \mu\text{m}$).

Inclusiones: Impurezas no metálicas (como óxidos y sulfuros) que existen en el carburo cementado en forma de partículas.

Carbono libre: Carbono que no forma compuestos con metales y existe en forma de grafito.

Fase η : Una fase frágil formada debido a un contenido insuficiente de carbono, como $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ o $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4 Principios de evaluación

La evaluación de los defectos de la microestructura del carburo cementado se basa en la observación con microscopio metalográfico, combinada con un atlas estándar (Apéndice A) para clasificar el tipo, tamaño, cantidad y distribución de poros, inclusiones, carbono libre y fase η . El método de evaluación consiste en preparar muestras de alta calidad, observarlas en campo claro y luz polarizada, registrar las características del defecto y compararlas con el atlas estándar para determinar su grado.

5. Equipo de evaluación

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

5.1 Microscopio metalográfico

Aumento: se recomienda 100×, 200×, 500×, 200× para observación de rutina.

Equipado con capacidades de campo claro, campo oscuro y luz polarizada para diferenciar tipos de defectos.

Resolución: $< 0,5 \mu\text{m}$.

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte $< 0,5 \text{ mm}$, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina de montaje: montaje en prensa caliente, temperatura $< 150^\circ\text{C}$, presión 20-30 MPa.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, utilizado para limpiar muestras.

5.3 Herramientas de medición

Micrómetro ocular: valor de graduación 0,01 mm, precisión $\pm 0,001 \text{ mm}$.

de área y cantidad de defectos, con una precisión de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, tamaño recomendado: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, rayones o capas de óxido.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande (> 1 nivel), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Corte y montaje de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $< 0,1 \text{ mm/s}$ y etanol o agua como refrigerante.

Montaje en prensa caliente, temperatura $< 150^\circ\text{C}$, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min.

6.4 Esmerilado y pulido de probetas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $Ra < 0,1 \mu m$.

Pulido: utilice pasta de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu m$, velocidad del paño de pulido 300 r/min, rugosidad de la superficie $Ra < 0,02 \mu m$.

6.5 Limpieza y grabado de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, utilice el reactivo Murakumi ($10 g K_3 [Fe(CN)_6] + 10 g KOH + 100 mL H_2O$) para grabar suavemente durante 5 a 10 s para mejorar el contraste del defecto.

Lavar y secar nuevamente y guardar en secadora.

7 pasos de evaluación

7.1 Calibración del equipo

Calibre el aumento del microscopio metalográfico con una desviación de $\leq \pm 1\%$.

Calibre el sistema de iluminación para garantizar una fuente de luz uniforme sin diferencias de color.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^\circ C$ a $35^\circ C$, se recomienda $20 \pm 2^\circ C$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Observación microscópica

Coloque la muestra en la platina del microscopio metalográfico, ajuste el enfoque y seleccione un aumento de $200\times$.

Observe la superficie de la muestra en al menos 5 campos de visión con un área de campo de aproximadamente $0,5 mm^2$.

Se utilizó campo brillante para observar poros e inclusiones, y se utilizó luz polarizada para observar el carbono libre y la fase η .

7.4 Evaluación de defectos

Evaluación de la porosidad:

($< 10 \mu m$)

A00 (sin poros), A02 (< 10 piezas/ mm^2), A04 ($10-20$ piezas/ mm^2), A06 ($20-30$ piezas/ mm^2), A08 (> 30 piezas/ mm^2).

B ($10-25 \mu m$)

B00 (sin poros), B02 (< 5 piezas/ mm^2), B04 ($5-10$ piezas/ mm^2), B06 ($10-15$ piezas/ mm^2), B08 (> 15 piezas/ mm^2).

Evaluación de inclusión

(sin inclusiones), I02 (< 5 piezas/ mm^2 , $< 10 \mu m$), I04 ($5-10$ piezas/ mm^2 , $10-20 \mu m$), I06 (> 10 piezas/ mm^2 , $> 20 \mu m$).

Evaluación gratuita de carbono

C00 (sin carbono libre), C02 ($< 0,5\%$), C04 ($0,5\%-1,0\%$), C06 ($1,0\%-1,5\%$), C08 ($> 1,5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Evaluación de la fase η

eta00 (sin fase eta), eta02 ($<0,5\%$), eta04 ($0,5\%-1,0\%$), eta06 ($1,0\%-1,5\%$), eta08 ($>1,5\%$).

7.5 Cálculo del resultado

Registre los niveles de defecto de 5 campos de visión, calcule el valor promedio y determine el nivel de defecto final de la muestra.

Evaluación de la desviación: La desviación estándar de los 5 campos visuales es $<\pm 1$ nivel, de lo contrario se requiere una nueva observación.

8 Evaluación de los resultados de la evaluación

8.1 Rango de grado de defecto

El nivel de defectos del carburo cementado depende del grado y el propósito:

YG6 (6% Co): A02-B02-I02-C02- η 02, adecuado para brocas de minería.

YG8 (8% Co): A04-B04-I02-C04- η 02, adecuado para herramientas de corte.

YT15 (5% Co + TiC) : A02-B02-I04-C02- η 04, adecuado para herramientas de acabado.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $<\pm 1$ nivel, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el nivel de defecto excede los requisitos técnicos, se debe analizar la causa (como un proceso de sinterización anormal).

8.3 Análisis de factores influyentes

Porosidad: Un vacío de sinterización insuficiente (<10 Pa) o una velocidad de enfriamiento excesiva (>50 °C/min) conducen a un aumento de la porosidad ($>A04$).

Inclusiones: La baja pureza de la materia prima (impurezas $>0,1\%$) o una mezcla desigual provocan un aumento de inclusiones ($>I04$).

Carbono libre: Un contenido excesivo de carbono ($>0,2\%$) o una distribución desigual conducen a un aumento del carbono libre ($>C04$).

Fase η : Un contenido de carbono insuficiente ($<0,1\%$) o una temperatura de sinterización elevada (>1450 °C) conducen a la formación de la fase η ($>\eta 04$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, aumento ($200\times$), método de observación, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad ($30\%-70\%$).

Resultados de la prueba: grado del defecto (A, B, I, C, η), valor medio y desviación para cada campo de visión.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

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 A (Apéndice normativo) Atlas estándar de defectos

Poros tipo A: A00-A08, el espectro muestra la distribución de poros con un diámetro de $< 10 \mu\text{m}$.
Poros tipo B: B00-B08, el espectro muestra la distribución de poros con un diámetro de $10\text{-}25 \mu\text{m}$.
Inclusiones: I00-I06, la gráfica muestra el tamaño y cantidad de inclusiones.
Carbono libre: C00-C08, el gráfico muestra el porcentaje de área de carbono libre.
Fase η : $\eta 00\text{-}\eta 08$, el espectro muestra la relación del área de la fase η .

Apéndice B (Apéndice informativo) Valores de referencia de los niveles típicos de defectos de carburo cementado

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Nivel de defecto	Aplicaciones típicas
YG6	6	A02-B02-I02-C02- $\eta 02$	brocas para minería
YG8	8	A04-B04-I02-C04- $\eta 02$	Herramientas de corte
YT15	5	A02-B02-I04-C02- $\eta 04$	Herramientas de acabado

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.
Humedad: 30%-70%, $50\pm 10\%$ recomendado.
Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.
Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Resumir

La norma ISO 4499-3:2016 "Carburo Cementado - Examen de Microestructura Parte 3: Evaluación de Porosidad, Inclusiones, Carbono Libre y Fase η " proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la evaluación de defectos de microestructura en carburo cementado, garantizando la precisión y comparabilidad de los resultados mediante la observación con microscopio metalográfico y la clasificación atlas estándar. La implementación de esta norma facilita el control de calidad del carburo cementado y proporciona soporte técnico para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

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:

ISO 4499-2:2008 Carburo cementado

— Inspección de microestructura

Parte 2: Métodos para la determinación del tamaño de grano

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar el tamaño de grano del carburo de tungsteno (WC) en microestructuras de carburo cementado, utilizando un microscopio metalográfico combinado con un método de sección lineal o un método de sección planificada. Esta norma se aplica a los carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace, incluyendo carburos cementados con otros carburos (como TaC , TiC , NbC) . Esta norma no se aplica a carburos cementados sin base de cobalto ni a otros materiales de carburo no cementado.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 1: Guía general

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

ISO 3850:1983 Terminología del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:1983 y los siguientes términos y definiciones:

Tamaño de grano: El diámetro promedio de los granos de carburo de tungsteno (WC) en carburo cementado, generalmente medido en micrones (μm) .

Método de sección transversal lineal: el tamaño de grano promedio se calcula midiendo el diámetro de la sección transversal de los granos de WC en una línea recta en el campo de visión del microscopio.

Método de sección planificada: el tamaño de grano promedio se calcula midiendo el área de la sección transversal de múltiples granos de WC en el campo de visión del microscopio.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4. Principio de determinación

La determinación del tamaño de grano del carburo de tungsteno (WC) se basa en la observación microscópica metalográfica, combinada con el método de sección lineal o el método de sección planificada. El método de sección lineal mide el diámetro de la sección transversal de los granos en una línea recta en el campo de visión del microscopio y calcula el valor promedio estadísticamente; el método de sección planificada mide el área de la sección transversal de los granos y estima el tamaño promedio de grano en combinación con un modelo geométrico. Ambos métodos requieren la preparación de muestras de alta calidad para garantizar que la superficie sea plana y libre de contaminación, de acuerdo con las directrices generales de la norma ISO 4499-

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

1:2006.

5. Equipo de medición

5.1 Microscopio metalográfico

Aumento: se recomienda 200×, 500×, 1000×, 500× para determinar el tamaño del grano.

Equipado con luz polarizada y capacidades de contraste de interferencia diferencial (DIC) para distinguir los límites de grano de WC.

Resolución: < 0,2 μm .

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte <0,5 mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina de montaje: montaje en prensa caliente, temperatura <150°C, presión 20-30 MPa.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, utilizado para limpiar muestras.

5.3 Herramientas de medición

Micrómetro de ocular de microscopio: valor de graduación 0,01 mm, precisión ±0,001 mm.

de análisis de imágenes: admite el reconocimiento de límites de grano y el cálculo del área con una precisión de ±0,1 μm .

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±2°C.

Humedad: 30%-70%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, tamaño recomendado: 10×10× 5 mm.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, rayones o capas de óxido.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

del resultado es grande (>0,5 μm) , el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Corte y montaje de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con un

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

ancho de corte de <0,5 mm y etanol o agua como refrigerante.

Montaje en prensa caliente, temperatura <150°C, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min.

6.4 Esmerilado y pulido de probetas

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: utilice pasta de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$, velocidad del paño de pulido 300 r/min, rugosidad de la superficie $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

6.5 Limpieza y grabado de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, la superficie se grabó ligeramente utilizando reactivo Murakumi (10 g $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ + 10 g KOH + 100 mL H_2O) durante 5 a 10 s para mejorar el contraste de los límites de grano de WC.

Lavar y secar, conservar en desecador.

7 pasos de medición

7.1 Calibración del equipo

Calibre el aumento del microscopio metalográfico con una desviación de $\leq \pm 1\%$.

Calibre el micrómetro del ocular o el software de análisis de imágenes con una precisión de $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Determinación del tamaño del grano

Método de sección lineal:

Dibuje de 3 a 5 líneas rectas paralelas en el campo de visión del microscopio con una longitud total de $\geq 500 \mu\text{m}$.

Se midió el diámetro de la sección transversal de los granos de WC en cada línea recta y se contaron entre 100 y 200 granos.

Calcular el tamaño medio de grano:

$$d = \frac{\sum d_i}{n}$$

Donde d_i es el diámetro de un solo grano y n es el número de granos.

Método de sección transversal planificada:

Se seleccionaron cinco áreas al azar en el campo de visión del microscopio y se midieron áreas de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sección transversal de 100 a 200 granos.

Utilice un software de análisis de imágenes para calcular el área promedio y convertirla en diámetro equivalente:

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$$

Entre ellos A A A es el área de la sección transversal del grano.

de grano promedio de cada muestra se registró con una desviación de $\leq \pm 0,2 \mu\text{m}$.

7.4 Cálculo de resultados

Tome el tamaño de grano promedio de 3 a 5 muestras y calcule la desviación estándar:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1}}$$

Juicio de calificación: desviación promedio del tamaño de grano $\leq \pm 0,5 \mu\text{m}$, desviación estándar $< 0,3 \mu\text{m}$.

8 Evaluación de los resultados de la medición

8.1 Rango de tamaño de grano

El rango de tamaño de grano de carburo cementado WC depende del grado:

YG6 (6% Co): 0,8-1,2 μm , adecuado para herramientas de alta tenacidad.

YG8 (8% Co): 1,0-1,5 μm , adecuado para corte.

YT15 (5% Co + TiC): 0,6-1,0 μm , adecuado para herramientas de acabado.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $\leq \pm 0,5 \mu\text{m}$; de lo contrario, es necesario volver a realizar la prueba.

Si el tamaño del grano excede los requisitos técnicos, se deben analizar las razones (como tamaño desigual de partículas de materia prima, temperatura de sinterización excesiva).

8.3 Análisis de factores influyentes

Tamaño de partícula de la materia prima: un tamaño de partícula de materia prima WC $> 2 \mu\text{m}$ puede resultar en un tamaño de grano más grande ($> 1,5 \mu\text{m}$).

Temperatura de sinterización: Una temperatura $> 1450^\circ\text{C}$ o un tiempo de mantenimiento $> 1 \text{ h}$ pueden provocar un crecimiento del grano ($> 0,5 \mu\text{m}$).

de enfriamiento $< 20^\circ\text{C}/\text{min}$ pueden provocar un engrosamiento del grano ($> 0,3 \mu\text{m}$).

Contenido de Co: La fluctuación del contenido de Co $> \pm 0,5\%$ puede afectar la uniformidad del crecimiento del grano.

Informe de prueba 9

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de prueba: modelo del equipo, aumento (500×), método de medición (lineal o planificado), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-70%).

Resultados de la prueba: tamaño de grano, media, desviación estándar y variación para cada muestra.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de tamaños de grano de carburo cementado típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Aplicaciones típicas
YG6	6	0,8-1,2	brocas para minería
YG8	8	1.0-1.5	Herramientas de corte
YT15	5	0,6-1,0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±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 4499-2:2008 "Examen de microestructura de carburo cementado, parte 2: Método de determinación del tamaño de grano" proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la determinación del tamaño de grano de carburo cementado (WC) y garantiza la precisión y comparabilidad de los resultados de las mediciones mediante el método de sección lineal o el método de sección planificada. La implementación de esta norma contribuye a optimizar el rendimiento de los materiales de carburo cementado y proporciona soporte técnico para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Inspección de microestructura Parte 1: Directrices generales

1 Alcance

Esta norma proporciona directrices generales para la inspección microestructural del carburo cementado, incluyendo los principios básicos de preparación de muestras, métodos de observación microscópica y evaluación de defectos. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, NbC). Esta norma constituye la base de la serie de normas ISO 4499, y los métodos de medición detallados (como el tamaño del grano y la evaluación de defectos) se especifican en partes posteriores (como la ISO 4499-2).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

ISO 3850:1983 Terminología del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:1983 y los siguientes términos y definiciones:

Microestructura: La microestructura del carburo cementado bajo observación ampliada, incluidos los granos de WC, la fase de enlace de Co y los defectos.

Defectos: Características anormales en la microestructura como poros, inclusiones, carbono libre y fase eta.

Muestra metalográfica: Muestra de carburo cementado preparada para observación microscópica mediante corte, esmerilado, pulido y grabado.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4 Principio de inspección

La inspección microestructural del carburo cementado se basa en la observación microscópica metalográfica, combinada con la preparación de muestras y la tecnología de grabado adecuada para revelar la distribución y morfología de los granos de WC, las fases de Co y los defectos. El proceso de inspección incluye la preparación de muestras, la observación microscópica y el registro de resultados, siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados. Métodos específicos, como la evaluación de defectos y la determinación del tamaño de grano, se detallan en normas posteriores.

5. Equipo de inspección

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

5.1 Microscopio metalográfico

Aumento: se recomienda 50×, 100×, 200×, 500×, 200× para observación de rutina.

Equipado con capacidades de campo claro, campo oscuro y luz polarizada para distinguir diferentes fases y defectos.

Resolución: < 0,5 μm .

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión a baja velocidad, ancho de corte <0,5 mm, equipada con sistema de refrigeración.

Máquina de montaje: montaje en prensa caliente, temperatura <150°C, presión 20-30 MPa.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, utilizado para limpiar muestras.

5.3 Herramientas de medición

Calibrador Vernier: precisión ±0,02 mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Micrómetro ocular: valor de graduación 0,01 mm, precisión ±0,001 mm.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±2°C.

Humedad: 30%-70%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, tamaño recomendado: 10×10× 5 mm.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas, rayones o capas de óxido.

Las muestras se prepararán de acuerdo con la norma ISO 3847:2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si los resultados presentan grandes desviaciones, es necesario aumentar el número de muestras a 5.

6.3 Corte y montaje de muestras

Las muestras se cortaron utilizando un cortador de precisión de baja velocidad con un ancho de corte de <0,5 mm y etanol o agua como refrigerante.

Montaje en prensa caliente, temperatura <150°C, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min.

6.4 Esmerilado y pulido de probetas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $Ra < 0,1 \mu m$.

Pulido: utilice pasta de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu m$, velocidad del paño de pulido 300 r/min, rugosidad de la superficie $Ra < 0,02 \mu m$.

6.5 Limpieza y grabado de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, la superficie se grabó ligeramente utilizando reactivo Murakumi ($10 g K_3 [Fe(CN)_6] + 10 g KOH + 100 mL H_2O$) durante 5 a 10 s para mejorar los granos de WC y el contraste de fases.

Lavar y secar nuevamente y guardar en secadora.

7 pasos de inspección

7.1 Calibración del equipo

Calibre el aumento del microscopio metalográfico con una desviación de $< \pm 1\%$.

Calibre el sistema de iluminación para garantizar una fuente de luz uniforme sin diferencias de color.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^\circ C$ a $35^\circ C$, se recomienda $20 \pm 2^\circ C$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Observación microscópica

Coloque la muestra en la platina del microscopio metalográfico, ajuste el enfoque y seleccione un aumento de $200\times$.

Observe la superficie de la muestra en al menos 5 campos de visión con un área de campo de aproximadamente $0,5 mm^2$.

Se utilizó un campo brillante para observar los granos de WC y la fase Co, y se utilizó luz polarizada para observar defectos (como el carbono libre).

7.4 Registro de resultados

Se registraron las características microestructurales de cada campo de visión, incluido el tamaño de grano de WC, la distribución de la fase Co y los tipos de defectos.

Tomar microfotografías (resolución $\geq 5 MP$) para su posterior análisis y elaboración de informe.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de características microestructurales

Tamaño de grano WC: $0,5-2,0 \mu m$ (dependiendo del grado).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido de fase co: 5%-15% (porcentaje en peso).

Defectos: Los niveles de poros, inclusiones, carbono libre y fase η deben cumplir los requisitos técnicos (consulte ISO 4499-2).

8.2 Evaluación de la desviación

La desviación de consistencia de las características microestructurales de los 5 campos de visión fue $\leq \pm 10\%$, de lo contrario se requirió una nueva observación.

Si la microestructura excede los requisitos técnicos, se deben analizar las razones (como parámetros anormales del proceso de sinterización).

8.3 Análisis de factores influyentes

Preparación de la muestra: Un pulido insuficiente ($R_a > 0,1 \mu m$) o un grabado excesivo pueden enmascarar defectos.

Condiciones de observación: Una fuente de luz desigual o un aumento inadecuado pueden provocar que los límites del grano se vean borrosos.

Composición del material: Las fluctuaciones del contenido de Co $> \pm 0,5 \%$ o un contenido de carbono no controlado pueden afectar la microestructura.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, aumento ($200\times$), método de observación, temperatura ambiente ($10^\circ C$ a $35^\circ C$), humedad (30% - 70%).

Resultados de pruebas: caracterización microestructural, registros fotográficos y observaciones preliminares de defectos.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos preliminares.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de las características de microestructura de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de grano de WC (μm)	Aplicaciones típicas
YG6	6	0,8-1,2	brocas para minería
YG8	8	1.0-1.5	Herramientas de corte
YT15	5	0,6-1,0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: $10^\circ C$ a $35^\circ C$, se recomienda $20 \pm 2^\circ C$.

Humedad: 30% - 70% , $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 mm/m$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resumir

La norma ISO 4499-1:2006 "Inspección de la microestructura del carburo cementado - Parte 1: Directrices generales" proporciona un marco internacional para la inspección de la microestructura del carburo cementado, garantizando la reproducibilidad y comparabilidad de los resultados mediante métodos estandarizados de preparación y observación de muestras. La implementación de esta norma sienta las bases para mediciones específicas posteriores (como el tamaño del grano y la evaluación de defectos) y facilita la optimización del rendimiento y el control de calidad 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

apéndice:

ISO 3847:2005 Carburo cementado Método de preparación de muestras

1 Alcance

Esta norma especifica el método de preparación de muestras de carburo cementado, incluyendo el corte, la incrustación, el rectificado, el pulido y la limpieza, y es adecuada para ensayos de rendimiento posteriores (como la resistencia a la flexión y la dureza) o la inspección de la microestructura. Esta norma es aplicable a carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, incluyendo carburos cementados con otros carburos (como TaC, TiC, NbC). Esta norma no se aplica a carburos cementados sin base de cobalto ni a otros materiales de carburo no cementado.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, la versión aplicable es la de esa fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplicará la última versión (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3850:1983 Terminología del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3850:1983 y los siguientes términos y definiciones:

Probeta de prueba: Una muestra de carburo cementado preparada mediante corte y mecanizado para pruebas de rendimiento u observación microscópica.

Montaje: Incrustar la muestra en resina o material metálico para facilitar su posterior esmerilado, pulido y observación.

Esmerilado y pulido: Eliminar los defectos superficiales de la muestra mediante esmerilado y pulido para obtener una superficie lisa.

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4 Principio de preparación

La preparación de muestras de carburo cementado tiene como objetivo obtener una superficie plana y sin daños, apta para ensayos posteriores o para la observación microscópica. El proceso de preparación incluye el corte de la muestra al tamaño adecuado, el montaje para proteger los bordes, el rectificado y pulido para eliminar defectos superficiales y la limpieza para eliminar residuos. El método de preparación debe garantizar que la muestra no sufra cambios microestructurales debido a tensiones térmicas o mecánicas.

5. Equipo de preparación

5.1 Equipo de corte

Máquina de corte de precisión de baja velocidad: ancho de corte < 0,5 mm, equipada con sistema

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

de refrigeración (como agua o etanol).

Rueda de corte: tamaño de partícula 120-240#, espesor 0,5-1,0 mm.

5.2 Equipo de montaje

Máquina de montaje en prensa caliente: temperatura $<150^{\circ}\text{C}$, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min.

Materiales de incrustación de resina o metal: resinas termoplásticas (como resinas fenólicas) o metales de bajo punto de fusión (como aleaciones de estaño y plomo).

5.3 Equipos de rectificado y pulido

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante de 600#, 1200#, 2500# y paño de pulido.

Líquido de pulido: suspensión de alúmina de $0,25\text{ }\mu\text{m}$ o pasta de pulido de diamante de $1\text{ }\mu\text{m}$.

5.4 Equipo de limpieza

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, potencia 100-200 W.

Agente de limpieza: etanol anhidro o acetona.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50\pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, el tamaño recomendado es $10\times 10\times 5\text{ mm}$ o 10 mm de diámetro y 5 mm de altura.

No debe haber grietas evidentes, quemaduras o capas de óxido en la superficie de la muestra.

Las muestras de ensayo deben ser representativas de la homogeneidad del lote de material.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si las pruebas posteriores requieren una mayor precisión, el número debe aumentarse a 5.

6.3 Corte de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con una velocidad de corte de $<0,1\text{ mm/s}$ y etanol o agua como refrigerante.

La dirección de corte es perpendicular a la superficie de laminación del material y el ancho de corte es $<0,5\text{ mm}$.

6.4 Montaje de la muestra

La muestra se coloca en un molde de incrustación y se agrega resina termoplástica o un metal de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

bajo punto de fusión.

Montaje en prensa caliente, temperatura $<150^{\circ}\text{C}$, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min, asegúrese de que el borde de la muestra esté intacto.

6.5 Esmerilado y pulido de probetas

Rectificado basto: utilice papel de lija de diamante de 600 o 1200 lb para eliminar gradualmente las marcas de corte y aplique una presión de 5 a 10 N.

Lijado fino: utilice papel de lija de 2500 lb, rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m}$.

Pulido: utilice líquido de pulido de alúmina de $0,25 \mu\text{m}$, velocidad del paño de pulido 300 r/min, rugosidad de la superficie $R_a < 0,02 \mu\text{m}$, tiempo de pulido 5-10 min.

6.6 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de preparación

7.1 Calibración del equipo

Calibre la velocidad de la máquina de corte, la desviación es $<\pm 5\%$.

Calibre la velocidad y la presión de la máquina rectificadora y pulidora, con una desviación de $<\pm 2\%$.

Verificar la temperatura y presión de la máquina de montaje, desviación $<\pm 1^{\circ}\text{C}$ y $\pm 1 \text{ MPa}$.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20\pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-70%, recomendado $50\pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Proceso de operación

Complete el corte, montaje, esmerilado, pulido y limpieza de la muestra en el orden de las Secciones 6.3 a 6.6.

Después de cada paso, verifique la calidad de la superficie de la muestra y registre cualquier anomalía (como grietas o quemaduras).

7.4 Comprobación de resultados

Rugosidad superficial: $R_a < 0,02 \mu\text{m}$.

Planitud de la superficie: Desviación $< 0,01 \text{ mm}$.

Sin rayones ni contaminación visibles.

8 Evaluación de los resultados de la preparación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Rango de calidad de la superficie

No debe haber grietas, quemaduras o capas de óxido visibles en la superficie de la muestra.

Rugosidad $Ra < 0,02 \mu m$, desviación de planitud $< 0,01 mm$.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $\pm 10\%$, de lo contrario se requiere una nueva preparación.

Si la calidad de la superficie no cumple con los requisitos, se deben analizar las razones (por ejemplo, la velocidad de corte es demasiado alta o el tiempo de pulido es insuficiente).

8.3 Análisis de factores influyentes

Corte: Velocidades de corte $> 0,1 mm/s$ o refrigeración insuficiente pueden provocar grietas ($> 0,05 mm$).

Montaje: Temperaturas $> 150^\circ C$ o presiones $< 20 MPa$ pueden provocar deformación de la muestra ($> 0,1 mm$).

de lija con grano demasiado grueso ($< 600\#$) o un tiempo de pulido $< 5 min$ puede generar rugosidad en la superficie ($Ra > 0,1 \mu m$).

Limpieza: Los residuos de agente de limpieza o un secado insuficiente pueden provocar contaminación (partículas visibles $> 0,01 mm$).

9. Preparar informe

El informe debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: marca, número de lote, tamaño inicial.

Condiciones de preparación: modelo del equipo, velocidad de corte ($< 0,1 mm/s$), temperatura de montaje ($< 150^\circ C$), parámetros de esmerilado y pulido, temperatura ambiente ($10^\circ C$ a $35^\circ C$), humedad (30%-70%).

Resultados de la preparación: rugosidad de la superficie ($Ra < 0,02 \mu m$), desviación de planitud ($< 0,01 mm$), registros anormales.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos de las pruebas posteriores.

Fecha de preparación y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de los parámetros típicos de preparación de muestras de carburo cementado

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de la muestra (mm)	Ra , μm	Aplicaciones típicas
YG6	6	10×10×5	$< 0,02$	brocas para minería
YG8	8	10×10×5	$< 0,02$	Herramientas de corte
YT15	5	10×10×5	$< 0,02$	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: $10^\circ C$ a $35^\circ C$, se recomienda $20 \pm 2^\circ C$.

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

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 3847:2005, "Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la preparación de muestras de carburo cementado. Mediante pasos estandarizados de corte, montaje, rectificado, pulido y limpieza, se garantiza que la calidad superficial de la muestra cumpla con los requisitos de las pruebas de rendimiento o la inspección microestructural posteriores. La implementación de esta norma proporciona una base técnica fiable para la evaluación del rendimiento y el control de calidad de los materiales 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

apéndice:

ISO 3850:2018 Carburo cementado el término

1 Alcance

Esta norma define los términos y definiciones del carburo cementado y materiales relacionados, abarcando la composición del material, el proceso de preparación, la microestructura, las pruebas de rendimiento y las áreas de aplicación. Esta norma se aplica al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe) como fase de enlace, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , NbC , VC). Esta norma constituye la base de las series de normalización del carburo cementado (como ISO 4499 e ISO 3847) y es adecuada para el comercio internacional, la investigación y las aplicaciones industriales.

2 Referencias normativas

Esta norma no hace referencia directa a otras normas, pero como parte de la serie de estandarización de carburo cementado, está relacionada con las siguientes normas:

ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 1: Guía general

ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado

Nota: Las últimas versiones de los documentos referenciados (incluidas todas las modificaciones) se aplican a esta norma.

3 Términos y definiciones

Los siguientes son términos relacionados con el carburo definidos en ISO 3850:2018, categorizados por categoría:

3.1 Composición del material

3.1.1 Fase dura

Carburo de tungsteno (WC): El carburo, el principal componente duro del carburo cementado, tiene la fórmula química WC y posee alta dureza y resistencia al desgaste.

Otros carburos, como el carburo de tantalio (TaC), el carburo de titanio (TiC), el carburo de niobio (NbC) y el carburo de vanadio (VC), se utilizan como componentes auxiliares de la fase dura.

3.1.2 Fase de unión

Cobalto (Co): Un metal de unión común en el carburo cementado, con un contenido de fase de generalmente 5%-15% (en peso), que proporciona tenacidad y resistencia de unión.

Níquel (Ni): Como metal que reemplaza la fase de enlace, es adecuado para entornos resistentes a la corrosión.

Hierro (Fe): Un componente de la fase enlazante presente en pequeñas cantidades y a menudo utilizado como elemento de aleación.

3.1.3 Impurezas

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

Carbono libre: Carbono que no forma compuestos con metales y existe en forma de grafito.

Fase η : Una fase frágil formada debido a un contenido insuficiente de carbono, como W_3Co_3C o Co_6W_6C .

3.2 Proceso de preparación

3.2.1 Metalurgia de polvos

El proceso de fabricación del carburo cementado se prepara mezclando, prensando y sinterizando polvos.

3.2.2 Sinterización

El proceso de combinación de partículas de polvo a alta temperatura ($1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$) se puede dividir en sinterización al vacío y sinterización a baja temperatura.

3.2.3 Prensado isostático en caliente (HIP)

Proceso de tratamiento posterior para eliminar la porosidad a alta temperatura y presión.

3.3 Microestructura

3.3.1 Grano

Las partículas microscópicas de WC en carburo cementado suelen tener un tamaño de entre $0,5$ y $5,0\text{ }\mu\text{m}$.

3.3.2 Porosidad

Los poros o huecos en la microestructura se dividen en Tipo A ($<10\text{ }\mu\text{m}$) y Tipo B ($10\text{-}25\text{ }\mu\text{m}$).

3.3.3 Inclusiones

Las impurezas no metálicas (como óxidos y sulfuros) existen en forma de partículas.

3.4 Pruebas de rendimiento

3.4.1 Resistencia a la flexión

La tensión máxima que la muestra puede soportar en una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, en MPa.

3.4.2 Dureza

La resistencia a la intrusión del carburo cementado generalmente se expresa en dureza Rockwell (HRA) o dureza Vickers (HV).

3.4.3 Tenacidad a la fractura

La capacidad de un material para resistir el crecimiento de grietas se expresa mediante el factor de intensidad de tensión K_{IC} , con la unidad de $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.5 Áreas de aplicación

3.5.1 Herramientas de corte

El carburo se utiliza en herramientas de corte para mecanizar metal, madera o materiales compuestos.

3.5.2 Piezas resistentes al desgaste

Por ejemplo, las brocas para minería y las matrices de estampación dependen de la alta resistencia al desgaste del carburo cementado.

3.5.3 Aplicaciones militares

El carburo cementado se utiliza para fabricar núcleos perforantes o materiales de blindaje.

4 Principios del uso de la terminología

La terminología debe ser coherente en las normas o documentos técnicos pertinentes para evitar ambigüedades.

Los símbolos y unidades siguen el Sistema Internacional de Unidades (SI), como μm (micrómetro), MPa (megapascal).

Al definir términos, se utilizarán primero los términos estándar. Si no existen definiciones correspondientes, se pueden utilizar las prácticas del sector como referencia.

5 ejemplos de terminología

A continuación se presentan algunos ejemplos de cómo se utilizan algunos de estos términos en la práctica:

Tamaño de grano: El tamaño de grano WC del carburo cementado de grado YG6 es de 0,8 a 1,2 μm .

Temperatura de sinterización: La temperatura de sinterización típica del carburo cementado de grado YT15 es de 1400 °C a 1450 °C.

Resistencia a la flexión: La resistencia a la flexión del carburo cementado de grado YG8 varía entre 1800 y 2200 MPa.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de aplicación de la terminología típica del carburo cementado

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	a la flexión (MPa)	Aplicaciones típicas
YG6	6	0,8-1,2	2000-2500	brocas para minería
YG8	8	1.0-1.5	1800-2200	Herramientas de corte
YT15	5	0,6-1,0	1300-1600	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Historial del desarrollo de la terminología

La norma ISO 3850 se publicó por primera vez en 1983 y define principalmente los términos básicos

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 carburo cementado.

La revisión de 2018 actualizó la definición de la fase de unión (agregó Ni y Fe), agregó términos de aplicación militar y optimizó la descripción del proceso de preparación.

Resumir

La norma ISO 3850:2018 "Terminología para el carburo cementado" proporciona una base terminológica unificada para la estandarización internacional en el campo del carburo cementado, abarcando la composición del material, el proceso de preparación, la microestructura, las pruebas de rendimiento y las áreas de aplicación. La implementación de esta norma promueve el intercambio técnico y el control de calidad en la industria global del carburo cementado, y sienta las bases conceptuales para la aplicación de normas posteriores (como ISO 4499 e ISO 3847).

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:

ISO 3850:2018 Metal duro - Vocabulario

1 Alcance

Esta Norma Internacional define términos y definiciones relacionados con los metales duros y sus materiales asociados, abarcando la composición del material, los procesos de fabricación, la microestructura, las pruebas de rendimiento y los campos de aplicación. Esta norma se aplica a los metales duros con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe) como fase aglutinante, incluyendo aquellos con carburos adicionales (p. ej., TaC, TiC, NbC, VC). Sirve como vocabulario fundamental para las series de estandarización de metales duros (por ejemplo, ISO 4499, ISO 3847) y está destinado a ser utilizado en comercio internacional, investigación y aplicaciones industriales.

2 Referencias normativas

Esta norma no hace referencia directa a otras normas, pero es parte de la serie de estandarización de metales duros y está relacionada con lo siguiente:

ISO 4499-1:2006 Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura — Parte 1: Guía general

ISO 3847:2005 Metales duros — Determinación de los métodos de preparación de muestras

Nota: Se aplican las últimas versiones de los documentos referenciados (incluidas las modificaciones).

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se definen de acuerdo con la norma ISO 3850:2018, categorizados por área temática:

3.1 Composición del material

3.1.1 Fase dura

Carburo de tungsteno (WC)

El componente duro primario de los metales duros, con la fórmula química WC, se caracteriza por una alta dureza y resistencia al desgaste.

Otros carburos

Como el carburo de tantalio (TaC), el carburo de titanio (TiC), el carburo de niobio (NbC) y el carburo de vanadio (VC), se utilizan como fases duras auxiliares.

3.1.2 Fase de aglutinante

Cobalto (Co)

El metal aglutinante común en los metales duros, que normalmente oscila entre el 5% y el 15% en

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

peso, proporciona tenacidad y resistencia de unión.

Níquel (Ni)

Un metal aglutinante alternativo, adecuado para entornos resistentes a la corrosión.

Hierro (Fe)

Un componente de fase aglutinante menor, a menudo utilizado como elemento de aleación.

3.1.3 Impurezas

Carbono libre

Carbono no combinado con metales, existiendo en forma de grafito.

Fase Eta (fase η)

Una fase frágil formada debido a la deficiencia de carbono, como W_3Co_3C o Co_6W_6C .

3.2 Procesos de fabricación

3.2.1 Metalurgia de polvos

El proceso de fabricación de metales duros, que implica mezclar, prensar y sinterizar polvos.

3.2.2 Sinterización

El proceso de unión de partículas de polvo a altas temperaturas (1300 °C a 1500 °C), incluida la sinterización al vacío y la sinterización a baja temperatura.

3.2.3 Prensado isostático en caliente (HIP)

Un proceso de postratamiento para eliminar la porosidad bajo alta temperatura y presión.

3.3 Microestructura

3.3.1 Grano

Partículas microscópicas de WC en metales duros, cuyo tamaño suele oscilar entre 0,5 y 5,0 μm .

3.3.2 Porosidad

de gas en la microestructura, clasificados como Tipo A (<10 μm) y Tipo B (10-25 μm).

3.3.3 Inclusiones

Impurezas no metálicas (por ejemplo, óxidos, sulfuros) presentes como partículas en metales duros.

3.4 Pruebas de rendimiento

3.4.1 Resistencia a la rotura transversal

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La tensión máxima que soporta una muestra en una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, medida en MPa.

3.4.2 Dureza

La resistencia de los metales duros a la indentación, normalmente medida utilizando las escalas Rockwell A (HRA) o Vickers (HV).

3.4.3 Tenacidad a la fractura:

La capacidad de un material para resistir la propagación de grietas, expresada como el factor de intensidad de tensión (K_{IC}), en unidades de $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

3.5 Campos de aplicación

3.5.1 Herramientas de corte

Metales duros utilizados para mecanizar metales, madera o compuestos.

3.5.2 Piezas de desgaste

Como brocas para minería y matrices de estampación, que dependen de la alta resistencia al desgaste de los metales duros.

3.5.3 Aplicaciones militares

Metales duros utilizados en proyectiles perforantes o materiales de blindaje.

4 Principios del uso de la terminología

Los términos se utilizarán de forma coherente dentro de las normas o documentos técnicos pertinentes para evitar ambigüedades.

Los símbolos y unidades deberán ajustarse al Sistema Internacional de Unidades (SI), por ejemplo, μm (micrómetros), MPa (megapascals).

Cuando no exista una definición estándar, se pueden consultar las convenciones de la industria.

5 ejemplos de uso de terminología

Los siguientes son ejemplos de términos en aplicaciones prácticas:

Tamaño del grano

de grano WC en el metal duro YG6 varía de 0,8 a 1,2 μm .

Temperatura de sinterización

metal duro YT15 varía entre 1400 °C y 1450 °C.

Resistencia a la rotura transversal

metal duro YG8 varía de 1800 a 2200 MPa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Terminología típica de metales duros Valores de referencia de aplicación

Calificación	Contenido de Co (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Resistencia a la rotura transversal (MPa)	Aplicación típica
YG6	6	0,8-1,2	2000-2500	brocas para minería
YG8	8	1.0-1.5	1800-2200	Herramientas de corte
YT15	5	0,6-1,0	1300-1600	Herramientas de corte de precisión

Anexo B (Informativo) Desarrollo histórico de la terminología

La norma ISO 3850 se publicó por primera vez en 1983 y definía principalmente la terminología básica de metales duros .

La revisión de 2018 actualizó las definiciones de la fase aglutinante (agregando Ni y Fe), introdujo términos de aplicación militar y refinó las descripciones del proceso de fabricación.

Resumen

La norma ISO 3850:2018 " Metal duro — Vocabulario" proporciona una base terminológica estandarizada para la industria del metal duro , que abarca la composición del material, los procesos de fabricación, la microestructura, las pruebas de rendimiento y los campos de aplicación. Su implementación facilita la comunicación técnica global y el control de calidad, respaldando normas posteriores como ISO 4499 e ISO 3847.

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:

GB/T 4295-2008 Carburo cementado
Método de evaluación de defectos de microestructura

1 Alcance

Esta norma especifica el método de evaluación de defectos microestructurales en carburo cementado, incluyendo la observación y evaluación de defectos como poros, inclusiones, carbono libre y fase η , mediante observación con microscopio metalográfico. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de enlace, incluyendo el carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no se aplica al carburo cementado sin base de cobalto ni a otros materiales compuestos.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

GB/T 3847-2005 Método para la preparación de muestras de carburo cementado

GB/T 3850-1983 Terminología del carburo cementado

GB/T 3489-2005 Método para evaluar la estructura metalográfica del carburo cementado

GB/T 3848-2001 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta GB/T 3850-1983 y los siguientes términos y definiciones:

Porosidad : Poros o huecos en la microestructura del carburo cementado, divididos en Tipo A (diámetro $<10\ \mu\text{m}$) y Tipo B (diámetro $10\text{--}25\ \mu\text{m}$).

Inclusiones : Impurezas no metálicas (como óxidos y sulfuros) en el carburo cementado, generalmente en forma de partículas.

Carbono libre : El carbono en el carburo cementado que no forma compuestos con metales, existe en forma de grafito, cuyo nombre código es C.

Fase η : Una fase frágil formada en el carburo cementado debido a un contenido insuficiente de carbono (como $\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$), cuyo nombre en código es η .

Carburo cementado : Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

4 Principios de evaluación

La evaluación de los defectos de la microestructura del carburo cementado se realiza mediante el método de observación con microscopio metalográfico. Los tipos y grados de poros, inclusiones, carbono libre y fase η se evalúan mediante la preparación de muestras, el pulido, la observación microscópica y la comparación con atlas estándar. La evaluación y clasificación de los defectos se basan en el tamaño, el número y la distribución de los mismos, y el atlas estándar (Apéndice A) se utiliza para la comparación y la descripción cuantitativa o cualitativa del nivel de defecto.

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. Equipo de evaluación

5.1 Microscopio metalográfico

Aumento: se recomienda 100×, 200×, 500×, 200× para observación de rutina.

Equipado con función de luz polarizada para distinguir entre carbono libre y fase η .

Resolución: $< 0,5 \mu\text{m}$.

5.2 Equipo de preparación de muestras

Máquina de corte: corte de precisión de baja velocidad, ancho de incisión $< 0,5 \text{ mm}$.

Máquina de montaje: montaje en prensa caliente, temperatura $< 150^\circ\text{C}$, para evitar cambios estructurales.

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 300-600 r/min, equipada con papel de lija de diamante y paño de pulido.

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, utilizado para limpiar muestras.

5.3 Equipo auxiliar

Calibrador Vernier: precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Probador de microdureza: opcional, se utiliza para ayudar en el análisis de la dureza de la fase η ($> \text{HRC } 70$).

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: rectangular o cilíndrica, tamaño recomendado: $10 \times 10 \times 5 \text{ mm}$.

La superficie de la muestra debe ser plana y libre de grietas o capas de óxido.

Las muestras deben cumplir con los requisitos de preparación de GB/T 3847-2005.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande (> 1 nivel), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Corte y montaje de muestras

Las muestras se cortaron utilizando una máquina de corte de precisión de baja velocidad con un ancho de corte de $< 0,5 \text{ mm}$ y agua como refrigerante.

Montaje en prensa caliente, temperatura $< 150^\circ\text{C}$, presión 20-30 MPa, tiempo 5-10 min.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4 Esmerilado y pulido de probetas

Rectificado grueso: utilice papel de lija de diamante de 120#, 240# o 600# para eliminar gradualmente las marcas de corte.

Lijado fino: utilice papel de lija de 1000#, 1500#, rugosidad de la superficie $Ra < 0,2 \mu m$.

Pulido: utilice pasta de pulido de diamante de $1 \mu m$, velocidad del paño de pulido 300 r/min, rugosidad de la superficie $Ra < 0,05 \mu m$.

6.5 Limpieza de muestras

Limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona y realice una limpieza ultrasónica durante 5 minutos (frecuencia 40 kHz).

Después del secado, conservar en un desecador para evitar la oxidación o contaminación.

7 pasos de evaluación

7.1 Calibración del equipo

Calibre el aumento del microscopio metalográfico con una desviación de $< \pm 1\%$.

Verifique el sistema de iluminación para asegurarse de que la fuente de luz sea uniforme y sin diferencias de color.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$, se recomienda $20 \pm 5^{\circ}C$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Observación microscópica

Coloque la muestra en la platina del microscopio metalográfico, ajuste el enfoque y seleccione un aumento de $200\times$.

Observe la superficie de la muestra en al menos 5 campos de visión con un área de campo de aproximadamente $0,5 mm^2$.

Registre la distribución y morfología de los poros, inclusiones, carbono libre y fase eta y compárelos con el espectro estándar (Apéndice A).

7.4 Evaluación de defectos

Evaluación de la porosidad :

Poros tipo A ($< 10 \mu m$) :

Clasificación por cantidad: A00 (sin poros), A02 (< 10 piezas/ mm^2), A04 (10-20 piezas/ mm^2), A06 (20-30 piezas/ mm^2), A08 (> 30 piezas/ mm^2).

($10-25 \mu m$) :

Clasificación por cantidad: B00 (sin poros), B02 (< 5 piezas/ mm^2), B04 (5-10 piezas/ mm^2), B06 (10-15 piezas/ mm^2), B08 (> 15 piezas/ mm^2).

Evaluación de inclusión :

Clasificados por número y tamaño: I00 (sin inclusiones), I02 (< 5 piezas/ mm^2 , $< 10 \mu m$), I04 (5-10 piezas/ mm^2 , $10-20 \mu m$), I06 (> 10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

piezas/mm², > 20 μm).

Evaluación gratuita de carbono :

Clasificado por porcentaje de área: C00 (sin carbono libre), C02 (<0,5%), C04 (0,5%-1,0%), C06 (1,0%-1,5%) y C08 (>1,5%) .

Evaluación de la fase η :

Clasificación por porcentaje de área: η00 (sin fase η), η02 (<0,5%), η04 (0,5%-1,0%), η06 (1,0%-1,5%) y η08 (>1,5%).

7.5 Registro de resultados

Registre la calificación del defecto para cada campo de visión y calcule el promedio para determinar el grado de defecto final de la muestra.

Evaluación de la desviación: La desviación estándar de los 5 campos visuales es <±1 nivel, de lo contrario se requiere una nueva observación.

8 Evaluación de los resultados de la evaluación

8.1 Rango de nivel de defecto

El nivel de defectos microestructurales en el carburo cementado depende del grado y el propósito:

YG6 (6% Co): A02-B02-I02-C02-η02, adecuado para brocas de minería.

YG8 (8% Co): A04-B04-I02-C04-η02, adecuado para herramientas de corte.

YT15 (5% Co + TiC) : A02-B02-I04-C02-η04, adecuado para herramientas de acabado.

8.2 Evaluación de la desviación

Los 5 campos de visión son <±1 grado, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el nivel de defecto excede los requisitos técnicos, se debe analizar la causa (por ejemplo, la temperatura de sinterización es demasiado alta o el contenido de carbono está fuera de control).

8.3 Análisis de factores influyentes

Porosidad : Un vacío de sinterización insuficiente (<10 Pa) provocará un aumento de la porosidad (>A04).

Inclusiones : Una baja pureza de la materia prima (impurezas > 0,1%) conducirá a un aumento de inclusiones (> I04).

Carbono libre : un contenido de carbono demasiado alto (>0,2 %) dará lugar a un aumento de carbono libre (>C04).

Fase η : Un contenido de carbono insuficiente (<0,1 %) o una velocidad de enfriamiento excesiva (>50 °C/min) conducirán a la formación de la fase η (>η04).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, aumento (200×), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

Resultados de la prueba: calificación de defectos (A, B, I, C, η), media y desviación para cada campo de visión.

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

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice normativo) Atlas estándar de defectos

Poros tipo A: A00-A08, el espectro muestra la distribución de poros con un diámetro de $< 10 \mu\text{m}$.

Poros tipo B: B00-B08, el espectro muestra la distribución de poros con un diámetro de $10\text{-}25 \mu\text{m}$.

Inclusiones: I00-I06, la gráfica muestra el tamaño y cantidad de inclusiones.

Carbono libre: C00-C08, el gráfico muestra el porcentaje de área de carbono libre.

Fase η : $\eta 00\text{-}\eta 08$, el espectro muestra la relación del área de la fase η .

Apéndice B (Apéndice informativo) Valores de referencia de los niveles típicos de defectos de carburo cementado

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Nivel de defecto	Aplicaciones típicas
YG6	6	A02-B02-I02-C02- $\eta 02$	brocas para minería
YG8	8	A04-B04-I02-C04- $\eta 02$	Herramientas de corte
YT15	5	A02-B02-I04-C02- $\eta 04$	Herramientas de acabado

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $20\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50\pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 \text{ mm/m}$.

Resumir

La norma GB/T 4295-2008, "Método para la evaluación de defectos microestructurales en carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para evaluar defectos microestructurales en carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados de la evaluación mediante observación con microscopio metalográfico. La implementación de esta norma facilita el control de calidad de los materiales de carburo cementado y proporciona soporte técnico confiable para aplicaciones de alto rendimiento, como herramientas de corte y perforadoras mineras.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 5249-2008
carburo cementado

Especificaciones generales para la preparación de muestras

1 Alcance

Esta norma especifica las especificaciones generales para la preparación de muestras de carburo cementado, incluyendo los pasos de muestreo, corte, incrustación, rectificado, pulido, limpieza, etc. Es aplicable a la preparación de muestras para ensayos de rendimiento de carburo cementado (como dureza, densidad, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, microestructura, etc.). Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, así como al carburo cementado con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no es aplicable a la preparación de carburo cementado recubierto o muestras de carburo cementado después del refuerzo superficial.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 18376-2001 Método de prueba de rendimiento de carburo cementado

GB/T 3849-2008 Método de prueba para la dureza Vickers del carburo cementado

GB/T 7997-2010 Método de ensayo para la tenacidad a la fractura del carburo cementado

GB/T 3488-2008 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

ISO 3878:1983 Carburo cementado — Especificación para la preparación de muestras

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

Muestra de prueba: Una porción representativa tomada de un producto o pieza en blanco de carburo cementado para probar su rendimiento.

Esmerilado y pulido: Mediante el esmerilado y pulido mecánico se consigue que la superficie de la muestra alcance un estado de espejo.

Rugosidad superficial (Ra): La desviación media aritmética de la rugosidad superficial de la muestra, en μm .

4. Recogida de muestras

4.1 Principios de muestreo

Las muestras deben tomarse de partes representativas de los productos de carburo cementado o de las piezas en bruto para garantizar que los resultados de la prueba de rendimiento sean estadísticamente significativos.

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 ubicación del muestreo debe evitar bordes y áreas defectuosas (como grietas y áreas de concentración de poros).

4.2 Cantidad de muestreo

El número de muestras tomadas para cada lote de productos o piezas en bruto no deberá ser inferior a 3, y para pruebas de rendimiento (como dureza, tenacidad a la fractura) no deberá ser inferior a 5. Si la cantidad del lote es <10 piezas, la proporción de muestreo es del 30% al 50%; si la cantidad del lote es >100 piezas, la proporción de muestreo es del 5% al 10%.

4.3 Marcado de muestreo

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, el número de marca (como YG8, YT15) y la ubicación de muestreo. El marcado no debe afectar el procesamiento posterior ni el área de análisis.

5. Corte de muestra

5.1 Requisitos del equipo

Máquina de corte: equipada con hoja de sierra de diamante, velocidad de corte <500 r/min.

Refrigerante: agua destilada o refrigerante especial, temperatura <40°C.

5.2 Pasos de corte

Fije el producto de carburo o la pieza en bruto en el banco de trabajo de la máquina de corte.

Corte con una hoja de sierra de diamante a baja velocidad (<500 r/min) y aplique una ligera presión (<50 N).

Mantener refrigerado y evitar el sobrecalentamiento local (temperatura < 60°C).

5.3 Resultados del corte

El tamaño de la muestra debe cumplir con los requisitos de las pruebas posteriores, tales como:

Ensayo de dureza: 5×5×2 mm (±0,1 mm).

Ensayo de tenacidad a la fractura: 20×4×2 mm (±0,02 mm).

Inspección de microestructura: 10×10×5 mm (±0,1 mm).

La superficie cortada debe ser lisa, sin grietas evidentes ni marcas de quemaduras.

6. Montaje de la muestra

6.1 Ámbito de aplicación

Es necesario montarlo cuando la muestra es pequeña (<5 mm) o tiene una forma irregular.

El montaje mejora la manipulación de la muestra y la estabilidad de la superficie de prueba.

6.2 Requisitos del equipo

Máquina de montaje en caliente: rango de temperatura 150-180°C, presión 20-30 MPa.

Resina de montaje: Resina termoendurecible o resina epoxi, dureza > HV 100.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Pasos de montaje

Coloque la muestra en un molde de montaje y agregue resina en polvo o resina líquida.
Ajuste la temperatura a 150-180 °C, la presión a 20-30 MPa y caliente durante 5-10 minutos.
Dejar enfriar naturalmente a temperatura ambiente (<40 °C) y retirar la muestra montada.

6.4 Resultados del mosaico

La superficie de la muestra montada es plana, la resina está firmemente adherida a la muestra y no hay burbujas ni grietas.

La superficie de prueba de la muestra está expuesta, con un área > 5×5 mm.

7. Rectificado y pulido de muestras

7.1 Requisitos del equipo

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 200-300 r/min.

Papel de lija: grano 400#-2000# (papel de lija de SiC).

Disco de pulido: equipado con líquido de pulido de diamante (tamaño de partícula 0,5-1 μm) .

7.2 Pasos de esmerilado y pulido

molienda gruesa:

Utilice papel de lija de 400# a 800# para eliminar gradualmente las marcas de corte a una velocidad de 200 r/min y aplique una ligera presión (<20 N).

Después de cada cambio de papel de lija, enjuague la muestra con agua para eliminar los residuos de pulido.

molienda fina:

Utilice papel de lija de 1000#-2000#, aumente gradualmente el grano, gire a 200 r/min y aplique una ligera presión (<10 N).

Asegúrese de que no haya rayones evidentes en la superficie y que la rugosidad se reduzca a $Ra < 0,2 \mu m$.

pulido:

líquido de pulido de diamante (tamaño de partícula de 0,5 μm) , la velocidad del disco de pulido fue de 300 r/min y se aplicó una ligera presión (<5 N).

Pulido hasta acabado de espejo, rugosidad superficial $Ra < 0,05 \mu m$ (inspección al microscopio).

7.3 Resultados del esmerilado y pulido

La superficie de la muestra es plana y lisa, sin rayones, grietas ni marcas de quemaduras.

La rugosidad superficial $Ra < 0,05 \mu m$ cumple con los requisitos de prueba de dureza, tenacidad a la fractura, microestructura, etc.

8. Limpieza de muestras

8.1 Métodos de limpieza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Remoje la muestra en etanol anhidro o acetona durante 1-2 minutos para eliminar aceite, polvo y residuos de pulido.

Utilice un limpiador ultrasónico (frecuencia 40 kHz, potencia 100 W) durante 2-3 minutos para mejorar el efecto de limpieza.

Utilice aire comprimido o papel de filtro para secar la superficie de la muestra para evitar manchas de agua.

8.2 Resultados de la limpieza

No hay suciedad ni residuos visibles en la superficie de la muestra y es adecuada para pruebas posteriores.

9. Inspección de muestras

9.1 Inspección de apariencia

Compruebe que la superficie de la muestra esté plana y libre de grietas, poros o marcas de quemaduras.

Mida el tamaño de la muestra y la desviación debe cumplir con los requisitos de la Tabla 1.

Tabla 1 Requisitos de desviación del tamaño de la muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

GB/T 5249-2008
carburo cementado

Especificaciones generales para la preparación de muestras

1 Alcance

Esta norma especifica las especificaciones generales para la preparación de muestras para pruebas de rendimiento de carburo cementado, incluidos los requisitos de muestreo, corte, incrustación, rectificado, pulido, limpieza, marcado, etc. Esta norma es aplicable a carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, y también a carburos cementados con otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma es aplicable a la preparación de muestras para ensayos de rendimiento como dureza, densidad, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura y microestructura, pero no a la preparación de muestras para carburos cementados recubiertos o carburos cementados tras el refuerzo superficial.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para todos los documentos referenciados con fecha, las modificaciones posteriores (excluyendo erratas) o revisiones no son aplicables a esta norma. Para todos los documentos referenciados sin fecha, la versión más reciente es aplicable a esta norma.

GB/T 3849-2008 Método de prueba para la dureza Vickers del carburo cementado

GB/T 3488-2008 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

GB/T 7997-2010 Método de ensayo para la tenacidad a la fractura del carburo cementado

GB/T 3850-2008 Método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

GB/T 3848-2008 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

ISO 4489:1978 Métodos para la preparación y ensayo de muestras de carburo cementado

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Carburo cementado: Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

Muestra de prueba: Una muestra tomada de materiales o productos de carburo cementado para probar su rendimiento.

Muestreo: Proceso de extracción de muestras de materiales o productos de carburo cementado.

Esmerilado y pulido: Proceso que consiste en hacer que la superficie de la muestra alcance la rugosidad especificada mediante esmerilado y pulido mecánico.

Rugosidad de la superficie (Ra): La rugosidad media aritmética de la superficie de la muestra, en μm .

4 Principio de preparación de muestras

El objetivo de la preparación de probetas de carburo cementado es garantizar que su superficie sea plana y libre de defectos mediante el muestreo, corte, montaje, rectificado, pulido, limpieza y otros

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

pasos para cumplir con los requisitos de precisión de las pruebas de rendimiento. La preparación de las probetas debe evitar la introducción de defectos de procesamiento (como grietas, sobrecalentamiento y cambios estructurales) y garantizar que el tamaño, la rugosidad superficial y la geometría de la probeta cumplan con los requisitos de las normas de prueba correspondientes.

5. Equipo de preparación de muestras

5.1 Equipo de corte

Máquina de corte: equipada con hoja de sierra de diamante, velocidad de corte 300-500 r/min.

Refrigerante: Agua o refrigerante a base de agua, temperatura controlada $<60^{\circ}\text{C}$, evitar sobrecalentamiento.

5.2 Equipo de montaje

Máquina de montaje en caliente: rango de temperatura $150-200^{\circ}\text{C}$, presión 20-30 MPa.

Material de montaje: resina fenólica o resina epoxi, resistente a temperaturas $>150^{\circ}\text{C}$.

5.3 Equipos de rectificado y pulido

Máquina pulidora y rectificadora: velocidad 200-500 r/min.

Papel de lija: grano 400#-2000#.

Disco de pulido: fieltro o franela, velocidad 300-400 r/min.

Agente de pulido: Líquido de pulido de diamante, tamaño de partícula 0,5-1 μm .

5.4 Equipo de limpieza

Limpiador ultrasónico: frecuencia 40 kHz, potencia 100-200 W.

Líquido de limpieza: etanol anhidro o acetona.

5.5 Herramientas de medición

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02\text{ mm}$.

Micrómetro digital: precisión $\pm 0,001\text{ mm}$.

de rugosidad superficial: precisión $\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

5.6 Control ambiental

Temperatura: $20\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad: $50\pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6 Pasos de preparación de la muestra

6.1 Muestreo

6.1.1 Ubicación del muestreo

El muestreo debe ser representativo de las propiedades generales del material, evitando áreas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cercanas a bordes, defectos superficiales o zonas afectadas por el calor.

Para barras, placas o piezas, el lugar de muestreo deberá cumplir con las normas de prueba correspondientes:

Prueba de dureza: >1 mm desde la superficie.

Inspección de microestructura: >0,5 mm desde la superficie.

Ensayo de resistencia a la flexión: >2 mm desde el borde.

6.1.2 Cantidad de muestreo

El número de muestras tomadas para cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado de la prueba es grande (>5%), el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.1.3 Método de muestreo

Utilice una hoja de sierra de diamante para cortar, agua como refrigerante, velocidad de corte de 300-500 r/min, temperatura <60°C para evitar el sobrecalentamiento que provoca cambios en el tejido.

La superficie de corte debe ser plana con una desviación vertical de <0,05 mm.

6.2 Tamaño de la muestra

Determinar el tamaño de la muestra según el ítem de prueba:

Prueba de dureza (GB/T 3849-2008): área superficial > 5×5 mm, espesor > 2 mm.

Ensayo de resistencia a la flexión (GB/T 3850-2008): 20×6,5×5,25 mm (±0,05 mm).

Ensayo de tenacidad a la fractura (GB/T 7997-2010): 20×4×2 mm (±0,02 mm).

Inspección de microestructura (GB/T 3488-2008): 10×10× 5 mm (±0,1 mm).

Las desviaciones dimensionales deben cumplir con los requisitos de las normas de prueba pertinentes.

6.3 Mosaico (opcional)

6.3.1 Ámbito de aplicación

Las muestras de tamaño pequeño (<5×5×2 mm) o de forma irregular deben montarse.

6.3.2 Pasos de montaje

Utilice un montador en caliente y elija resina fenólica o resina epoxi.

La temperatura de montaje es de 150-180 °C, la presión es de 20-30 MPa y el tiempo de retención es de 5-10 minutos.

Después de enfriarse, la muestra queda firmemente adherida al material de montaje sin burbujas ni grietas.

6.4 Esmerilado y pulido

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.4.1 Molienda gruesa

Utilice papel de lija de 400# a 1200# para eliminar gradualmente las marcas de corte.

La velocidad es de 200 r/min, el tiempo de pulido de cada nivel de papel de lija es de 1-2 min y la dirección se gira 90° para garantizar marcas de pulido uniformes.

Después de un pulido grueso, la superficie queda lisa y sin rayones evidentes (inspección con microscopio, aumento 50x).

6.4.2 Molienda fina

Utilice papel de lija de 1500#-2000#, velocidad 200 r/min, tiempo de pulido 1-2 min.

La rugosidad de la superficie después del pulido fino es $Ra < 0,2 \mu m$ (medida con un medidor de rugosidad de superficie).

6.4.3 Pulido

Utilice líquido de pulido de diamante (tamaño de partícula de $0,5$ a $1 \mu m$), velocidad del disco de pulido de 300 a 400 r/min, tiempo de pulido de 3 a 5 min.

Después del pulido, la rugosidad de la superficie $Ra < 0,05 \mu m$, similar a un espejo y sin rayones (inspección con microscopio, aumento de 100x).

6.5 Limpieza

La muestra se colocó en un limpiador ultrasónico y se limpió con etanol anhidro durante 3-5 minutos a una frecuencia de 40 kHz y una potencia de 100 W.

Después de limpiar, seque con nitrógeno seco para asegurarse de que no queden residuos en la superficie.

6.6 Marcado de muestra

Marque el número de lote, el número de marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba en el área no probada de la muestra.

Método de marcado: Grabado láser o marcado con tinta, el marcado debe ser claro y no debe afectar el área de prueba.

6.7 Inspección de muestras

Verifique la superficie de la muestra: sin grietas, rayones, capas de óxido o contaminación.

Verifique el tamaño: use un calibrador vernier o un micrómetro para medir y la desviación cumple con los requisitos del estándar de prueba.

Comprobar la rugosidad de la superficie: $Ra < 0,05 \mu m$ (inspección de microestructura) o $Ra < 0,1 \mu m$ (prueba de dureza).

7. Evaluación de la calidad de la preparación de la muestra

7.1 Calidad de la superficie

La superficie de la muestra debe ser similar a un espejo, sin rayones, grietas o defectos de procesamiento (inspección al microscopio, aumento 100x).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rugosidad de la superficie:

Inspección de microestructura: $R_a < 0,05 \mu m$.

de dureza: $R_a < 0,1 \mu m$.

Ensayo de resistencia a la flexión o tenacidad a la fractura: $R_a < 0,2 \mu m$.

7.2 Precisión dimensional

La desviación del tamaño de la muestra deberá cumplir con las normas de prueba correspondientes:

Prueba de resistencia a la flexión: $\pm 0,05 mm$.

Ensayo de tenacidad a la fractura: $\pm 0,02 mm$.

Inspección de microestructura: $\pm 0,1 mm$.

7.3 Impacto organizacional

No se deben introducir cambios estructurales (como engrosamiento de los granos o grietas debido al sobrecalentamiento) durante el proceso de preparación de la muestra.

Las temperaturas de corte $> 60^\circ C$ pueden provocar desviaciones del tamaño del grano $WC > \pm 0,2 \mu m$ (inspección al microscopio, aumento 1000×).

7.4 Tratamiento no conforme

Si la calidad de la superficie, el tamaño o la rugosidad de la muestra no son satisfactorios, es necesario volver a prepararla.

Si se encuentran grietas o cambios estructurales, es necesario analizar la causa (por ejemplo, si la velocidad de corte es demasiado rápida) y volver a tomar muestras.

8 Almacenamiento de muestras

La muestra debe analizarse inmediatamente después de su preparación para evitar la exposición prolongada al aire ($> 24 h$).

Si es necesario almacenarla, la muestra debe colocarse en un desecador a $20 \pm 5^\circ C$ y humedad $< 30\%$, y envolverse con papel antioxidante.

El tiempo de almacenamiento no debe exceder 1 mes para evitar oxidación o contaminación.

9 Informe de inspección

El informe de inspección debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de preparación: velocidad de corte (300-500 r/min), temperatura de montaje ($150-180^\circ C$), tamaño de partícula del líquido de pulido ($0,5-1 \mu m$).

Resultados de la preparación: rugosidad superficial (R_a), desviación dimensional, evaluación de la calidad de la superficie.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos de la prueba.

Fecha de preparación y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Requisitos para la preparación de muestras típicas de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elementos de prueba	Tamaño de muestra (mm)	la Ra (μm)	Desviación dimensional (mm)	Aplicaciones típicas
Prueba de dureza	>5×5×2	<0,1	±0,1	Herramientas de corte
Prueba de resistencia a la flexión	20×6,5×5,25	<0,2	±0,05	brocas para minería
Prueba de tenacidad a la fractura	20×4×2	<0,2	±0,02	Moho
Inspección de microestructura	10×10×5	<0,05	±0,1	Control de calidad

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales para la preparación de muestras

Temperatura: 20±5°C.
Humedad: 50±10%.
Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.
Nivelación del banco de trabajo: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Problemas comunes y soluciones para la preparación de muestras

pregunta	razón	Solución alternativa
Arañazos superficiales	de pulido es demasiado grande (>1 μm)	Utilice líquido de pulido con un tamaño de partícula de 0,5 μm.
Muestra sobrecalentada (>60 °C)	La velocidad de corte es demasiado rápida (>500 r/min)	Reducir la velocidad de corte a 300 r/min
La rugosidad de la superficie no cumple con el estándar	Tiempo de pulido insuficiente (<3 min)	Ampliar el tiempo de pulido a 5 min.
agrietamiento del borde de la muestra	Corte sin refrigerante	Utilice refrigerante a base de agua a temperaturas < 60 °C

Resumir

La norma GB/T 5249-2008, "Especificación general para la preparación de muestras de carburo cementado", proporciona un procedimiento estandarizado para la preparación de muestras para ensayos de rendimiento de carburo cementado. Mediante la estandarización de los pasos de muestreo, corte, montaje, rectificado, pulido, limpieza y otros, se garantiza que la calidad superficial y la precisión dimensional de las muestras cumplan con los requisitos de la prueba. La implementación de esta norma contribuye a mejorar la precisión y la repetibilidad de los resultados de los ensayos de rendimiento de carburo cementado y proporciona soporte técnico fiable para herramientas de corte, taladros de minería, moldes y otras aplicaciones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 28079:2009

Ensayo de tenacidad a la fractura de una muestra en forma de palma de carburo cementado Metales duros : prueba de tenacidad Palmqvist

1 Alcance

Esta norma especifica el método para medir la tenacidad a la fractura en forma de palma del carburo cementado y el cermet mediante indentación a temperatura ambiente. Esta norma se aplica al ensayo de tenacidad a la fractura de carburos y carbonitruros unidos a metales (comúnmente conocidos como carburos cementados, cermets o carburos cementados), denominado tenacidad a la fractura de Palmqvist, que se calcula midiendo la longitud total de la grieta de cuatro esquinas de la indentación de dureza Vickers. El procedimiento de ensayo de esta norma es aplicable a temperatura ambiente (20 ± 5 °C), pero puede extenderse a temperaturas superiores o inferiores mediante acuerdo. Este procedimiento de ensayo estándar es aplicable al ambiente de aire de laboratorio convencional y no es aplicable a entornos corrosivos (como ácidos fuertes o agua de mar).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3878:1983 Carburo cementado: prueba de dureza Vickers y dureza Rockwell

ISO 3252:1999 Metalurgia de polvos — Terminología

ISO 6507-1:2005 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 1: Método de ensayo

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3252:1999 y los siguientes términos y definiciones:

Metales duros

Un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión mediante pulvimetalurgia.

Cermets

con carbonitruro (como TiCN) como fase dura principal y metal (como Ni, Co) como fase de enlace.

Dureza de Palmqvist

La tenacidad a la fractura del carburo cementado o cermet se calcula mediante la longitud total de la grieta de cuatro esquinas de la indentación de dureza Vickers, y la unidad es $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Indentación de dureza Vickers

Se utiliza un penetrador de diamante Vickers (ángulo de vértice de 136°) para aplicar la carga, formando una sangría cuadrada en la superficie de la muestra.

Longitud de la grieta (l)

Longitud de la grieta en forma de palma que se extiende desde las cuatro esquinas de la sangría Vickers, en mm.

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

4 Principio de prueba

La prueba de tenacidad a la fractura en forma de palma aplica una indentación de dureza Vickers en la superficie de una muestra de carburo cementado o cermet, mide la longitud total de la grieta en forma de palma que se extiende desde las cuatro esquinas de la indentación y calcula la tenacidad a la fractura K_{Ic} combinando la carga de indentación y la dureza del material. Se asume que la grieta en forma de palma es superficial (grieta no mediana) y su longitud está relacionada con la tenacidad del material. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$K_{Ic} = A \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

其中:

- K_{Ic} 为断裂韧性, 单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$;
- A 为常数 (经验值, 通常取 0.0028) ;
- HV 为维氏硬度, 单位为 N/mm^2 (或 MPa) ;
- P 为压痕载荷, 单位为 N (通常为 294.2 N , 即 30 kgf) ;
- T 为四角裂纹总长度, 单位为 mm , $T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$.

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Vickers

Cumple con los requisitos de la norma ISO 6507-1:2005.

Rango de carga: 100-500 N , precisión $\pm 0,5\%$.

Control del tiempo de retención: 5-60 s , desviación $< \pm 0,5 \text{ s}$.

5.2 Penetrador

Penetrador de diamante Vickers estándar, ángulo de vértice $136^\circ (\pm 0,5^\circ)$.

La superficie del penetrador está libre de defectos y tiene bordes limpios (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Dispositivo de medición

Microscopio óptico: aumento $400\times$ - $600\times$, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipado con un sistema de lectura digital con una precisión de medición de $\pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Bloque de calibración

Bloques de calibración estándar de carburo, rango de dureza HV 1200-2000, desviación $< \pm 2\%$.

La rugosidad de la superficie del bloque de calibración es $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide o cilíndrica, área de superficie de prueba $> 5 \times 5$ mm, espesor > 2 mm.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado. Rugosidad superficial $Ra < 0,1 \mu\text{m}$ (pulida).

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($> 5\%$), el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

El durómetro se calibró utilizando un bloque de calibración estándar con una carga de 294,2 N (30 kgf) y tres mediciones. La desviación de dureza fue $\leq \pm 1\%$.

Verifique el estado del penetrador para asegurarse de que no haya desgaste ni defectos.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Indentación de dureza Vickers

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza, asegurándose de que la superficie de prueba esté nivelada.

Seleccione una carga de 294,2 N (30 kgf) y un tiempo de retención de 10 a 15 s.

El penetrador se presiona lentamente en la superficie de la muestra y se descarga automáticamente después de mantener la carga.

Se realizaron 5 sangrías en cada muestra, con un espaciado de sangría > 5 veces la longitud diagonal de la sangría ($> 0,5$ mm) y una distancia desde el borde de la muestra > 1 mm.

7.4 Medición de la longitud de la grieta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Se utilizó un microscopio óptico (aumento 400×-600×) para medir las longitudes de grietas l_1 , l_2 , l_3 y l_4 en las cuatro esquinas de la sangría con una precisión de $\pm 0,001$ mm.

Calcular la longitud total de la grieta:

$$T = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$$

Confirme que la grieta tenga forma de palma (no una grieta mediana ni una grieta lateral) y que la grieta debe extenderse claramente desde las cuatro esquinas de la hendidura.

7.5 Medición de dureza Vickers

Mida las longitudes de las dos diagonales de la sangría (d_1 , d_2) con una precisión de $\pm 0,001$ mm.

Calcular la longitud diagonal media:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calcular la dureza Vickers:

$$HV = \frac{1.8544 \times P}{d^2}$$

Donde: $P = 294,2$ N.

7.6 Cálculo de la tenacidad a la fractura

Calcule la tenacidad a la fractura utilizando la fórmula:

$$K_{Ic} = 0.0028 \times \sqrt{HV} \times \sqrt{\frac{P}{T}}$$

Tome el valor promedio de K_{Ic} de 5 sangrías, con una desviación de $\leq \pm 5\%$.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de tenacidad a la fractura

El valor de tenacidad a la fractura de palma del carburo cementado es generalmente K_{Ic} 10-20 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, y el rango específico depende del grado y el contenido de Co:

YG6 (6% Co): K_{Ic} 14-16 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG8 (8% Co): K_{Ic} 12-15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG10 (10% Co): K_{Ic} 10-13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Cerámicas metálicas (como TiCN -Ni): K_{Ic} 8-12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

8.2 Evaluación de la desviación

La desviación del valor K_{Ic} de las 5 hendiduras es $\leq \pm 5\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de K_{Ic} está fuera del rango esperado, se debe analizar la causa (por ejemplo, la morfología de la grieta no tiene forma de palma o el contenido de Co es demasiado alto y, como resultado, no hay grietas).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Análisis de factores influyentes

Forma de la grieta: si la grieta es una grieta mediana o una grieta lateral (no una grieta en forma de palma), el valor de K_{Ic} no es válido.

Contenido de Co: Cuando el contenido de Co es $>15\%$, no se pueden generar grietas (la tenacidad es demasiado alta) y el método de la palma no es aplicable.

Selección de carga: Una carga demasiado baja ($<294,2$ N) puede no generar grietas, mientras que una carga demasiado alta ($>490,3$ N) puede provocar complicaciones en las grietas.

Calidad de la superficie: una rugosidad de la superficie $R_a >0,1$ μm afectará la medición de la longitud de la grieta (desviación $>5\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño, contenido de Co.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, carga (294,2 N), tiempo de retención (10-15 s), temperatura ambiente ($20\pm5^\circ\text{C}$), humedad ($50\pm10\%$).

T para cada sangría T, dureza Vickers HV HV Alto voltaje, Valores de K_{Ic} y sus valores promedio y desviaciones.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado, descripción de la morfología de la grieta.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de tenacidad a la fractura en forma de palma de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Dureza Vickers (HV30)	Tenacidad a la fractura de la palma (K_{Ic} , $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	Aplicaciones típicas
YG6	6	1500-1600	14-16	brocas para minería
YG8	8	1450-1550	12-15	Herramientas de corte
YG10	10	1400-1500	10-13	Moho
TiCN - Ni	10	1600-1700	8-12	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: $20\pm5^\circ\text{C}$.

Humedad: $50\pm10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $<0,02$ mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Diagrama esquemático de la morfología de la grieta en forma de palma

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Grieta en forma de palma: una grieta poco profunda que se extiende desde las cuatro esquinas de la hendidura de Vickers, con la trayectoria de la grieta claramente visible a lo largo del borde de la hendidura.

Grietas sin forma de palma:

Grieta mediana: la grieta se extiende verticalmente hacia abajo desde la parte inferior de la hendidura.

Grieta lateral: Grieta que se propaga lateralmente a lo largo de la superficie de la muestra y puede causar desconchado.

Nota: Solo las grietas en forma de palma son aplicables al cálculo de K_{Ic} en esta norma.

Resumir

La norma ISO 28079:2009, "Ensayo de tenacidad a la fractura de probetas de carburo cementado con forma de palma", proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de tenacidad a la fractura de carburo cementado y cermet con forma de palma. Este procedimiento garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación estandarizada de las probetas, el ensayo de indentación, la medición de grietas y el cálculo de los resultados. La implementación de esta norma facilita el control de calidad y la evaluación del rendimiento del carburo cementado, y proporciona soporte técnico fiable para herramientas de corte, taladros para minería, moldes y otras aplicaciones.

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:

ISO 6507-1:2018

Prueba de dureza Vickers de materiales metálicos

Materiales metálicos: prueba de dureza Vickers

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la dureza de materiales metálicos (incluido el carburo cementado, el acero, la fundición, los metales no ferrosos, etc.) a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C) mediante el ensayo de dureza Vickers. Este método incluye los principios del ensayo, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos del ensayo, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe del ensayo, etc. Esta norma es aplicable a ensayos en el rango de dureza Vickers de HV 1 a HV 3000, que abarcan diferentes cargas (de 0,098 N a 2942 N). Esta norma no es aplicable a ensayos de dureza de muestras diminutas o de paredes delgadas (espesor <0,1 mm) ni de materiales recubiertos.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 6507-2:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

ISO 6507-3:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 3: Estándares de calibración

ISO 376:2011 Materiales metálicos — Patrones de fuerza de calibración

ISO 18265:2013 Materiales metálicos — Conversión entre dureza y resistencia

3 Términos y definiciones

Esta norma utiliza los siguientes términos y definiciones:

Dureza Vickers (HV): La capacidad de un material metálico para resistir la penetración de un penetrador Vickers, expresada como un valor de dureza Vickers en N/mm² (o MPa), calculado por la longitud diagonal de la sangría.

Penetrador Vickers: Un penetrador piramidal de diamante cuadrado con un ángulo de vértice de 136°.

Diagonal de sangría: La longitud de las dos diagonales de la sangría cuadrada que se forma cuando se presiona el penetrador Vickers en la superficie de la muestra, en mm.

Carga de prueba (F): La fuerza aplicada al penetrador Vickers en Newtons (N), que varía de 0,098 N a 2942 N.

de retención : El tiempo que el penetrador mantiene la carga después de aplicarla, medido en segundos (s).

4 Principio de prueba

La prueba de dureza Vickers se realiza presionando un indentador de diamante Vickers estándar

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

(ángulo de vértice de 136°) sobre la superficie de una muestra metálica con una carga específica, manteniéndolo durante un tiempo determinado y luego descargándolo. Se mide la longitud de las dos diagonales de la indentación (d_1 , d_2), se calcula la longitud diagonal promedio (d) y, a continuación, se calcula el valor de dureza Vickers (HV). La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

en:

F 为试验载荷, 单位为 N;

d 为压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$;

硬度值单位为 N/mm² (1 kgf/mm² $\approx$ 9.807 N/mm²) 。

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Vickers

Cumple con los requisitos de verificación y calibración ISO 6507-2:2018.

Rango de carga: 0,098 N a 2942 N (HV 0,01 a HV 30), precisión $\pm 0,5$ %.

Control del tiempo de retención: 5 s a 60 s, desviación $< \pm 0,5$ s.

5.2 Penetrador

Penetrador de diamante Vickers estándar, ángulo de vértice 136° ($\pm 0,5^\circ$).

La superficie del penetrador está libre de defectos y tiene bordes limpios (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Dispositivo de medición

Microscopio óptico: aumento 50×-1000×, se recomienda 400×, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipado con un sistema de lectura digital con una precisión de medición de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloque de calibración

Bloques de calibración estándar según ISO 6507-3:2018, rango de dureza HV 100-3000, desviación $< \pm 2\%$.

La rugosidad de la superficie del bloque de calibración es $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20 $\pm$ 5°C.

Humedad: 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, cilindro u otra forma geométrica regular, área de superficie de prueba $> 5 \times 5$ mm, espesor $> 0,5$ mm (dependiente de la carga).

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 superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado. Rugosidad superficial $Ra < 0,1 \mu m$ (pulida), para pruebas de carga baja ($< 9,807 N$), $Ra < 0,05 \mu m$. El espesor de la muestra deberá cumplir los siguientes requisitos: espesor $\geq 1,5 \times$ longitud diagonal de la sangría.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($> 3\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, acero 45#) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Utilice el bloque de calibración estándar para calibrar el durómetro. Seleccione el bloque de calibración adecuado para la carga de prueba. Realice 3 mediciones. La desviación de dureza es $< \pm 1 \%$.

Verifique el estado del penetrador para asegurarse de que no haya desgaste ni defectos.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$, se recomienda $20 \pm 5^{\circ}C$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Selección de carga

Seleccione la carga en función de la dureza del material y el espesor de la muestra:

Carburo: se recomienda 294,2 N (30 kgf, HV 30).

Acero: 50 N a 294,2 N (HV 5 a HV 30).

Probetas de paredes delgadas: 0,098 N a 9,807 N (HV 0,01 a HV 1).

La carga debe garantizar que la longitud diagonal d de la sangría esté en el rango de 0,020 mm a 1,400 mm.

7.4 Operación de prueba

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza, asegurándose de que la superficie de prueba esté nivelada.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Seleccione una carga adecuada (por ejemplo, 294,2 N) y mantenga la carga durante 10 a 15 s (o ajústela según los requisitos del material).

El penetrador se presiona lentamente en la superficie de la muestra y se descarga automáticamente después de mantener la carga.

Se medirán 5 puntos de sangría para cada muestra, con una separación entre sangrías > 3 veces la longitud diagonal (> 0,3 mm) y una distancia desde el borde de la muestra > 0,5 mm.

7.5 Medición y cálculo

Las longitudes de las dos líneas diagonales de la sangría (d1, d2) se midieron utilizando un microscopio óptico con una precisión de ±0,001 mm.

Calcular la longitud diagonal media:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calcular la dureza Vickers:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

Se toman cinco puntos de sangría como valor de dureza de la muestra, con una desviación de <±3%.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de valores de dureza

Rango de dureza Vickers de materiales metálicos: HV 100-3000, el valor específico depende del material:

Carburo cementado (YG8): HV 1450-1550.

Acero endurecido (45#): HV 500-700.

de aluminio : HV 50-150.

8.2 Evaluación de la desviación

Los 5 puntos de sangría son <±3%, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de dureza excede los requisitos técnicos del material, se debe analizar la causa (como defectos de superficie, desajuste de carga).

8.3 Análisis de factores influyentes

Selección de carga: si la carga es demasiado baja (<0,098 N), es posible que no se forme una sangría clara; si la carga es demasiado alta (>2942 N), la muestra puede deformarse.

Calidad de la superficie: Una rugosidad de la superficie Ra > 0,1 μm dará como resultado valores de dureza más bajos (desviación > 5 %).

de permanencia : un tiempo <5 s o >60 s afectará el tamaño de la sangría (desviación ±2%).

Espesor de la muestra: Un espesor <1,5 × longitud diagonal de sangría generará un efecto de soporte y un valor de dureza alto (desviación >10%).

9 Informe de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, carga (N), tiempo de retención (s), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

Resultados de la prueba: longitud diagonal promedio de cada sangría (d), valor de dureza (HV), valor de dureza promedio y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos del material.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Vickers para materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	Dureza Vickers (HV)	Carga típica (N)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG8	1450-1550	294.2	Herramientas de corte
acero endurecido	45# (HRC 50)	500-700	294.2	Piezas mecánicas
Aleación de aluminio	6061-T6	50-150	9.807	Estructuras aeroespaciales
hierro fundido	HT250	200-300	98.07	Bloque de motor

Apéndice B (Apéndice informativo) Tabla de la relación entre la dureza Vickers y la carga

Carga(N)	Símbolo de dureza	Rango de longitud diagonal de sangría (mm)	Materiales aplicables
0.098	Alto voltaje 0.01	0,020-0,050	Paredes delgadas o especímenes pequeños
9.807	Alto voltaje 1	0,050-0,150	Metales blandos (como el aluminio)
98.07	HV 10	0,150-0,400	Materiales de dureza media (como el hierro fundido)
294.2	HV30	0,400-1,000	Aleación dura, acero
2942	HV 300	1.000-1.400	Materiales superduros

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Resumir

La norma ISO 6507-1:2018, «Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos», proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de dureza Vickers de materiales metálicos, garantizando

la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de muestras, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma es aplicable al control de calidad y la evaluación del rendimiento de materiales como el carburo cementado, el acero y las aleaciones de aluminio, proporcionando un soporte técnico fiable para campos de aplicación como la fabricación de maquinaria, la industria aeroespacial y la fabricación de moldes.

apéndice:

ISO 6507-1:2018

Materiales metálicos - Prueba de dureza Vickers

Parte 1: Métodos de prueba

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos (incluido el carburo cementado), aplicable a ensayos con un rango de fuerza de ensayo de 1,961 N (0,2 kgf₂) a 1177 N (120 kgf₂). Incluye ensayos de dureza Vickers macro (fuerza de ensayo de 9,807 N a 1177 N) y micro (fuerza de ensayo de 1,961 N a 9,807 N). Esta norma es aplicable a ensayos de dureza de diversos materiales metálicos, como acero, fundición, metales no ferrosos y carburo cementado, y proporciona procedimientos de ensayo, métodos de medición y requisitos para el procesamiento de resultados.

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 6507-2:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

ISO 6507-3:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 3: Calibración de bloques de referencia

ISO 376:2011 Materiales metálicos. Calibración de sistemas de medición de fuerza para máquinas de ensayos estáticos de tracción, compresión y empuje.

3 Términos y definiciones

Este documento se aplica a la norma ISO 3850:2018 (Terminología para carburos cementados) y las siguientes definiciones:

Dureza Vickers (HV) : Valor de dureza determinado por la relación entre la fuerza de prueba aplicada y el área de la superficie de sangría, con unidades de HV.

Fuerza de prueba (F) : Es la fuerza aplicada por el penetrador a la muestra, expresada en Newtons (N) o kilogramos-fuerza (kgf).

Sangría : Una sangría cuadrada formada en la superficie de la muestra por un penetrador de pirámide cuadrangular de diamante.

Longitud diagonal (d) : La longitud promedio de las dos diagonales de la sangría, en milímetros (mm).

4 Principio

La determinación de la dureza Vickers se basa en la aplicación de una fuerza de prueba específica, presionando un penetrador de diamante de pirámide cuadrangular (ángulo de vértice de 136°) sobre la superficie de la muestra, midiendo la longitud diagonal de la indentación y calculando el valor de dureza. El valor de dureza se calcula según la siguiente fórmula: $HV = 1,8544 \cdot F / d^2$

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

en:

HV es la dureza Vickers (unidad: kgf/mm^2 o N/mm^2),

F es la fuerza de prueba aplicada (unidad: N),

d es la longitud diagonal promedio de la sangría (unidad: mm).

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Vickers

Rango de fuerza de prueba: 1,961 N a 1,177 N, precisión $\pm 1,0\%$.

Penetrador: Pirámide cuadrangular de diamante, ángulo de vértice $136^\circ \pm 0,5^\circ$, radio de la punta $< 0,002$ mm.

Sistema de medición: Microscopio con aumento de $200\times$ a $500\times$, resolución $\leq 0,001$ mm.

Tiempo de carga: 10 a 15 segundos, precisión ± 1 segundo.

5.2 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30% a 70%, se recomienda $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Requisitos de la muestra

6.1 Forma y tamaño

La muestra debe ser lo suficientemente grande para garantizar que la sangría sea al menos 2,5 veces la longitud diagonal desde el borde y las sangrías adyacentes.

Espesor recomendado: al menos 0,5 veces la profundidad máxima de sangría correspondiente a la fuerza de prueba (aproximadamente $0,07 \times d$).

6.2 Preparación de la superficie

La rugosidad superficial $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$, debe ser plana, sin capa de óxido ni grietas.

Utilice papel de lija de diamante de 600# a 2500# para esmerilar y líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$ para pulir.

6.3 Número de muestras

Cada lote deberá contar con al menos 3 ejemplares, pudiendo aumentarse a 5 en casos especiales para asegurar la representatividad.

7 Procedimientos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Verificación de durómetros según ISO 6507-2, incluyendo calibración de fuerza de ensayo, indentador y sistema de medición.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.2 Condiciones de prueba

Seleccione la fuerza de prueba adecuada para el material (ver Tabla 1).

Asegúrese de que la superficie de la muestra esté limpia y libre de polvo o aceite antes de cargarla.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza y ajústela para que quede nivelada.

Seleccione una fuerza de prueba y aplique la carga durante 10 a 15 segundos.

Después de retirar la carga, se miden las longitudes de las dos diagonales de la sangría, d_1 y d_2 , utilizando un microscopio.

Calcula la longitud diagonal media $d = (d_1 + d_2) / 2$.

Mida al menos 3 ubicaciones diferentes en la muestra con un intervalo de $\geq 2,5$ mm.

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la dureza Vickers:

$$HV = \frac{1.8544 \cdot F}{d^2}$$

Calcular el promedio:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{n}$$

Donde HV_i es un valor de medición único y n es el número de mediciones.

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{n - 1}}$$

Asegúrese de que la desviación del valor medido sea $< \pm 2,0\%$.

8 Selección de la fuerza de prueba

Tipo de material Fuerza de prueba recomendada (N) Rango de dureza típico (HV)

carburo cementado 9.807 - 98.07 1000 - 2000

acero endurecido 9.807 - 294.2 500 - 1000

metales no ferrosos 1.961 - 9.807 50 - 200

Nota: La fuerza de prueba debe seleccionarse de acuerdo con la dureza del material y el espesor de la muestra.

9 Evaluación de resultados

9.1 Rango de dureza

El valor de dureza debe ser consistente con las propiedades del material, por ejemplo, el rango de dureza del carburo cementado YG6 es 1400-1600 HV.

9.2 Evaluación de la desviación

los tres puntos de medición son $< \pm 2,0\%$ y la desviación estándar es < 20 HV, de lo contrario es

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

necesario volver a realizar la prueba.

9.3 Factores influyentes

Rugosidad de la superficie : $R_a > 0,2 \mu\text{m}$ puede resultar en un valor de dureza entre un 5% y un 10% menor.

Fuerza de prueba : una desviación de fuerza de $\pm 1,0 \%$ puede resultar en una desviación del 2 % al 3 % en el resultado.

Tiempo de carga : Los tiempos $< 10 \text{ s}$ o $> 15 \text{ s}$ pueden afectar la forma de la sangría.

10 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, tamaño.

Condiciones de prueba: modelo del probador de dureza, fuerza de prueba, tiempo de carga, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-70%).

Resultados de la prueba: valor de dureza en cada punto, valor medio, desviación estándar y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple los requisitos técnicos.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza de materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/Estado	Rango de dureza (HV)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG6	1400-1600	brocas para minería
acero endurecido	42CrMo	500-700	Componentes mecánicos
metales no ferrosos	Cu-ETP	50-100	materiales eléctricos

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales

Temperatura: 10°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 \text{ mm/m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 6507-2:2018

Materiales metálicos - Prueba de dureza Vickers

Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de verificación y calibración de máquinas de ensayo de dureza Vickers para determinar la dureza Vickers de materiales metálicos (incluidos los carburos cementados) de acuerdo con la norma ISO 6507-1. Abarca métodos de verificación directa e indirecta para garantizar la precisión y fiabilidad de las mediciones de dureza. Esta norma se aplica a máquinas de ensayo de dureza Vickers macro y micro con un rango de fuerza de ensayo de 1,961 N (0,2 kgf₂) a 1177 N (120 kgf₂), incluyendo los procedimientos periódicos de inspección y mantenimiento.

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 6507-1:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 1: Método de ensayo

ISO 6507-3:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 3: Calibración de bloques de referencia

Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración

3 Términos y definiciones

Este documento aplica los términos y definiciones dados en la norma ISO 6507-1:2018 e incluye las siguientes definiciones:

Verificación directa : El proceso de verificar el rendimiento de un probador de dureza Vickers midiendo directamente sus componentes, como la fuerza de prueba, la geometría del penetrador y el sistema de medición.

Verificación indirecta : el proceso de verificar el rendimiento de una máquina de prueba de dureza Vickers mediante la prueba de un bloque de referencia estandarizado.

Dureza Vickers (HV) : Valor de dureza determinado por la relación entre la fuerza de prueba aplicada y el área de la superficie de sangría, con unidades de HV.

Fuerza de prueba : Es la fuerza aplicada por el penetrador a la muestra, expresada en Newtons (N) o kilogramos-fuerza (kgf).

4 Requisitos generales

4.1 Alcance

Esta norma se aplica a todas las máquinas de ensayo de dureza Vickers, cubriendo el rango de fuerza de prueba de 1,961 N a 1,177 N, incluidas las máquinas manuales, semiautomáticas y completamente automáticas.

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

4.2 Responsabilidad

La verificación y calibración deberán ser realizadas por personal calificado u operadores capacitados de acuerdo con los requisitos de la norma ISO/IEC 17025.

4.3 Frecuencia

Verificación inicial : se realiza después de que se entrega o repara el durómetro.

Verificación periódica : al menos una vez cada 12 meses o después de un uso significativo (por ejemplo, 10 000 pruebas).

Inspección intermedia : Realice una inspección simple antes de cada uso para asegurarse de que las funciones básicas funcionen normalmente.

5 Verificación directa

5.1 Verificación de la fuerza de prueba

Equipo : Utilice un sensor de fuerza calibrado con una precisión de $\pm 0,5\%$.

programa :

Aplique una fuerza de prueba (1,961 N a 1,177 N) y registre el valor de fuerza real.

Asegúrese de que la desviación del valor de fuerza esté dentro de $\pm 1,0\%$.

Registro : Registre el valor de fuerza y la desviación de cada medición.

5.2 Verificación de la geometría del penetrador

Equipo : Utilice un microscopio óptico o un método de comparación de sangría estándar con un aumento de $\geq 200\times$.

programa :

Verifique el ángulo superior del penetrador de diamante ($136^\circ \pm 0,5^\circ$) y el radio de la punta ($< 0,002$ mm).

Asegúrese de que el penetrador no esté agrietado ni desgastado.

Registro : Registre los parámetros del cabezal de presión y los resultados de la inspección.

5.3 Verificación del sistema de medición

Equipo : Utilice un microscopio calibrado con una resolución de $\leq 0,001$ mm.

programa :

Mida la longitud diagonal de la sangría estándar, con una desviación de $\leq \pm 0,5\%$.

Verifique la consistencia del sistema de medición en todo el rango de aumento.

Registro : Registre las medidas y desviaciones de la longitud diagonal.

6 Verificación indirecta

6.1 Requisitos del bloque de referencia

Utilizando bloques de referencia calibrados según la norma ISO 6507-3, el rango de dureza cubre valores típicos dentro del rango de fuerza de prueba.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La rugosidad de la superficie del bloque de referencia es $Ra \leq 0,2 \mu m$.

6.2 Procedimiento de prueba

Preparación : Seleccione al menos 5 bloques de referencia con diferentes valores de dureza.

operar :

Se realizaron al menos 5 mediciones en cada bloque de referencia, con un intervalo de $\geq 2,5 mm$.

Registre el valor de dureza para cada medición.

calcular :

Calcular el valor medio de dureza y la desviación estándar.

Asegúrese de que el valor medido esté dentro del $\pm 2,0 \%$ del valor de calibración del bloque de referencia.

6.3 Evaluación de resultados

Si la desviación supera el $\pm 2,0\%$, será necesario ajustar o reparar el probador de dureza y volver a verificarlo.

7 Calibración

7.1 Ciclo de calibración

La calibración debe realizarse después de cada verificación directa o después de una falla de verificación indirecta.

Se recomienda calibrar una vez al año o ajustar según la frecuencia de uso.

7.2 Procedimiento de calibración

Calibración de fuerza de prueba : utilice pesas estándar para ajustar el valor de fuerza, la desviación es $< \pm 0,5\%$.

Calibración del penetrador : reemplace o esmerile el penetrador para garantizar que la geometría cumpla con los requisitos.

Calibración del sistema de medición : Utilice una escala estándar para ajustar el microscopio, con una desviación de $< \pm 0,2\%$.

7.3 Certificado de calibración

Proporcionar certificado de calibración que incluya el número de equipo, la fecha de calibración, la firma del operador y el análisis de incertidumbre.

8 Mantenimiento y registros

8.1 Mantenimiento

Limpie periódicamente el cabezal de presión y el sistema de medición para evitar el polvo o el aceite. Revise las conexiones eléctricas y las piezas mecánicas para asegurarse de que no haya nada suelto.

8.2 Registros

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mantener registros de cada verificación y calibración durante al menos 5 años, incluidos los datos brutos y el análisis de resultados.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Modelo y número de serie del durómetro.

Fecha de prueba y condiciones ambientales (temperatura 10°C a 35°C, humedad 30%-70%).

Verificación directa de resultados (fuerza de prueba, penetrador, datos del sistema de medición).

Resultados de verificación indirecta (número de bloque de referencia, valor de medición, desviación).

Resultados de la calibración (datos antes y después del ajuste, incertidumbre).

Firma de la persona que verifica y calibra.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de los parámetros de verificación típicos

Fuerza de prueba (N)	de fuerza (%)	Desviación del ángulo superior del penetrador (°)	Desviación del sistema de medición (%)
9.807	±1.0	±0,5	±0,5
98.07	±1.0	±0,5	±0,5
1177	±1.0	±0,5	±0,5

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales

Temperatura: 10°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 6507-2:2018 "Materiales metálicos - Ensayo de dureza Vickers, Parte 2: Verificación y calibración de durómetros" proporciona un procedimiento estandarizado internacional para la verificación y calibración de máquinas de ensayo de dureza Vickers, garantizando la precisión y fiabilidad de los resultados de las mediciones mediante métodos directos e indirectos. La implementación de esta norma contribuye a mejorar el control de calidad de los ensayos de dureza y proporciona soporte técnico para la evaluación del rendimiento de materiales metálicos (incluido el carburo cementado).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 6507-3:2018

Materiales metálicos - Prueba de dureza Vickers

Parte 3: Estándares de calibración

1 Alcance

Esta norma especifica el método de calibración de bloques estándar para la prueba de dureza Vickers para asegurar la precisión y trazabilidad de los valores de dureza. Es aplicable a la prueba de dureza Vickers de materiales metálicos (incluyendo carburo cementado). El rango de dureza de los bloques estándar cubre 20 HV a 2000 HV, y el rango de fuerza de prueba es de 1.961 N (0.2 kgf) a 1,177 N (120 kgf), incluyendo dureza macro Vickers (fuerza de prueba 9.807 N a 1,177 N) y dureza micro Vickers (fuerza de prueba 1.961 N a 9.807 N). Esta norma es aplicable a laboratorios de calibración y usuarios de probadores de dureza para verificar el rendimiento de las máquinas de prueba de dureza Vickers.

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 6507-1:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 1: Método de ensayo

ISO 6507-2:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración

3 Términos y definiciones

Este documento aplica los términos y definiciones dados en la norma ISO 6507-1:2018 e incluye las siguientes definiciones:

Bloque estándar : un bloque de metal con un valor de dureza conocido y una microestructura uniforme que se utiliza para calibrar una máquina de prueba de dureza Vickers.

Calibración : Proceso de determinar el valor de dureza y su incertidumbre de un bloque estándar en comparación con un estándar de grado superior.

Trazabilidad : Propiedad de relacionar los resultados de las mediciones con normas internacionales o nacionales a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones.

Dureza Vickers (HV) : Valor de dureza determinado por la relación entre la fuerza de prueba aplicada y el área de la superficie de sangría, con unidades de HV.

4 Requisitos de bloque estándar

4.1 Requisitos de material

El material del bloque estándar debe tener una microestructura uniforme con una desviación de dureza de $\leq \pm 1,0\%$.

Materiales comunes: acero endurecido, carburo cementado o aleaciones de cobre en el rango 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

dureza de 20 HV a 2000 HV.

Rugosidad superficial $Ra \leq 0,1 \mu m$, sin grietas, capa de óxido o inclusiones.

4.2 Requisitos de tamaño

Tamaño recomendado: diámetro 50 mm o 50×50 mm, espesor ≥ 6 mm (macro-Vickers) o ≥ 1 mm (micro-Vickers).

La desviación de planitud de la superficie de prueba es $<0,005$ mm.

4.3 Uniformidad de dureza

La desviación de dureza de la superficie de prueba del bloque estándar es $<\pm 1,0\%$, verificada midiendo al menos 5 puntos.

5. Equipo de calibración

5.1 Probador de dureza Vickers

Cumple con los requisitos de la norma ISO 6507-2, precisión de fuerza de prueba $\pm 0,5\%$, ángulo superior del penetrador $136^\circ \pm 0,5^\circ$.

La resolución del sistema de medición es $\leq 0,001$ mm y la desviación es $<\pm 0,5\%$.

5.2 Control ambiental

Temperatura: $20^\circ C \pm 1^\circ C$.

Humedad: 30% a 70%, se recomienda $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

5.3 Equipo de referencia para calibración

Utilizando bloques estándar de grado superior reconocidos a nivel nacional o internacional, la incertidumbre de dureza es $<\pm 0,5\%$.

6 Procedimiento de calibración

6.1 Preparación

Limpie la superficie del bloque estándar para asegurarse de que no haya polvo ni aceite.

Calibrar los probadores de dureza Vickers de acuerdo con la norma ISO 6507-2.

6.2 Condiciones de prueba

Seleccionar la fuerza de prueba: de acuerdo con el rango de dureza del bloque estándar (ver Tabla 1).

Tiempo de carga: 10 a 15 segundos, precisión ± 1 segundo.

6.3 Operación de calibración

Mida al menos 5 posiciones distribuidas uniformemente en la superficie de prueba del bloque estándar, con un intervalo de $\geq 2,5$ mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

midieron d_1 y d_2 de cada sangría y el valor promedio $d = (d_1 + d_2) / 2$. Se calculó $d/2$.

Calcular la dureza Vickers: $HV = 1,8544 \cdot F/d^2$

Donde F es la fuerza de prueba (N) y d es la longitud diagonal promedio (mm).

6.4 Procesamiento de resultados

Calcular el valor de dureza promedio de 5 puntos de medición:

$$\bar{HV} = \frac{\sum HV_i}{5}$$

Calcular la desviación estándar:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (HV_i - \bar{HV})^2}{4}}$$

Asegúrese de que la desviación de dureza sea $\leq \pm 1,0\%$ y la desviación estándar < 5 HV.

7 Selección de la fuerza de prueba

Rango de dureza (HV)	Fuerza de prueba recomendada (N)	Tipo de aplicación
20 - 200	1.961 - 9.807	Vickers microscópico
200 - 1000	9.807 - 98.07	Macro Vickers
1000 - 2000	98.07 - 294.2	Prueba de carburo

8 Evaluación de la incertidumbre

8.1 Fuentes de incertidumbre

Desviación de la fuerza de prueba: $\pm 0,5\%$ puede resultar en una desviación de dureza de $\pm 1,0\%$.

Desviación de medición diagonal: $\pm 0,5\%$ puede resultar en una desviación de dureza de $\pm 1,0\%$.

Fluctuaciones de temperatura: $\pm 1^\circ\text{C}$ puede resultar en una desviación de dureza de $\pm 0,5\%$.

8.2 Cálculo de la incertidumbre

Incetidumbre integral U (incertidumbre expandida, $k=2$):

$$U = 2 \cdot \sqrt{u_{\text{force}}^2 + u_{\text{diagonal}}^2 + u_{\text{temp}}^2}$$

Incetidumbre típica: $\pm 2\%$ (aprox. ± 20 HV para valores de dureza de 1000 HV).

9 Certificado de calibración

El certificado de calibración debe contener lo siguiente:

Número de bloque estándar e información del material.

Fecha de calibración y condiciones ambientales (temperatura $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, humedad 30%-70%).

Fuerza de prueba y valor de dureza, valor medio y desviación estándar de 5 puntos de medición.

Análisis de incertidumbre (incertidumbre expandida, $k=2$).

Nombre y firma del organismo de calibración.

10 Mantenimiento y uso de bloques estándar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Mantenimiento

Conservar en un desecador para evitar oxidación o contaminación.

Revise regularmente el estado de la superficie. Si la rugosidad superficial Ra es $> 0,1 \mu\text{m}$, es necesario pulirla nuevamente.

10.2 Uso

Limpie la superficie antes de cada uso para evitar que el polvo o el aceite afecten la medición.

Después de usarse más de 100 veces es necesaria una recalibración.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza de bloques estándar típicos

Tipo material	de Rango de dureza (HV)	Fuerza de prueba (N)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	1400-1600	98.07	Calibración de la prueba de carburo
acero endurecido	500-700	49.03	Prueba de calibración de acero
Aleación de cobre	50-100	4.903	Calibración para pruebas de metales no ferrosos

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales

Temperatura: $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02 \text{ mm/m}$.

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:

ISO 3327:2009

Método de ensayo para la resistencia a la compresión del carburo cementado

Metales duros : determinación de la resistencia a la ruptura transversal

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la resistencia a la ruptura transversal del carburo cementado mediante un ensayo de flexión de tres o cuatro puntos a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C), incluyendo el principio del ensayo, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos del ensayo, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe del ensayo, etc. Esta norma es aplicable al carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión, y también al carburo cementado con otros carburos (como TaC , TiC , VC). Esta norma no se aplica al carburo cementado revestido ni al carburo cementado después del refuerzo de la superficie (como la prueba de resistencia a la compresión de la capa carburizada).
Nota: En esta norma, la "resistencia a la compresión" se interpreta como resistencia a la rotura transversal (TRS) según las necesidades del usuario. Dado que la resistencia a la compresión del carburo cementado suele ser mucho mayor que su resistencia a la flexión, la norma ISO 3327:2009 se centra principalmente en el ensayo de resistencia a la rotura transversal.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3878:1983 Carburo cementado: prueba de dureza Vickers y dureza Rockwell

ISO 4506:1979 Carburo cementado — Preparación de muestras de prueba y condiciones de prueba

ISO 3611:2010 Carburo cementado — Terminología

ISO 7500-1:2015 Materiales metálicos. Normas de fuerza para ensayos de tracción y compresión. Parte 1: Normas de fuerza de calibración.

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3611:2010 y los siguientes términos y definiciones:

Metales duros : Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

Resistencia a la ruptura transversal (TRS): la tensión máxima que soporta una muestra de carburo cementado en una prueba de flexión de tres o cuatro puntos, medida en MPa, refleja la capacidad del material para resistir la fractura por flexión.

Flexión de tres puntos: Ensayo de flexión en el que se aplica una carga de un solo punto a la muestra en dos puntos de apoyo.

Flexión de cuatro puntos: Ensayo de flexión en el que se aplica una carga uniforme a la muestra entre dos puntos de apoyo y dos puntos de carga.

4 Principio 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

El ensayo de resistencia a la rotura transversal aplica una carga de flexión en tres o cuatro puntos a la muestra de carburo cementado hasta su rotura. Se registra la carga máxima de rotura y se calcula la resistencia a la rotura transversal (TRS) según la geometría de la muestra. La fórmula de cálculo varía según el tipo de ensayo:

Flexión en tres puntos:

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Flexión de cuatro puntos:

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

en:

F es la carga máxima de rotura, en N;

L es la distancia entre apoyos, en mm;

l_1 es la distancia entre los puntos de carga, en mm (sólo para flexión de cuatro puntos);

b es el ancho de la muestra, en mm;

h es el espesor de la muestra en mm.

5 Equipo de prueba

5.1 Máquina de pruebas universal

Rango de carga: 0-50 kN , precisión $\pm 0,5\%$.

Control de velocidad de carga: 0,1-1 mm/min, desviación $< \pm 0,05$ mm/min.

Cumple con los requisitos de calibración ISO 7500-1:2015.

5.2 Accesorio

Dispositivo de flexión de tres puntos: distancia entre apoyos 14,5 mm ($\pm 0,05$ mm), diámetro del punto de apoyo 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

Dispositivo de flexión de cuatro puntos: distancia entre puntos de apoyo 20 mm ($\pm 0,05$ mm), distancia entre puntos de carga 10 mm ($\pm 0,05$ mm), diámetro del punto de apoyo 2 mm ($\pm 0,02$ mm).

La superficie del accesorio es lisa y no tiene bordes ni esquinas.

5.3 Herramientas de medición

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm.

Micrómetro digital: precisión $\pm 0,001$ mm.

5.4 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones $20 \times 6,5 \times 5,25$ mm ($\pm 0,05$ mm), o ajustada según el protocolo.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado.

Rugosidad superficial $R_a < 0,2$ μm (pulida).

Los bordes de las muestras fueron biselados $0,1 \times 45^\circ$ para reducir la concentración de tensión.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 5 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($>5\%$), el número de muestras debe aumentarse a 10.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

La máquina de pruebas universal se calibra utilizando un sensor de fuerza estándar con una desviación de carga de $\leq \pm 0,5\%$.

Verifique la precisión del accesorio, la desviación del espaciado del punto de apoyo es $\leq \pm 0,05$ mm.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Coloque la muestra en un dispositivo de flexión de tres o cuatro puntos, asegurándose de que la muestra esté nivelada.

Velocidad de carga: $0,5$ mm/min ($\pm 0,05$ mm/min).

Cargue lentamente hasta que la muestra se rompa y registre la carga de rotura máxima F_F (N).

Utilice un calibrador vernier o un micrómetro para medir el ancho de la muestra b y el espesor h (precisión $\pm 0,02$ mm).

7.4 Cálculo de resultados

Calcular la resistencia a la rotura transversal según el tipo de ensayo:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Flexión en tres puntos:

$$TRS = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Flexión de cuatro puntos:

$$TRS = \frac{3FL}{4bh^2} \times \frac{l_1}{l}$$

Tome el valor promedio de 5 muestras, con una desviación de $\leq \pm 5\%$.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de resistencia a la ruptura transversal

La resistencia a la ruptura transversal del carburo cementado suele ser de 1500 a 3000 MPa, y el rango específico depende del grado y el contenido de Co:

YG6 (6% Co): 2000-2400 MPa.

YG8 (8% Co): 1800-2200 MPa.

YT15 (5% Co + TiC) : 1600-2000 MPa.

8.2 Evaluación de la desviación

las 5 muestras son $\leq \pm 5\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de TRS excede los requisitos técnicos del grado, se debe analizar la causa (como defectos de la muestra, carga desigual).

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la muestra: una rugosidad de la superficie $Ra > 0,2 \mu m$ o astillamiento del borde dará como resultado una TRS baja (desviación $> 10\%$).

Velocidad de carga: Velocidades $> 1 \text{ mm/min}$ o $< 0,1 \text{ mm/min}$ afectarán la carga de rotura (desviación $\pm 5\%$).

Precisión de fijación: una desviación del espaciado de los puntos de apoyo $> 0,05 \text{ mm}$ o irregularidades provocarán una concentración de tensión (desviación $> 5\%$).

Microestructura: Un tamaño de grano de WC desigual ($> \pm 0,2 \mu m$) o una distribución desigual de la fase Co pueden provocar fluctuaciones de TRS ($> \pm 6\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño, contenido de Co.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, tipo de fijación (tres puntos/cuatro puntos), velocidad de carga ($0,5 \text{ mm/min}$), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30% - 80%).

F de cada muestra F, ancho b b b, espesor h h, valor TRS y valor medio, desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos de la marca.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de la resistencia a la fractura

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

transversal de carburos cementados típicos

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Resistencia a la ruptura transversal (MPa)	Tamaño de grano (μm)	Aplicaciones típicas
YG6	6	2000-2400	0,8-1,2	brocas para minería
YG8	8	1800-2200	0,8-1,2	Herramientas de corte
YT15	5	1600-2000	0,6-1,0	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Comparación de la flexión de tres y cuatro puntos

parámetro	Flexión de tres puntos	Flexión de cuatro puntos
Luz de soporte L L Yo	14,5 mm (±0,05 mm)	20 mm (±0,05 mm)
Espaciado de puntos de carga l l l_1 l1	-	10 mm (±0,05 mm)
Distribución de tensiones	Centrarse en el punto de carga	Uniformidad en el rango de carga
Ámbito de aplicación	Pruebas estándar	Análisis de tensiones complejas

Resumir

La norma ISO 3327:2009, "Método de ensayo para la resistencia a la compresión del carburo cementado" (en realidad , ensayo de resistencia a la rotura transversal), proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de resistencia a la rotura transversal del carburo cementado y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de muestras, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma facilita el control de calidad y la evaluación del rendimiento del carburo cementado, y proporciona soporte técnico fiable para aplicaciones como herramientas de corte, perforadoras mineras y moldes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 28080:2021

Método de prueba de desgaste de carburo cementado

Metales duros : pruebas de abrasión para metales duros

1 Alcance

Esta norma especifica un método de ensayo general para determinar las características de desgaste del carburo cementado. El ensayo es adecuado para entornos de laboratorio donde es necesario simular daños por desgaste. El procedimiento de ensayo incluye información sobre ensayos en diferentes condiciones:

a) utilizando muelas opuestas de diferente rigidez (como muelas de acero o de caucho); b) ensayos en húmedo y en seco; c) abrasivos de diferentes tamaños de partícula; d) diferentes entornos químicos. Esta norma es aplicable a carburos cementados con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase aglutinante, así como a carburos cementados con la adición de otros carburos (como TaC, TiC, VC). Esta norma no se aplica a carburos cementados recubiertos ni a carburos cementados después del refuerzo de la superficie (como la prueba de desgaste de la capa carburizada).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

ISO 3878:1983 Carburo cementado — Prueba de dureza Vickers

ISO 3611:2010 Carburo cementado — Terminología

Método de prueba estándar ASTM G65-04(2010): Prueba de abrasión con rueda de caucho y arena seca

Método de prueba estándar ASTM B611-13 para la resistencia al desgaste por alta tensión de materiales duros

Método de prueba estándar ASTM G105-02(2013) - Prueba de abrasión con rueda de caucho y arena húmeda

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ISO 3611:2010 y los siguientes términos y definiciones:

Metales duros : Material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

Abrasión: Pérdida de material causada por el deslizamiento relativo de partículas duras o superficies rugosas.

Tasa de desgaste: Volumen o masa de material perdido por unidad de tiempo o unidad de distancia de deslizamiento, expresado en mm³/m o mg/m.

Contracara Rueda: La rueda que entra en contacto con la muestra y produce un movimiento relativo, que puede ser de acero o de caucho.

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

Abrasivo: Partículas duras como arena de cuarzo u óxido de aluminio que se utilizan para simular el desgaste.

4 Principio de prueba

La prueba de desgaste consiste en poner en contacto la muestra de carburo con la rueda opuesta bajo condiciones específicas, aplicar una carga y una distancia de deslizamiento determinadas, utilizar abrasivos (como arena seca o húmeda) para simular el entorno de desgaste, medir la pérdida de masa o volumen de la muestra y calcular la tasa de desgaste. Este método de prueba se basa y complementa las normas ASTM G65 (arena seca /rueda de caucho), ASTM B611 (desgaste por alta tensión) y ASTM G105 (arena húmeda/rueda de caucho), y es aplicable a diferentes condiciones de desgaste.

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de desgaste

Dispositivo de prueba de desgaste con carga ajustable, rango de carga 5-130 N, precisión $\pm 0,5$ N.

Velocidad de deslizamiento: 0,1-1 m/s, desviación $\leq \pm 0,05$ m/s.

Distancia de deslizamiento: se puede configurar hasta 1000 m, precisión ± 1 m.

5.2 Ruedas opuestas

Rueda de acero: dureza HRC 55-60, diámetro 228 mm (± 1 mm), ancho 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

Rueda de caucho: dureza Shore A 60-65, diámetro 228 mm (± 1 mm), ancho 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

5.3 Sistema de suministro de abrasivo

de partícula 200-300 μm) u óxido de aluminio (tamaño de partícula 100-200 μm) , pureza $>98\%$.

Velocidad de alimentación: 250-300 g/min, desviación $\leq \pm 5$ g/min (seco).

Prueba húmeda: suspensión a base de agua, concentración abrasiva 10-20 % en peso .

5.4 Herramientas de medición

Balanza de precisión: precisión $\pm 0,1$ mg.

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm.

Perfilador de superficies: mide la profundidad de desgaste con una precisión de $\pm 0,001$ mm.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Ambientes químicos controlados (como soluciones ácidas o alcalinas).

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones $76 \times 25,4 \times 6,35$ mm ($\pm 0,1$ mm), o ajustada según el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protocolo.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado. Rugosidad superficial $Ra < 0,2 \mu m$ (pulida).

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($>10\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, la marca (como YG8, YT15) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

Después de la prueba, se utilizó un limpiador ultrasónico (40 kHz, 5 min) para eliminar el abrasivo residual.

6.5 Medición inicial

Mida la masa inicial (precisión $\pm 0,1$ mg) y el espesor (precisión $\pm 0,02$ mm) de la muestra.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

El comprobador se calibra utilizando una carga estándar con una desviación de $< \pm 0,5$ N.

Verifique el estado de las ruedas opuestas para asegurarse de que no haya desgaste ni contaminación en la superficie.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$, se recomienda $20 \pm 5^{\circ}C$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Entorno químico: Seleccionar según el protocolo (por ejemplo, agua desionizada, HCl al 1%).

7.3 Operación de prueba

Monte la muestra en el comprobador, póngala en contacto con la rueda opuesta y aplique una carga (se recomiendan 45 N).

Seleccionar condiciones de prueba:

Tipo seco: utilizando rueda de acero, alimentación de arena de cuarzo 250 g/min, distancia de deslizamiento 4300 m.

Tipo húmedo: utiliza ruedas de goma, suspensión con alimentación de arena húmeda, distancia de deslizamiento 4300 m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ponga en marcha el comprobador y registre la distancia de deslizamiento y el desgaste de la muestra. Cada muestra se probó una vez y se repitió de 3 a 5 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

7.4 Medición de resultados

Después de la prueba, las muestras se limpiaron, se secaron y se midió la masa final (precisión $\pm 0,1$ mg).

La profundidad de desgaste se midió utilizando un perfilómetro de superficie (precisión $\pm 0,001$ mm).

Calcular la pérdida de masa: $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 es la masa inicial, m_1 es la masa final).

7.5 Cálculo de la tasa de desgaste

Tasa de desgaste:

$$W = \frac{\Delta m}{L}$$

en:

W es la tasa de desgaste, en mg/m;

Δm es la pérdida de masa, en mg;

L es la distancia de deslizamiento en metros.

O calcular la tasa de desgaste del volumen (es necesario combinar la densidad):

$$V = \frac{\Delta m}{\rho \cdot L}$$

en:

V es la tasa de desgaste volumétrico, en mm^3/m ;

ρ es la densidad del material en g/cm^3 .

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de tasa de desgaste

Las tasas de desgaste del carburo varían según las condiciones de prueba y el grado:

YG6 (6% Co): seco 0,5-1,0 mg/m, húmedo 0,3-0,7 mg/m.

YG8 (8% Co): tipo seco 0,7-1,2 mg/m³, tipo húmedo 0,5-0,9 mg/m³.

YT15 (5% Co + TiC) : seco 0,4-0,8 mg/m, húmedo 0,2-0,6 mg/m.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $\leq \pm 10\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la tasa de desgaste excede el rango esperado, es necesario analizar la causa (como tamaño desigual de partículas abrasivas y defectos superficiales de la muestra).

8.3 Análisis de factores influyentes

Rigidez de las ruedas opuestas: La tasa de desgaste de las ruedas de acero es mayor que la de las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ruedas de goma (desviación > 20%).

Tamaño de partícula abrasiva: Los tamaños de partículas > 300 μm aumentan la tasa de desgaste (desviación > 15%).

Entorno químico: Los entornos ácidos (como HCl al 1%) acelerarán el desgaste corrosivo (desviación >30%).

Carga: Cargas > 130 N pueden provocar que la muestra se agriete y afectar los resultados.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: marca, número de lote, tamaño, contenido de Co.

Condiciones de prueba: modelo del equipo, tipo de rueda opuesta (acero/caucho), carga (N), distancia de deslizamiento (m), tipo de abrasivo y tamaño de partícula, entorno (húmedo/seco/químico).

Resultados de la prueba: masa inicial, masa final, pérdida de masa, tasa de desgaste, profundidad de desgaste y valor promedio, desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia típicos de la tasa de desgaste del carburo

Marca	Contenido de CO (% en peso)	Tasa de desgaste en seco (mg/m)	Tasa de desgaste húmedo (mg/m)	Aplicaciones típicas
YG6	6	0,5-1,0	0,3-0,7	brocas para minería
YG8	8	0,7-1,2	0,5-0,9	Herramientas de corte
YT15	5	0,4-0,8	0,2-0,6	Herramientas de acabado

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin entorno de gas corrosivo (a menos que se prueben entornos químicos específicos).

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Ejemplos de condiciones de prueba de desgaste

Tipo de prueba	Rueda opuesta	Carga(N)	Distancia de deslizamiento (m)	Abrasivo	ambiente
Seco	ruedas de acero	45	4300	Arena de cuarzo 250 μm	Aire

Tipo prueba	de	Rueda opuesta	Carga(N)	Distancia de deslizamiento (m)	Abrasivo	ambiente
Húmedo		Rueda de goma	45	4300	Arena húmeda 200 μm	agua
Químico		ruedas de acero	45	2000	Arena de cuarzo 250 μm	1% HCl

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Método de prueba estándar ASTM B611-13

— Resistencia al desgaste por alta tensión para materiales duros

1 Alcance

1.1 Este método de ensayo estándar está diseñado para evaluar la resistencia al desgaste por alta tensión de materiales duros, principalmente carburo, pero también es aplicable a cerámicas, cermets y recubrimientos duros a base de metal con una dureza superior a 55 HRC. Este método simula condiciones de desgaste por alta tensión en las que las partículas abrasivas se fracturan mediante el uso de una rueda de acero para forzar el contacto del abrasivo con la muestra, a diferencia de los ensayos de desgaste por baja tensión que utilizan ruedas de caucho (como los métodos G65, G105 y G75).

1.2 Este método de prueba utiliza una suspensión acuosa que contiene partículas de óxido de aluminio como medio abrasivo y fuerza el abrasivo a través de la superficie plana de la muestra por medio de una rueda de acero giratoria en contacto lineal con la rueda giratoria que está sumergida en la suspensión.

1.3 Cuando las unidades se dan en formato pulgada-libra, se hace referencia a las unidades SI y se dan los equivalentes aproximados entre paréntesis.

1.4 Esta norma no pretende abarcar todos los aspectos de seguridad. Es responsabilidad del evaluador establecer las prácticas de seguridad y salud adecuadas para cada situación específica y evaluar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias.

1.5 Esta norma internacional ha sido preparada de conformidad con los principios para la preparación de normas, directrices y recomendaciones internacionales del Comité de Obstáculos Técnicos al Comercio de la Organización Mundial del Comercio.

2 Importancia y uso

2.1 La extracción de minerales de la corteza terrestre suele requerir el uso de herramientas metálicas para romper la roca. Estas herramientas suelen estar recubiertas, revestidas o revestidas con materiales duros como el carburo. La perforación, la rotura y el movimiento de roca provocan un desgaste por alta tensión en el punto de contacto de la superficie de la herramienta con la roca, con una presión suficiente para romperla. Este método de ensayo simula estas condiciones y se utiliza para seleccionar nuevos materiales para dichas aplicaciones. También puede utilizarse como herramienta de control de calidad para aplicaciones de desgaste por alta tensión, como bombas de lodos, equipos de trituración, cortadoras de reciclaje, equipos de demolición, etc.

2.2 La mayoría de las pruebas de desgaste utilizan el desgaste de baja tensión, donde el abrasivo permanece relativamente intacto durante la prueba. El desgaste de alta tensión simula un escenario

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

de aplicación donde las fuerzas entre el abrasivo y la herramienta/pieza son lo suficientemente grandes como para aplastarlo.

3 Términos y definiciones

Desgaste por alta tensión: Un tipo de desgaste en el que el abrasivo se rompe bajo una fuerza suficiente, causada por la rueda de acero que fuerza el contacto con la muestra.

Desgaste por baja tensión: Un tipo de desgaste en el que el abrasivo permanece relativamente intacto durante la prueba, generalmente causado por ruedas de goma.

Resistencia al desgaste: Capacidad de un material para resistir el desgaste, expresada como volumen de desgaste o pérdida de masa.

4 Equipo de prueba

4.1 Dispositivo de prueba de desgaste

Consiste en una rueda de acero giratoria (228,6 mm de diámetro, 12,7 mm de ancho) que gira a 200 ± 10 rpm.

El material de la rueda de acero es acero endurecido con una dureza de ≥ 60 HRC.

4.2 Abrasivo

Se utilizaron partículas de alúmina (Al_2O_3) con un tamaño de partícula de 200-280 mallas para preparar una suspensión acuosa con una concentración de volumen del 60%.

4.3 Fijación de la muestra

contacto lineal con la rueda de acero y la fuerza de carga es de 250 ± 5 N.

4.4 Control ambiental

Temperatura: 15°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad: 30% a 70%, se recomienda $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

5. Requisitos de la muestra

5.1 Materiales

Recubrimientos duros a base de carburo, cerámica, cermet o metal con dureza > 55 HRC.

5.2 Dimensiones

Tamaño de la muestra: $50,8 \text{ mm} \times 25,4 \text{ mm} \times 6,35 \text{ mm}$ (largo $\times$ ancho $\times$ alto), tolerancia $\pm 0,1 \text{ mm}$.

La superficie es lisa, con una rugosidad de $R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$.

5.3 Preparación de la superficie

Utilice papel de lija de diamante de 600# a 1200# para esmerilar y líquido de pulido de óxido de aluminio de $0,25 \mu\text{m}$ para pulir.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Número de muestras

Se utilizaron tres muestras de cada material para el análisis estadístico.

6 Procedimientos de prueba

6.1 Preparación del equipo

Revise la superficie de la rueda de acero para detectar desgaste evidente o grietas y reemplácela si es necesario.

Ajuste las mordazas de la muestra para garantizar que la fuerza de carga sea de 250 ± 5 N.

6.2 Operación de prueba

La muestra se fija en el dispositivo en contacto lineal con la rueda de acero.

Agregue 200 ml de suspensión de alúmina al aparato de prueba.

Gire la rueda de acero a 200 ± 10 rpm durante 600 revoluciones (aproximadamente 3 minutos).

Después de la prueba, saque la muestra, límpiela con etanol anhidro y séquela.

6.3 Medición

La pérdida de masa de las muestras se midió utilizando una balanza de precisión (precisión $\pm 0,001$ g).

Registre la masa inicial m_1 y la masa final m_2 , y calcule la pérdida de masa $\Delta m = m_1 - m_2$.

6.4 Repetibilidad

Repita la prueba dos veces para cada muestra y tome el valor promedio.

7 Cálculo del resultado

7.1 Tasa de desgaste

La tasa de desgaste se expresa como pérdida de masa (g) o pérdida de volumen (mm^3).

La pérdida de volumen se puede calcular dividiendo la pérdida de masa por la densidad del material:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

donde ρ es la densidad del material (g/cm^3).

7.2 Resistencia relativa al desgaste

La pérdida de masa de la muestra se compara con la pérdida de masa de un material de referencia (como el carburo cementado estándar) y se calcula la resistencia al desgaste relativa.

7.3 Evaluación de resultados

Asegúrese de que la desviación promedio de pérdida de masa de las tres muestras sea $\leq \pm 5\%$, de lo contrario será necesario volver a realizar la prueba.

8 Factores influyentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Tamaño de partícula abrasiva: La desviación del tamaño de partícula de malla 200-280 puede resultar en una desviación del 5%-10% en los resultados.

8.2 Fuerza de carga: Una desviación de fuerza de 250 ± 5 N puede afectar la tasa de desgaste en un 3%-5%.

8.3 Estado de la rueda de acero: El desgaste de la superficie de la rueda puede aumentar el error de prueba entre un 2% y un 4%.

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de la muestra: tipo de material, dureza, tamaño.

Condiciones de prueba: velocidad de la rueda, fuerza de carga, tipo de abrasivo, temperatura ambiente (15°C a 35°C), humedad (30 %-70 %).

Resultados de la prueba: masa inicial, masa final, pérdida de masa, media y desviación.

Resistencia relativa al desgaste (si aplica).

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia típicos de desgaste del material

Tipo de material	Dureza (HRC)	Pérdida de masa (g)	Aplicaciones típicas
cementado (YG6)	88	0,02-0,05	brocas para minería
cerámica	75	0,05-0,10	Recubrimiento resistente al desgaste
Revestimiento a base de metal	60	0,10-0,15	Equipos de trituración

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos ambientales

Temperatura: 15°C a 35°C , se recomienda $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Humedad: 30%-70%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación $< 0,02$ mm/m.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ASTM E23-18

Método de prueba de impacto de probeta con entalla

Métodos de prueba estándar para pruebas de impacto de barras con entalla de materiales metálicos

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la energía de absorción de impacto de muestras con entalla mediante ensayos de impacto Charpy o Izod a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C) o baja temperatura (-196 °C a 0 °C) para materiales metálicos, incluidos los principios de prueba, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos de prueba, el cálculo y la evaluación de resultados, el informe de prueba, etc. Esta norma es aplicable a materiales metálicos con diferentes tipos de entalla (como acero, carburo cementado, aleación de titanio, etc.), pero no a materiales no metálicos o entornos con temperaturas superiores a 35 °C.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las revisiones) a esta norma.

ASTM E4-21 Práctica estándar para la calibración de máquinas de prueba de fuerza, compresión y deformación

Método de prueba estándar ASTM E23-16c para pruebas de impacto de muestras con entalla (referencia de versión histórica)

ISO 148-1:2016 Materiales metálicos — Ensayo de impacto de péndulo Charpy Parte 1: Método de ensayo

Método de prueba estándar ASTM E2298-19 - Prueba de impacto instrumentada

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma ASTM E23-18 y los siguientes términos y definiciones:

Energía de impacto: La energía absorbida por la muestra entallada en la prueba de impacto, medida en julios (J), refleja la tenacidad del material al impacto.

Prueba Charpy: Prueba que utiliza una muestra de viga en voladizo para medir la absorción de energía por impacto de péndulo.

Prueba Izod: Prueba para determinar la absorción de energía por impacto de péndulo utilizando una probeta con una sola viga de soporte.

Tipo de muesca: Las formas de muesca prefabricadas en la muestra incluyen muesca en V (2 mm de profundidad, ángulo de 45°, radio de raíz de 0,25 mm) y muesca en U (5 mm de profundidad, radio de raíz de 1 mm).

4 Principio de prueba

La prueba de impacto consiste en soltar un péndulo desde una altura específica para impactar una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muestra metálica previamente entallada. Se mide la energía cinética restante (o pérdida de energía) tras la rotura de la muestra por el péndulo y se calcula la energía de impacto absorbida por esta. Esta energía refleja la tenacidad y el comportamiento a la fractura del material bajo cargas de alta velocidad. La prueba es aplicable a configuraciones Charpy o Izod, y su fórmula específica es:

$$E = mgh - mgh'$$

en:

E es la energía de absorción de impacto, en J;

m es la masa del péndulo, en kg;

g es la aceleración debida a la gravedad, aproximadamente 9,81 m/s² ;

h es la altura inicial, en metros;

h' es la altura restante después de la fractura, en metros (generalmente medida indirectamente por el ángulo del péndulo).

5 Equipo de prueba

5.1 Máquina de prueba de impacto

Probador de impacto de péndulo con rango de energía de 150 J a 750 J, precisión de ± 1 J, calibrado según ASTM E4-21.

Altura de liberación del péndulo: ajustable, ángulo inicial 150°.

5.2 Fijación de la muestra

Fijación Charpy: distancia entre apoyos 40 mm ($\pm 0,05$ mm), planitud de la superficie de apoyo $< 0,01$ mm.

Abrazadera Izod: soporte simple, altura 28 mm ($\pm 0,05$ mm), fuerza de sujeción uniforme.

5.3 Herramientas de medición

Calibrador Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Dispositivo de medición de ángulos: precisión $\pm 0,1^\circ$, utilizado para calibrar la posición del péndulo.

5.4 Equipo criogénico (opcional)

Caja de enfriamiento de nitrógeno líquido o hielo seco, rango de temperatura -196°C a 0°C , precisión $\pm 2^\circ\text{C}$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C (temperatura ambiente), o -196°C a 0°C (temperatura fría), se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Tipo de muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ejemplar Charpy: tamaño $55 \times 10 \times 10$ mm ($\pm 0,1$ mm), muesca en el centro.

Ejemplar Izod: Dimensiones: $75 \times 10 \times 10$ mm ($\pm 0,1$ mm), muesca situada a 28 mm de un extremo.

6.2 Preparación del hueco

Muesca en V: profundidad 2 mm ($\pm 0,025$ mm), ángulo 45° ($\pm 0,5^\circ$), radio de raíz 0,25 mm ($\pm 0,025$ mm).

Muesca en forma de U: profundidad 5 mm ($\pm 0,025$ mm), radio de raíz 1 mm ($\pm 0,025$ mm).

La superficie de la entalladura es lisa y sin rebabas, preparada mediante corte con alambre o fresado.

6.3 Requisitos de la muestra

La superficie de la muestra es lisa, sin grietas, capa de óxido ni defectos de procesamiento.

Rugosidad superficial $R_a < 0,2$ μm (pulida).

Los bordes de las muestras fueron biselados $0,1 \times 45^\circ$ para reducir la concentración de tensión.

6.4 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande (> 10 J), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.5 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

6.6 Marcado de muestra

Las muestras deben estar marcadas con el número de lote, el grado (como YG8, acero 1045) y los elementos de prueba, y la marca no debe afectar el área de prueba.

6.7 Tratamiento a baja temperatura (opcional)

Coloque la muestra en una caja de enfriamiento y mantenga la temperatura especificada durante 15 a 30 minutos para garantizar un enfriamiento uniforme.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

El comprobador de impacto se calibra utilizando un péndulo estándar con una desviación de energía de $< \pm 1$ J.

Verifique las dimensiones del accesorio y de la muesca, la desviación es $\leq \pm 0,025$ mm.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C (temperatura ambiente), o -196°C a 0°C (baja temperatura), se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7.3 Operación de prueba

Monte la muestra en el accesorio (configuración Charpy o Izzy) asegurándose de que la muesca esté orientada en la dirección del impacto del péndulo.

Suelte el péndulo y registre la energía del impacto E (J).

Cada muestra se probó una vez y se repitió de 3 a 5 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

Si se realizan pruebas a baja temperatura, la muestra se debe probar inmediatamente (<5 s) después de sacarla de la caja de enfriamiento.

7.4 Observación de la superficie de fractura (opcional)

Las superficies de fractura se observaron utilizando un microscopio óptico (aumento de $50\times$) y se registró el tipo de fractura (frágil o dúctil).

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de energía de absorción de impacto

Rango de energía de absorción de impacto de materiales metálicos: 5-200 J, el valor específico depende del material y la temperatura:

Carburo cementado (YG8, temperatura ambiente): 10-20 J.

Acero endurecido (1045, temperatura ambiente): 50-80 J.

Aleación de aluminio (6061-T6, temperatura ambiente): 20-40 J.

A bajas temperaturas (-40°C) el consumo energético se reduce normalmente entre un 20% y un 50%.

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $\leq \pm 10$ J, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor energético excede los requisitos técnicos del material, se deben analizar las razones (como la calidad de la entalla, defectos de la muestra).

8.3 Análisis de factores influyentes

Calidad de la entalla: un error en el radio de la raíz de la entalla $> 0,025$ mm o una rugosidad de la superficie $> 0,2$ μm reducirán la energía (desviación $> 15\%$).

Temperatura: Una disminución de temperatura de $> 20^{\circ}\text{C}$ reducirá significativamente la energía (desviación $> 30\%$).

Velocidad de carga: Una desviación de la velocidad del péndulo $> 0,05$ m/s afectará los resultados (desviación $\pm 5\%$).

Microestructura: Un tamaño de grano desigual ($> \pm 0,2$ μm) o una porosidad alta reducirán la tenacidad (desviación $> 10\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño, tipo de muesca (V/U).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de prueba: modelo del equipo, tipo de fijación (Charpy/Izod), temperatura de prueba (°C), humedad ambiente (30%-80%).

Resultados de la prueba: Energía de absorción de impacto E E de cada muestra E (J), valor medio y desviación, tipo de fractura (si se observa).

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos del material.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de energía de impacto de materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	Energía de impacto (J, temperatura ambiente)	Energía de impacto (J, 40 °C)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG8	10-20	5-10	Herramientas de corte
acero endurecido	1045 (HRC 30)	50-80	20-40	Piezas mecánicas
Aleación de aluminio	6061-T6	20-40	10-20	Estructuras aeroespaciales

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C (temperatura ambiente), o -196°C a 0°C (temperatura fría), se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Relación entre el tamaño de la brecha y la energía

Tipo de espacio	Profundidad (mm)	Ángulo (°)	Radio de la raíz (mm)	Impacto energético (%)
Tipo V	2	45	0,25	Puntos de referencia
forma de U	5	0	1.0	Aumento del 10%-20%

Resumir

La norma ASTM E23-18 "Método de ensayo de impacto de probetas con entalla" proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de tenacidad al impacto de materiales metálicos y garantiza la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de probetas, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma facilita la evaluación del rendimiento al impacto de materiales metálicos (como el carburo cementado y el acero) y proporciona soporte técnico fiable para campos de aplicación como la fabricación de maquinaria, la construcción y la energía.

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:

ASTM G65-16

Método de prueba de desgaste de ruedas de caucho/arena seca

Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando

Aparato de rueda de caucho/arena seca

1 Alcance

Esta norma especifica el método de laboratorio para medir la resistencia al desgaste por rayado de materiales metálicos mediante el ensayo de arena seca/rueda de caucho. Incluye los principios de ensayo, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos del ensayo, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe del ensayo, etc. Esta norma es aplicable al ensayo de resistencia al desgaste de materiales metálicos (incluido el carburo cementado, el acero, las aleaciones, etc.) y su objetivo es generar datos repetibles de clasificación de la resistencia al desgaste por rayado de materiales en condiciones específicas. Esta norma no es aplicable a materiales no metálicos ni pretende simular completamente las condiciones de trabajo reales (como entornos corrosivos o condiciones de impacto).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las revisiones) a esta norma.

ASTM E4-21 Práctica estándar para la calibración de máquinas de prueba de fuerza, compresión y deformación

Método de prueba estándar ASTM G105-02(2013) - Prueba de abrasión con rueda de caucho y arena húmeda

Método de prueba estándar ASTM B611-13 para la resistencia al desgaste por alta tensión de carburos cementados

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta ASTM G65-16 y los siguientes términos y definiciones:

Abrasión por rayado: Pérdida de material causada por el deslizamiento relativo de partículas duras sobre la superficie del material bajo una determinada presión.

Pérdida de volumen: El volumen de material perdido por la muestra después de la prueba de desgaste, en milímetros cúbicos (mm^3).

Tasa de desgaste: Volumen de material perdido por unidad de distancia de deslizamiento, expresado en mm^3/m .

Contracara Rueda: Rueda de goma que entra en contacto con la muestra y produce un movimiento relativo, con una dureza de Shore A 60-65.

Abrasivo: Partículas duras utilizadas para simular el desgaste, que en esta norma se refiere a arena seca (como arena de cuarzo).

4 Principio 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

La prueba de desgaste con rueda de caucho/arena seca evalúa la resistencia al desgaste del material poniendo en contacto la muestra metálica con una rueda de caucho giratoria en un entorno abrasivo de arena seca, aplicando una carga y una distancia de deslizamiento determinadas, y midiendo la pérdida de masa o volumen de la muestra debido al desgaste por rayado. Las condiciones de prueba están estandarizadas para garantizar la repetibilidad de los resultados, que se expresan en pérdida de volumen (mm^3). Los materiales con mayor resistencia al desgaste presentan menor pérdida de volumen.

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de desgaste

Dispositivo de rueda de caucho/arena seca con carga ajustable, rango de carga 5-130 N, precisión $\pm 0,5$ N.

Velocidad de deslizamiento: 0,1-1 m/s, desviación $< \pm 0,05$ m/s.

Distancia de deslizamiento: se puede configurar hasta 4300 m, precisión ± 1 m.

5.2 Rueda de goma

Dureza: Shore A 60-65.

Diámetro: 228 mm (± 1 mm), ancho 12,7 mm ($\pm 0,1$ mm).

La superficie está libre de defectos y necesita ser reemplazada periódicamente para garantizar su consistencia.

5.3 Sistema de suministro de abrasivo

Abrasivo: arena de cuarzo seca, tamaño de partícula 200-300 μm , pureza $> 98\%$.

Velocidad de alimentación: 250-300 g/min, desviación $< \pm 5$ g/min.

El flujo de arena se distribuye uniformemente a través de una boquilla de geometría estándar (ancho 1 mm).

5.4 Herramientas de medición

Balanza de precisión: precisión $\pm 0,1$ mg.

Calibre Vernier: precisión $\pm 0,02$ mm.

Perfilador de superficies: mide la profundidad de desgaste con una precisión de $\pm 0,001$ mm.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20 $\pm$ 5°C.

Humedad: 30%-80%, 50 $\pm$ 10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, dimensiones 76 $\times$ 25,4 $\times$ 6,35 mm ($\pm 0,1$ mm), o ajustada según el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

protocolo.

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado. Rugosidad superficial $Ra < 0,2 \mu m$ (pulida).

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($>10\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deberán estar marcadas con el número de lote, el grado (como acero YG8, AISI 1020) y el elemento de prueba, y el marcado no deberá afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

Después de la prueba, se utilizó un limpiador ultrasónico (40 kHz, 5 min) para eliminar el abrasivo residual.

6.5 Medición inicial

Mida la masa inicial (precisión $\pm 0,1$ mg) y el espesor (precisión $\pm 0,02$ mm) de la muestra.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

El comprobador se calibra utilizando una carga estándar con una desviación de $< \pm 0,5$ N.

Verifique el estado de la rueda de goma para asegurarse de que la superficie no esté desgastada ni contaminada.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$, se recomienda $20 \pm 5^{\circ}C$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50 \pm 10\%$.

Entorno de prueba: seco, sin medio líquido.

7.3 Operación de prueba

Esta norma proporciona cinco procedimientos de prueba (A, B, C, D, E), seleccionados según la resistencia al desgaste del material:

Procedimiento A: Prueba de alto desgaste, carga 130 N, velocidad de la rueda 200 rpm, distancia de deslizamiento 4300 m, adecuado para materiales con resistencia al desgaste media a alta.

Programa B: Variante de corta duración, carga 130 N, velocidad de la rueda 200 rpm, recorrido de deslizamiento 718 m, adecuado para materiales con baja y media resistencia al desgaste (utilizar cuando la pérdida de volumen $> 100 \text{ mm}^3$).

Programa C: Variante de corta duración, carga 130 N, velocidad de la rueda 200 rpm, recorrido de deslizamiento 71,8 m, adecuado para recubrimientos finos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Programa D: Variante de trabajo ligero, carga 45 N, velocidad de la rueda 200 rpm, distancia de deslizamiento 4300 m, adecuado para materiales con baja resistencia al desgaste.

Programa E: Variante de corta duración, carga 45 N, velocidad de la rueda 200 rpm, recorrido de deslizamiento 718 m, adecuado para materiales con baja y media resistencia al desgaste.

La muestra se monta en el probador, en contacto con la rueda de goma, y se aplica la carga. Ponga en marcha el comprobador y registre la distancia de deslizamiento y el desgaste de la muestra. Cada muestra se probó una vez y se repitió de 3 a 5 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

7.4 Medición de resultados

Después de la prueba, las muestras se limpiaron, se secaron y se midió la masa final (precisión $\pm 0,1$ mg).

La profundidad de desgaste se midió utilizando un perfilómetro de superficie (precisión $\pm 0,001$ mm).

Calcular la pérdida de masa: $\Delta m = m_0 - m_1$ (m_0 es la masa inicial, m_1 es la masa final).

7.5 Cálculo de pérdida de volumen

Pérdida de volumen:

$$V = \frac{\Delta m}{\rho}$$

en:

V es la pérdida de volumen en mm^3 ;

Δm es la pérdida de masa, en mg;

ρ es la densidad del material en g/cm^3 .

Tasa de desgaste:

$$W = \frac{V}{L}$$

en:

W es la tasa de desgaste en mm^3/m ;

L es la distancia de deslizamiento en metros.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de pérdida de volumen

El rango de pérdida de volumen en materiales metálicos varía según el procedimiento y el material:

Carburo cementado (YG8, procedimiento A): 10-20 mm^3 .

Acero dulce (AISI 1020, Procedimiento A): 50-100 mm^3 .

Materiales altamente resistentes al desgaste (Procedimiento B): 5-15 mm^3 .

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $< \pm 10\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si la pérdida de volumen excede el rango esperado, se debe analizar la causa (como tamaño desigual de partículas abrasivas y defectos superficiales de la muestra).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.3 Análisis de factores influyentes

Tamaño de partícula abrasiva: Los tamaños de partículas > 300 μm aumentarán la pérdida de volumen (desviación > 15%).

Carga: Cargas > 130 N pueden provocar que la muestra se agriete y afectar los resultados.

Dureza de la rueda de caucho: Una dureza > Shore A 65 aumentará el desgaste (desviación > 10%).

Microestructura: Un tamaño de grano desigual (>±0,2 μm) o una porosidad alta aumentarán la pérdida de volumen (desviación >10%) .

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño.

Condiciones de prueba: Modelo del equipo, tipo de procedimiento (A/B/C/D/E), carga (N), distancia de deslizamiento (m), tipo de abrasivo y tamaño de partícula, temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

Resultados de la prueba: masa inicial, masa final, pérdida de masa, pérdida de volumen (mm³) , tasa de desgaste (mm³/m), profundidad de desgaste y valor medio, desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con el rango esperado.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de pérdida de volumen de materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	Procedimiento A Pérdida de volumen (mm³)	Procedimiento B Pérdida de volumen (mm³)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG8	10-20	5-10	Herramientas de corte
Acero dulce	AISI 1020	50-100	20-40	Piezas estructurales
Recubrimiento de alta resistencia al desgaste	WC-10Co-4Cr	5-15	2-8	Equipos de minería

Apéndice B (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

Apéndice C (Apéndice informativo) Comparación de procedimientos de prueba

programa	Carga(N)	Distancia de deslizamiento	Ámbito de aplicación

		(m)	
A	130	4300	Materiales con resistencia al desgaste media a alta
B	130	718	Materiales de resistencia media y baja al desgaste
do	130	71.8	Recubrimiento fino
D	45	4300	Material de baja resistencia al desgaste
mi	45	718	Materiales de resistencia media y baja al desgaste



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

apéndice:

EN ISO 6507-1:2018
Prueba de dureza Vickers
Materiales metálicos

— Prueba de dureza Vickers — Parte 1: Método de prueba

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la dureza de materiales metálicos mediante el ensayo de dureza Vickers a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C), incluyendo el principio del ensayo, los requisitos del equipo, la preparación de la muestra, los pasos del ensayo, el cálculo y la evaluación de los resultados, el informe del ensayo, etc. Esta norma es aplicable al ensayo de dureza Vickers en el rango HV 1 a HV 3000, que abarca diferentes cargas (0,098 N a 2942 N). Esta norma no es aplicable al ensayo de dureza de muestras diminutas o de paredes delgadas (espesor < 0,1 mm) ni de materiales recubiertos.

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

EN ISO 6507-2:2018 Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 2: Verificación y calibración de durómetros.

EN ISO 6507-3:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 3: Estándares de calibración

EN ISO 376:2011 Materiales metálicos — Patrones de fuerza de calibración

EN ISO 18265:2013 Materiales metálicos — Conversión entre dureza y resistencia

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma EN ISO 6507-1:2018 y los siguientes términos y definiciones:

Dureza Vickers (HV): La capacidad de un material metálico para resistir la penetración de un penetrador Vickers, expresada como un valor de dureza Vickers en N/mm² (o MPa), calculado por la longitud diagonal de la sangría.

Penetrador Vickers: Un penetrador piramidal de diamante cuadrado con un ángulo de vértice de 136°.

Diagonal de sangría: La longitud de las dos diagonales de la sangría cuadrada que se forma cuando se presiona el penetrador Vickers en la superficie de la muestra, en mm.

Carga de prueba (F): La fuerza aplicada al penetrador Vickers en Newtons (N), que varía de 0,098 N a 2942 N.

de retención : el tiempo que se mantiene la carga después de que el penetrador aplica la carga, en segundos (s).

4 Principio de prueba

La prueba de dureza Vickers se realiza presionando un indentador de diamante Vickers estándar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(ángulo de vértice de 136°) sobre la superficie de una muestra metálica con una carga específica, manteniéndolo durante un tiempo determinado y luego descargándolo. Se mide la longitud de las dos diagonales de la indentación (d_1 , d_2), se calcula la longitud diagonal promedio (d) y, a continuación, se calcula el valor de dureza Vickers (HV). La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

en:

F es la carga de prueba, en N;

d de压痕两条对角线的平均长度, 单位为 mm, $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$;

La unidad de dureza es N/mm² (1 kgf /mm² $\approx$ 9,807 N/mm²).

5 Equipo de prueba

5.1 Probador de dureza Vickers

Cumple con los requisitos de verificación y calibración EN ISO 6507-2:2018.

Rango de carga: 0,098 N a 2942 N (HV 0,01 a HV 30), precisión $\pm 0,5$ %.

Control del tiempo de retención: 5 s a 60 s, desviación $\leq \pm 0,5$ s.

5.2 Altura de presión

Penetrador de diamante Vickers estándar, ángulo de vértice 136° ($\pm 0,5^\circ$).

La superficie del penetrador está libre de defectos y tiene bordes limpios (inspección al microscopio, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$).

5.3 Dispositivo de medición

Microscopio óptico: aumento 50×-1000×, se recomienda 400×, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Equipado con un sistema de lectura digital con una precisión de medición de $\pm 0,001$ mm.

5.4 Bloque de calibración

Bloques de calibración estándar según EN ISO 6507-3:2018, rango de dureza HV 100-3000, desviación $\leq \pm 2\%$.

La rugosidad de la superficie del bloque de calibración es $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Control ambiental

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

Humedad: 30%-80%, $50 \pm 10\%$ recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Requisitos de la muestra

Forma de la muestra: cuboide, cilindro u otra forma geométrica regular, área de superficie de prueba $> 5 \times 5$ mm, espesor $> 0,5$ mm (dependiente de la carga).

La superficie de prueba debe ser plana y libre de grietas, capas de óxido o defectos de mecanizado.

Rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (pulida), para pruebas de carga baja ($< 9,807$ N), $R_a < 0,05 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El espesor de la muestra deberá cumplir los siguientes requisitos: espesor $\geq 1,5 \times$ longitud diagonal de la sangría.

6.2 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($>3\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.3 Marcado de muestra

Las muestras deberán estar marcadas con el número de lote, el grado (como acero YG8, S235JR) y el elemento de prueba, y la marca no deberá afectar el área de prueba.

6.4 Limpieza de muestras

Antes de realizar la prueba, limpie la superficie de la muestra con etanol anhidro o acetona para eliminar el aceite y el polvo, y úsela después de secarla.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Utilice el bloque de calibración estándar para calibrar el durómetro. Seleccione el bloque de calibración adecuado para la carga de prueba. Realice 3 mediciones. La desviación de dureza es $<\pm 1\%$.

Verifique el estado del penetrador para asegurarse de que no haya desgaste ni defectos.

7.2 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20\pm 5^{\circ}\text{C}$.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado $50\pm 10\%$.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Selección de carga

Seleccione la carga en función de la dureza del material y el espesor de la muestra:

Carburo: se recomienda 294,2 N (30 kgf, HV 30).

Acero: 50 N a 294,2 N (HV 5 a HV 30).

Probetas de paredes delgadas: 0,098 N a 9,807 N (HV 0,01 a HV 1).

La carga debe garantizar que la longitud diagonal d de la sangría esté en el rango de 0,020 mm a 1,400 mm.

7.4 Operación de prueba

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza, asegurándose de que la superficie de prueba esté nivelada.

Seleccione una carga adecuada (por ejemplo, 294,2 N) y mantenga la carga durante 10 a 15 s (o ajústela según los requisitos del material).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El penetrador se presiona lentamente en la superficie de la muestra y se descarga automáticamente después de mantener la carga.

Se medirán 5 puntos de sangría para cada muestra, con una separación entre sangrías > 3 veces la longitud diagonal (> 0,3 mm) y una distancia desde el borde de la muestra > 0,5 mm.

7.5 Medición y cálculo

Las longitudes de las dos líneas diagonales de la sangría (d1, d2) se midieron utilizando un microscopio óptico con una precisión de ±0,001 mm.

Calcular la longitud diagonal media:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

Calcular la dureza Vickers:

$$HV = \frac{1.8544 \times F}{d^2}$$

Se toman cinco puntos de sangría como valor de dureza de la muestra, con una desviación de <±3%.

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de valores de dureza

Rango de dureza Vickers de materiales metálicos: HV 100-3000, el valor específico depende del material:

Carburo cementado (YG8): HV 1450-1550.

Acero endurecido (42CrMo4): HV 500-700.

Aleación de aluminio (6082-T6): HV 50-150.

8.2 Evaluación de la desviación

Los 5 puntos de sangría son <±3%, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.

Si el valor de dureza excede los requisitos técnicos del material, se debe analizar la causa (como defectos de superficie, desajuste de carga).

8.3 Análisis de factores influyentes

Selección de carga: si la carga es demasiado baja (<0,098 N), es posible que no se forme una sangría clara; si la carga es demasiado alta (>2942 N), la muestra puede deformarse.

Calidad de la superficie: Una rugosidad de la superficie Ra > 0,1 μm dará como resultado valores de dureza más bajos (desviación > 5 %).

de mantenimiento : Un tiempo <5 s o >60 s afectará el tamaño de la sangría (desviación ±2%).

Espesor de la muestra: Un espesor <1,5 × longitud diagonal de sangría generará un efecto de soporte y un valor de dureza alto (desviación >10%).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones de prueba: modelo del equipo, carga (N), tiempo de retención (s), temperatura ambiente (10°C a 35°C), humedad (30%-80%).

Resultados de la prueba: longitud diagonal promedio de cada sangría (d), valor de dureza (HV), valor de dureza promedio y desviación.

Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos del material.

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de dureza Vickers para materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	Dureza Vickers (HV)	Carga típica (N)	Aplicaciones típicas
carburo cementado	YG8	1450-1550	294.2	Herramientas de corte
acero endurecido	42CrMo4	500-700	294.2	Piezas mecánicas
Aleación de aluminio	6082-T6	50-150	9.807	Estructuras aeroespaciales
hierro fundido	EN-GJL-250	200-300	98.07	Bloque de motor

Apéndice B (Apéndice informativo) Tabla de la relación entre la dureza Vickers y la carga

Carga(N)	Símbolo de dureza	Rango de longitud diagonal de sangría (mm)	Materiales aplicables
0.098	Alto voltaje 0.01	0,020-0,050	Paredes delgadas o especímenes pequeños
9.807	Alto voltaje 1	0,050-0,150	Metales blandos (como el aluminio)
98.07	HV 10	0,150-0,400	Materiales de dureza media (como el hierro fundido)
294.2	HV30	0,400-1,000	Aleación dura, acero
2942	HV 300	1.000-1.400	Materiales superduros

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

La norma EN ISO 6507-1:2018 "Materiales metálicos - Ensayo de dureza Vickers" proporciona un procedimiento estandarizado para el ensayo de dureza Vickers de materiales metálicos, garantizando la precisión y repetibilidad de los resultados mediante la preparación de muestras, los pasos de ensayo y la evaluación de resultados estandarizados. La implementación de esta norma es aplicable al control de calidad y la evaluación del rendimiento de materiales como el carburo cementado, 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

acero y las aleaciones de aluminio, proporcionando un soporte técnico fiable para campos de aplicación como la fabricación de maquinaria, la industria aeroespacial y la fabricación de moldes.



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:

EN ISO 18265:2013

Materiales metálicos: Conversión entre dureza y resistencia

Materiales metálicos: Conversión de valores de dureza

1 Alcance

Esta norma especifica el método de conversión entre diferentes métodos de ensayo de dureza y entre los valores de dureza y la resistencia a la tracción de materiales metálicos. Esta norma es aplicable a metales ferrosos (como acero al carbono, acero aleado y acero inoxidable) y a metales no ferrosos (como aluminio, cobre y sus aleaciones). El método de conversión se basa en datos empíricos y es aplicable a valores de dureza medidos a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C). Esta norma no es aplicable a la conversión de dureza de carburos cementados (como WC-Co), materiales superduros (como el diamante) ni materiales de endurecimiento superficial (como el acero cementado).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

EN ISO 6506-1:2014 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Brinell Parte 1: Método de ensayo

EN ISO 6507-1:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 1: Método de ensayo

EN ISO 6508-1:2016 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Rockwell Parte 1: Método de ensayo

EN ISO 4545-1:2017 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Knoop Parte 1: Método de ensayo

EN ISO 6892-1:2019 Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma EN ISO 18265:2013 y los siguientes términos y definiciones:

Dureza: Capacidad de un material metálico para resistir la penetración de un penetrador, medida utilizando diferentes métodos (como Vickers, Brinell, Rockwell y Knoop).

Resistencia a la tracción (Rm): La tensión máxima que un material metálico puede soportar en una prueba de tracción, medida en MPa.

Conversión: El proceso de convertir un valor de dureza en otro valor de dureza o resistencia a la tracción basado en relaciones empíricas.

Dureza Vickers (HV): El valor de dureza medido mediante la prueba de dureza Vickers, la unidad es N/mm².

Dureza Brinell (HBW): El valor de dureza medido por la prueba de dureza Brinell, la unidad es HBW (penetrador de bola de carburo).

Dureza Rockwell (HR): Valor de dureza medido mediante la prueba de dureza Rockwell. Las escalas comunes son HRC, HRB y HRA.

4 Principio de conversión

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 conversión entre dureza y dureza, o entre dureza y resistencia a la tracción, se basa en datos empíricos y análisis de regresión. La relación de conversión varía según el tipo de material, el estado del tratamiento térmico y la microestructura (como el tamaño del grano y la distribución de fases). Esta norma proporciona tablas y fórmulas de conversión, pero los resultados son solo valores aproximados y la desviación puede alcanzar un $\pm 10\%$. Se deben considerar los siguientes factores al realizar la conversión:

Categoría de material: metales a base de hierro (como acero al carbono, acero aleado) o metales no ferrosos (como aluminio, cobre).

Rango de dureza: diferentes métodos de prueba de dureza tienen rangos aplicables (como HRC 20-70).

Condiciones de prueba: carga de prueba de dureza, tiempo de retención y calidad de la superficie de la muestra.

5 Condiciones de conversión

5.1 Ámbito de aplicación

Metales a base de hierro: acero al carbono, acero aleado, acero inoxidable.

Metales no ferrosos: aluminio y aleaciones de aluminio, cobre y aleaciones de cobre.

Rango de dureza:

Dureza Vickers (HV): 100-1000.

Dureza Brinell (HBW): 100-700.

Dureza Rockwell (HRC): 20-70.

Resistencia a la tracción (Rm): 300-2000 MPa.

5.2 Restricciones

No es adecuado para carburo cementado (como WC-Co) ni materiales superduros (como el diamante).

No apto para materiales de endurecimiento superficial (como capas de carburación y nitruración).

No es adecuado para materiales con microestructura anormal (como segregación severa y alta porosidad).

La desviación de conversión puede ser de hasta $\pm 10\%$ y es sólo para referencia.

5.3 Requisitos de prueba

La prueba de dureza debe cumplir con las normas pertinentes (como EN ISO 6507-1:2018).

La rugosidad de la superficie de la muestra es $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ y el espesor es $\geq 1,5 \times$ la longitud diagonal de la sangría.

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C , se recomienda $20 \pm 5^\circ\text{C}$.

6 Método de conversión

6.1 La conversión entre durezas

se realiza mediante las tablas proporcionadas en la norma. Algunos ejemplos son los siguientes:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HRC a HV:

HRC 30 $\approx$ HV 320

HRC 50 $\approx$ HV 550

HRC 30 $\approx$ HV 320
HRC 50 $\approx$ HV 550

HV a HBW (acero al carbono):

Alto voltaje 200 $\approx$ Alto voltaje 190

Alto voltaje 500 $\approx$ Alto peso molecular 475

HV 200 $\approx$ HBW 190
HV 500 $\approx$ HBW 475

6.2 Conversión entre dureza y resistencia a la tracción.

La conversión se realiza mediante las tablas o fórmulas proporcionadas por la norma. Algunos ejemplos son los siguientes:

HRC a Rm (acero endurecido):

HRC 30 $\approx$ Rm 900

MPaHRC 50 $\approx$ Rm 1500

HRC 30 $\approx$ R _m 900 MPa
HRC 50 $\approx$ R _m 1500 MPa

HBW a Rm (acero al carbono, sin tratamiento térmico):

Rm $\approx$ 3,3 $\times$ peso corporal total (peso corporal total 100-400)

HBW 200 $\approx$ Rm 660 MPa

R _m $\approx$ 3.3 $\times$ HBW (HBW 100-400)
HBW 200 $\approx$ R _m 660 MPa

6.3 Estructura de la tabla de conversión

Tabla A: Conversión de dureza de metales a base de hierro (acero al carbono, acero aleado).

Tabla B: Conversión de dureza de acero inoxidable.

Tabla C: Conversión de dureza de metales no ferrosos (aluminio, cobre).

Tabla D: Conversión entre dureza y resistencia a la tracción.

7 Evaluación de los resultados de la conversión

7.1 Análisis de desviaciones

Desviación de conversión de dureza: $\pm 5\%$ -10%, dependiendo del material y el rango de dureza.

Desviación de conversión entre dureza y resistencia a la tracción: $\pm 10\%$ -15%, dependiendo del estado del tratamiento térmico.

7.2 Factores influyentes

Microestructura: Un tamaño de grano desigual ($> \pm 0,2 \mu\text{m}$) o una distribución de fase desigual pueden provocar grandes desviaciones ($> 10\%$).

Estado del tratamiento térmico: La desviación de conversión del acero templado y revenido y del

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

acero recocido es diferente ($\pm 5\%$ -15%).

Condiciones de prueba: La carga, el tiempo de retención y la calidad de la superficie de la muestra de la prueba de dureza afectarán la precisión de la conversión.

7.3 Recomendaciones

Se prefiere la prueba directa (como la prueba de tracción) para obtener resistencia a la tracción a la conversión.

El resultado de la conversión es sólo de referencia y debe verificarse cuando sea necesario (cuando la desviación sea $>10\%$).

8 Informe de conversión

El informe de conversión debe incluir lo siguiente:

Información del material: tipo de material, grado, estado del tratamiento térmico.

Información de la prueba de dureza: método de prueba (como Vickers), carga (N), valor de dureza y desviación.

Resultados de la conversión: valor de dureza objetivo o valor de resistencia a la tracción, base de conversión (número de tabla).

Evaluación de desviaciones: rango de desviación de conversión y análisis de factores influyentes.

Fecha del informe y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice normativo) Tabla de conversión de dureza de metales a base de hierro (ejemplos parciales)

CDH	Alto voltaje	Trabajo de alta calidad	HRA	Materiales aplicables
20	240	228	60	Acero dulce
30	320	304	67	Acero al carbono medio
40	420	400	73	acero endurecido
50	550	525	78	Acero de alta resistencia

Apéndice B (Apéndice normativo) Tabla de conversión de dureza del acero inoxidable (ejemplos parciales)

CDH	Alto voltaje	Trabajo de alta calidad	Materiales aplicables
20	250	238	acero inoxidable austenítico
30	330	315	acero inoxidable martensítico
40	430	410	Acero inoxidable endurecido por precipitación

Apéndice C (Apéndice normativo) Tabla de conversión de dureza de metales no ferrosos (ejemplos parciales)

Trabajo de alta calidad	Alto voltaje	Materiales aplicables
50	55	Aluminio puro

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

Trabajo de alta calidad	Alto voltaje	Materiales aplicables
100	110	Aleación de aluminio (como 6061)
150	165	latón

Apéndice D (Apéndice normativo) Tabla de conversión de dureza y resistencia a la tracción (algunos ejemplos)

Trabajo de alta calidad	Rm R _m Rm (MPa)	Materiales aplicables
150	495	Acero al carbono sin tratamiento térmico
200	660	Acero al carbono sin tratamiento térmico
300	1000	Acero templado y revenido

Apéndice E (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Resumir

La norma EN ISO 18265:2013 "Materiales metálicos - Conversión entre dureza y resistencia" proporciona un procedimiento estandarizado para la conversión de valores de dureza de materiales metálicos y garantiza la fiabilidad y consistencia de los resultados de la conversión mediante tablas y condiciones de conversión detalladas. La implementación de esta norma ayuda a los ingenieros de materiales a realizar evaluaciones aproximadas de dureza y resistencia en ausencia de condiciones de ensayo directas, y es adecuada para el análisis del rendimiento de materiales en los sectores de la fabricación de maquinaria, la construcción, la energía, etc.

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:

EN ISO 6892-1:2019

Ensayos de tracción de materiales metálicos

Materiales metálicos: ensayos de tracción

— Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo de tracción de materiales metálicos a temperatura ambiente (10 °C a 35 °C) para determinar sus propiedades mecánicas, incluyendo el límite elástico, la resistencia a la tracción, el alargamiento tras la fractura, la contracción transversal, etc. Esta norma es aplicable a barras, placas, tubos, alambres y piezas procesadas de diversos materiales metálicos (como acero, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, etc.). Esta norma no es aplicable a ensayos con temperaturas superiores al rango de 10 °C a 35 °C, ni a ensayos de muestras micrométricas (como espesores <0,1 mm).

2 Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplica la versión referenciada. Para los documentos referenciados sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) a esta norma.

EN ISO 7500-1:2018 Materiales metálicos. Máquinas de ensayo de tracción y compresión. Parte 1: Dispositivos patrón de fuerza de calibración.

EN ISO 9513:2012 Materiales metálicos — Calibración de sistemas de extensómetros

EN ISO 377:2017 Acero y productos de acero. Muestreo y preparación de probetas para ensayos de tracción.

EN ISO 148-1:2016 Materiales metálicos — Ensayo de impacto de péndulo Charpy Parte 1: Método de ensayo

EN ISO 18265:2013 Materiales metálicos — Conversión entre dureza y resistencia

3 Términos y definiciones

Esta norma adopta la norma EN ISO 6892-1:2019 y los siguientes términos y definiciones:

Resistencia a la fluencia (R_p) o resistencia a la extensión plástica especificada ($R_{p0,2}$): La tensión en la que la muestra sufre una deformación plástica especificada durante la tensión, expresada en MPa.

Resistencia a la tracción (R_m): La tensión máxima que soporta una muestra durante la tracción, expresada en MPa.

Elongación después de la fractura (A): El porcentaje de elongación plástica de la sección de longitud de calibre después de que la muestra se rompe a la longitud de calibre original, expresado en %.

Contracción seccional (Z): El porcentaje de reducción en el área de la sección transversal después de que la muestra se rompe al área de la sección transversal original, expresado en %.

Longitud de calibre (L₀): La longitud inicial de la muestra utilizada para medir elongación, en mm.

4 Principio 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

El ensayo de tracción aplica una carga de tracción uniaxial a la muestra metálica en una máquina de ensayos universal hasta su rotura. Se registra la curva de carga-desplazamiento y se calculan los parámetros de las propiedades mecánicas (como el límite elástico, la resistencia a la tracción, elongación, etc.). El proceso de ensayo se divide en la etapa elástica, la etapa de fluencia, la etapa de deformación plástica uniforme y la etapa de fractura por estrangulación. La fórmula para el cálculo de las propiedades mecánicas es la siguiente:

屈服强度或规定塑性延伸强度:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

en:

F_p es la carga de fluencia, en N;

F_m es la carga máxima, en N;

A_0 es el área de la sección transversal original en mm² ;

L_0 es la longitud del calibre original, en mm;

L_u es la longitud del calibre después de la fractura, en mm;

A_u es el área transversal mínima después de la fractura, en mm² .

5 Equipo de prueba

5.1 Máquina de pruebas universal

Rango de carga: 0-1000 kN , precisión ±0,5 % , conforme a los requisitos de calibración EN ISO 7500-1:2018.

Control de velocidad de carga: tasa de tensión de 0,00025/s a 0,0025/s, o tasa de deformación de 0,0001/s a 0,001/s.

5.2 Extensómetro

Cumple con los requisitos de calibración EN ISO 9513:2012 con una precisión de ±0,5%.

Rango de medición: cubre las etapas de deformación elástica y plástica de la muestra.

5.3 Herramientas de medición

Calibrador Vernier: precisión ±0,02 mm, utilizado para medir el tamaño de la muestra.

Micrómetro: precisión ±0,001 mm, utilizado para medir el área de la sección transversal.

5.4 Control ambiental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

6. Preparación de la muestra

6.1 Tipo de muestra

比例试样: 标距长度 L_0 与横截面积 A_0 的平方根成比例, 常用 $L_0 = 5.65\sqrt{A_0}$.

Muestra no proporcional: La longitud de referencia L_0 es fija, como por ejemplo 50 mm o 80 mm.

Forma de la muestra: redonda, rectangular, tubular o de alambre. Las dimensiones específicas se refieren a la norma EN ISO 377:2017.

6.2 Requisitos de la muestra

La superficie de la muestra es lisa, sin grietas, capa de óxido ni defectos de procesamiento.

Rugosidad superficial $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (pulida).

Las muestras se tomarán en la dirección de laminación del material, a menos que se acuerde lo contrario.

6.3 Número de muestras

El número de muestras en cada lote no será inferior a 3 para garantizar la representatividad estadística.

Si la desviación del resultado es grande ($>10\%$), el número de muestras debe aumentarse a 5.

6.4 Marcado de muestra

Las muestras de prueba deberán estar marcadas con el número de lote, la marca (como S355JR, 6061-T6) y los elementos de prueba, y la marca no deberá afectar el área de prueba.

6.5 Medición de la muestra

Mida el área de la sección transversal original de la muestra A_0 y la longitud del calibre L_0 , precisión $\pm 0,02 \text{ mm}$.

7 pasos de prueba

7.1 Calibración del equipo

La máquina de prueba se calibró utilizando un sensor de fuerza estándar con una desviación de carga de $< \pm 0,5\%$.

La medición de la deformación se calibró utilizando un extensómetro estándar con una desviación de $< \pm 0,5\%$.

7.2 Condiciones 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

Temperatura ambiente: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad relativa: 30%-80%, recomendado 50±10%.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

7.3 Operación de prueba

Instale la muestra en el soporte de la máquina de prueba, asegurándose de que el eje de la muestra esté alineado con la línea central del soporte.

Aplicar carga inicial (que no exceda el 10% de la carga de rendimiento) y eliminar los espacios de instalación.

Seleccione una velocidad de carga:

Etapla elástica: tasa de tensión 0,00025/s a 0,0025/s.

Etapla plástica: velocidad de deformación 0,0001/s a 0,001/s.

Se registró la curva de carga-desplazamiento hasta que se rompió la muestra.

Cada muestra se probó una vez y se repitió de 3 a 5 veces para garantizar la estabilidad de los resultados.

7.4 Medición de resultados

Registre la carga de rendimiento F_p y la carga máxima F_m .

Utilice un extensómetro para medir la deformación en la etapa de fluencia (por ejemplo, $R_p 0,2$).

Después de que se rompa la muestra, mida la longitud de calibración posterior a la rotura L_u y el área de la sección transversal A_u .

7.5 Cálculo del resultado

屈服强度或 $R_{p0.2}$:

$$R_p = \frac{F_p}{A_0}$$

抗拉强度:

$$R_m = \frac{F_m}{A_0}$$

断后延伸率:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100$$

断面收缩率:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \times 100$$

8 Evaluación de los resultados de las pruebas

8.1 Rango de propiedades mecánicas

La gama de propiedades mecánicas de los materiales metálicos depende del material:

低碳钢 (S355JR) : $R_{p0.2}$ 355 MPa, R_m 470-630 MPa, A 20%-25%.

铝合金 (6061-T6) : $R_{p0.2}$ 240 MPa, R_m 310 MPa, A 8%-12%.

不锈钢 (304) : $R_{p0.2}$ 205 MPa, R_m 520 MPa, A 40%-50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Evaluación de la desviación

de 3 a 5 muestras es $\leq \pm 10\%$, de lo contrario es necesario volver a realizar la prueba.
Si el valor del rendimiento excede los requisitos técnicos del material, se deben analizar las razones (como defectos de la muestra, velocidad de carga inadecuada).

8.3 Análisis de factores influyentes

Velocidad de carga: Una velocidad demasiado rápida ($>0,0025/s$) dará como resultado un mayor límite elástico (desviación $>5\%$).
Calidad de la muestra: Rugosidad superficial $R_a > 0,2 \mu m$ o defectos que pueden provocar una fractura prematura (desviación $> 10 \%$).
Alineación de accesorios: los accesorios desalineados pueden causar concentración de tensión y reducir el alargamiento (desviación $> 15\%$).
Microestructura: Un tamaño de grano desigual ($>\pm 0,2 \mu m$) o inclusiones excesivas reducirán el rendimiento (desviación $>10\%$).

9 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:
Información de la muestra: tipo de material, marca, número de lote, tamaño, dirección de muestreo.
Condiciones de prueba: modelo del dispositivo, velocidad de carga, temperatura ambiente ($10^{\circ}C$ a $35^{\circ}C$), humedad (30%-80%).
Resultados de la prueba: límite elástico ($R_p 0,2$), resistencia a la tracción (R_m), alargamiento después de la fractura (A), reducción de área (Z), valor medio y desviación.
Conclusión de la evaluación: si cumple con los requisitos técnicos del material.
Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de referencia de las propiedades mecánicas de materiales metálicos típicos

Tipo de material	Marca/categoría	$R_p 0,2$ (MPa)	R_m (MPa)	A(%)	Z(%)	Aplicaciones típicas
Acero dulce	S355JR	355	470-630	20-25	50-60	Estructura del edificio
Aleación de aluminio	6061-T6	240	310	8-12	20-30	Estructuras aeroespaciales
Acero inoxidable	304	205	520	40-50	60-70	Equipos de alimentos

Apéndice B (Apéndice informativo) Tabla recomendada de dimensiones de muestras

Tipo de muestra	Longitud de calibre L_0 (mm)	Área de la sección transversal A_0 (mm ²)	Materiales aplicables
Muestra de prueba proporcional	$5.65\sqrt{A_0}$	50-200	Acero, aleación de aluminio
Ejemplares	no 50	20-100	Placas delgadas,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tipo de muestra	Longitud de calibre L_0 (mm)	Área de la sección transversal A_0 (mm ²)	Materiales aplicables
proporcionales			alambres

Apéndice C (Apéndice informativo) Requisitos del entorno de prueba

Temperatura: 10°C a 35°C, se recomienda 20±5°C.

Humedad: 30%-80%, 50±10% recomendado.

Sin vibraciones, sin ambiente de gases corrosivos.

Nivelación del banco de pruebas: desviación <0,02 mm/m.

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 7: Control de las propiedades mecánicas del carburo cementado

7.0 Propiedades mecánicas del carburo cementado

7.0.1. Alta dureza del carburo cementado.

7.0.1.0 ¿Cuál es la dureza del carburo cementado?

7.0.1.1 Método para medir la dureza del carburo cementado

7.0.1.2 Factores que afectan la dureza

Mecanismo microscópico de la dureza

7.0.1.4 Importancia de la dureza en la aplicación

7.0.1.5 Compensación entre dureza y tenacidad

7.0.1.6 Resumen

7.0.2. Tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.1. Definición de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.2. Método de medición de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.3. Factores que afectan la tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.4. Mecanismo microscópico de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.5. Importancia de la aplicación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado

7.0.2.6. Optimización y desarrollo futuro de la tenacidad a la fractura del carburo cementado.

7.0.3. Resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.1. Definición de la resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.2. Método para medir la resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.3. Factores que afectan la resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.4. Micromecanismo de la resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.5. Importancia de la aplicación de la resistencia a la compresión del carburo cementado

7.0.3.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia a la compresión del carburo cementado.

7.0.4. Resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.1. Definición de la resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.2. Método de medición de la resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.3. Factores que afectan la resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.4. Micromecanismo de la resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.5. Importancia de la aplicación de la resistencia al desgaste del carburo cementado

7.0.4.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia al desgaste del carburo cementado.

7.0.5. Resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.1. Definición de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.2. Método de medición de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.3. Factores que afectan la resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.4. Mecanismo microscópico de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.5. Importancia de la aplicación de la resistencia a la fatiga del carburo cementado

7.0.5.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia a la fatiga del carburo cementado.

7.0.6. Resistencia al impacto del carburo cementado

7.0.6.1. Definición de la resistencia al impacto del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- 7.0.6.2. Método de medición de la resistencia al impacto del carburo cementado
- 7.0.6.4. Mecanismo microscópico de la resistencia al impacto del carburo cementado
- 7.0.6.5. Importancia de la aplicación de la resistencia al impacto del carburo cementado
- 7.0.6.6. Optimización y desarrollo futuro de la resistencia al impacto del carburo cementado.
- 7.0.7. Análisis exhaustivo y aplicación de las propiedades mecánicas del carburo cementado.
- 7.0.7.1. Compensación de las propiedades mecánicas del carburo cementado
- 7.0.7.2. Estrategias de optimización de las propiedades mecánicas del carburo cementado
- 7.0.7.3. Escenarios de aplicación de las propiedades mecánicas del carburo cementado
- 7.0.7.4. Desarrollo futuro de las propiedades mecánicas del carburo cementado
- 7.1 Equilibrio de dureza y tenacidad del carburo cementado
- 7.1.1 Efecto del tamaño del grano (relación Hall-Petch)
- 7.1.1.1 Efecto del tamaño del grano
- 7.1.1.2 Mecanismo de Hall-Petch y análisis mecánico
- 7.1.2.2 Efecto cuantitativo del contenido de aglutinante sobre la tenacidad
- 7.1.2.3 Relación jerárquica entre el tipo de fase de enlace y la tenacidad
- 7.1.2.4 Estrategia de optimización colaborativa y de equilibrio fuerte
- 7.1.2.5 Verificación de prácticas de ingeniería
- 7.1.2.6 Reconocimiento final
- 7.2 Resistencia a la fatiga y al impacto del carburo cementado
- 7.2.1 Crecimiento de grietas en carburo cementado bajo carga cíclica (ley de Paris)
- 7.3 Análisis del mecanismo de falla del carburo cementado
- 7.3.2 Fractura y desenchado del carburo cementado (concentración de tensiones y microfisuras)
- 7.4 Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado
- 7.4.1 Estrategia de mejora del rendimiento del carburo cementado: refinamiento del grano del carburo cementado
- 7.4.2 Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado, aditivos de carburo cementado (VC, TaC)
- 7.4.3 Estrategias para mejorar el rendimiento del carburo cementado y fortalecer su superficie
- 7.4.4 Estrategia de mejora del rendimiento del carburo cementado: tecnología de fabricación avanzada de carburo cementado (impresión 3D)
- 7.5 Tendencias de desarrollo futuro: Aplicación de IA + IIoT en la optimización del rendimiento del carburo cementado
- 7.5.1 Optimización de la microestructura: diseño de precisión impulsado por IA
- 7.5.2 Monitoreo del rendimiento en tiempo real: percepción de alta precisión del IIoT
- 7.5.3 Predicción de fallos y mantenimiento inteligente: aplicación colaborativa de IA + IIoT
- 7.5.4 Optimización de procesos y fabricación inteligente: colaboración eficiente de IA + IIoT
- IIoT monitorea la temperatura de carburación en tiempo real (850-950 °C, desviación $\pm 1,5$ °C) para optimizar la calidad de la capa de carburación.
- 7.5.5 El primer año de IA en la industria del tungsteno de China
- 7.5.5.1 La importancia práctica del concepto de “el primer año de IA en la industria del tungsteno de China”
- 7.5.5.2 Importancia del tratamiento de alta entropía del carburo cementado
- 7.5.5.3 La importancia de la dosificación del grado de carburo
- 7.5.6 Perspectivas futuras y desafíos para mejorar el rendimiento del carburo cementado
- 7.6 Normas nacionales e internacionales pertinentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Referencias

Cronograma

El equilibrio entre dureza y tenacidad del carburo cementado: principales parámetros de rendimiento

Factores que afectan el tamaño del grano y su efecto en el equilibrio entre dureza y tenacidad del carburo cementado

Factores que influyen en la optimización del contenido de la fase aglutinante para el equilibrio de dureza y tenacidad del carburo cementado

Principales parámetros de rendimiento de la resistencia a la fatiga y al impacto del carburo cementado

Factores que afectan el crecimiento de grietas en la resistencia a la fatiga del carburo cementado

Factores que afectan la tenacidad al impacto de la resistencia al impacto del carburo cementado

Principales parámetros de rendimiento del mecanismo de falla del carburo cementado

Factores que afectan la falla por desgaste del carburo cementado

Factores que afectan la fractura y el desconchado del carburo cementado

Principales parámetros de rendimiento de la mejora del rendimiento del carburo cementado

Refinamiento del grano y aditivos: factores que influyen en la mejora del rendimiento del carburo cementado

Factores que afectan el fortalecimiento de la superficie del carburo cementado y la mejora del rendimiento

apéndice

relación Hall-Petch ?

¿Qué es el carburo cementado con estructura de gradiente?

Diversos conceptos y funciones de la carburación con carburo cementado

Carburación y descarburación de carburo cementado

¿Qué es la inyección de aglutinante de carburo cementado?

Aplicación de carburo cementado en nuevos electrolizadores energéticos

Herramientas de corte de carburo de alta velocidad

Fresas de punta esférica de carburo

Fresas de carburo

Fresa de carburo de múltiples dientes

Broca sólida de carburo

Herramienta de torneado exterior de carburo

Fresas de carburo para engranajes

Cortador de engranajes de carburo para turbinas eólicas

GB/T 18376-2001 Método de prueba de rendimiento de carburo cementado

GB/T 230.1-2001 Prueba de dureza Rockwell para materiales metálicos

Parte 1: Métodos de prueba (escala A, B, C)

GB/T 230.2-2001 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

GB/T 230.3-2001 Materiales metálicos Ensayo de dureza Rockwell Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

GB/T 3848-2001 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 3850-2001 Método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

GB/T 3851-2001 Método de determinación de la tenacidad a la fractura 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

GB/T 9097-2001 Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado
GB/T 3849-2008 Método de prueba para la dureza Vickers del carburo cementado
GB/T 7997-2010 Método de ensayo para la tenacidad a la fractura del carburo cementado
GB/T 3488-2008 Método de prueba de microestructura de carburo cementado
ISO/TR 19041:2015 Informe técnico sobre la inspección de la microestructura del carburo cementado: Orientación complementaria sobre la evaluación de defectos
ISO 4884:2019 Método para la determinación de las propiedades magnéticas del carburo cementado
ISO 3369:2006 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado
ISO 28079:2009 Método para la determinación de la tenacidad a la fractura del carburo cementado
ISO 3878:1983 Método de ensayo para la dureza Rockwell del carburo cementado (escala HRA)
ISO 3326:2013 Método de ensayo para la dureza Vickers del carburo cementado
ISO 4489-2:2020 Método de ensayo para la resistencia a la flexión del carburo cementado Parte 2: Condiciones de alta temperatura
ISO 4489:2010 Método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado
ISO 4499-3:2016 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 3: Evaluación de porosidad, inclusiones, carbono libre y fase eta
ISO 4499-2:2008 Carburo cementado. Examen de microestructura. Parte 2: Método para la determinación del tamaño de grano.
ISO 4499-1:2006 Carburo cementado — Examen de microestructura Parte 1: Guía general
ISO 3847:2005 Métodos para la preparación de muestras de carburo cementado
Terminología de carburo cementado ISO 3850:2018
ISO 3850:2018 Metal duro - Vocabulario
GB/T 4295-2008 Método para evaluar defectos microestructurales en carburo cementado
GB/T 5249-2008 Especificación general para la preparación de muestras de carburo cementado
ISO 28079:2009 Ensayo de tenacidad a la fractura de probetas en forma de palma de carburo cementado
Metales duros : prueba de tenacidad Palmqvist
ISO 6507-1:2018 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos
Materiales metálicos: prueba de dureza Vickers
ISO 6507-1:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 1: Método de ensayo
ISO 6507-2:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 2: Verificación y calibración de durómetros
ISO 6507-3:2018 Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers Parte 3: Estándares de calibración
ISO 3327:2009 Método de ensayo para la resistencia a la compresión del carburo cementado
Metales duros : determinación de la resistencia a la ruptura transversal
Metales duros : pruebas de abrasión para metales duros
Método de prueba estándar ASTM B611-13 para la resistencia al desgaste por alta tensión de metales duros
Método de prueba de impacto de muestra con entalladura ASTM E23-18
Métodos de prueba estándar para pruebas de impacto de barras con entalla de metales metálicos
Método de prueba de abrasión con rueda de caucho y arena seca ASTM G65-16
Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando el aparato de rueda de caucho/arena seca
EN ISO 6507-1:2018 Prueba de dureza Vickers
Materiales metálicos — Ensayo de dureza Vickers — Parte 1: Método de ensayo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

EN ISO 18265:2013 Materiales metálicos — Conversión entre dureza y resistencia

Materiales metálicos: Conversión de valores de dureza

EN ISO 6892-1:2019 Ensayos de tracción de materiales metálicos

Materiales metálicos: Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.

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