

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

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



Capítulo 3: Propiedades físicas y químicas del carburo cementado

El carburo cementado de tungsteno se ha convertido en el material fundamental para herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste, equipos mineros, equipos aeroespaciales, equipos químicos, instalaciones de energía nuclear y dispositivos de aguas profundas gracias a sus excelentes propiedades físicas y químicas. Estas propiedades incluyen propiedades mecánicas (dureza, tenacidad, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión), propiedades térmicas (conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, estabilidad a altas temperaturas, resistencia al choque térmico), estabilidad química (resistencia a la corrosión, resistencia a la oxidación) y propiedades eléctricas y magnéticas (conductividad, magnetismo de la fase Co), derivadas de la rigidez del enlace covalente del carburo de tungsteno (WC) y la sinergia plástica de la fase de enlace de cobalto (Co) o níquel (Ni).

Este capítulo analiza cada propiedad fisicoquímica, los métodos de inspección y ensayo, los factores que afectan diversos aspectos del rendimiento y casos de aplicación ampliados. Además, explora en profundidad la base teórica, la tecnología de ensayo, el mecanismo de regulación, la adaptabilidad ambiental y el rendimiento en condiciones de trabajo. Mediante modelos teóricos detallados, datos experimentales precisos, una amplia gama de casos interdisciplinarios y un análisis del impacto en el rendimiento, este capítulo revela el mecanismo inherente de las propiedades fisicoquímicas, proporcionando una referencia completa para la optimización del rendimiento, la adaptación a condiciones de trabajo extremas y la investigación interdisciplinaria del carburo cementado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.1 Propiedades mecánicas del carburo cementado

Las propiedades mecánicas son la piedra angular de la fiabilidad del carburo cementado en entornos de alta carga, impacto, desgaste y tensiones complejas, y se utilizan ampliamente en corte, minería, estampación, aviación y perforación en aguas profundas. Esta sección analiza la dureza, la tenacidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión, e incorpora nuevos métodos de inspección y ensayo, así como factores influyentes.

3.1.1 Dureza del carburo cementado

La dureza se refiere a la capacidad de un material para resistir la presión o el rayado de objetos externos en su superficie, y es uno de los indicadores importantes para medir sus propiedades mecánicas. Generalmente, refleja la resistencia, la resistencia al desgaste y la resistencia a la deformación de un material, y a menudo se caracteriza por su capacidad para resistir la compresión, el cizallamiento o la deformación plástica. Los métodos de medición comunes incluyen la dureza Brinell (HB), la dureza Rockwell (HR), la dureza Vickers (HV) y la dureza Shore (HS), y sus valores se calculan en función del tipo de indentador (como bola de acero o diamante), el tamaño de la carga y el área de indentación (ISO 6507, ASTM E10). Por ejemplo, la dureza Vickers del carburo cementado suele ser HV 1200-2400, dependiendo del tamaño del grano y el contenido de la fase aglutinante. La dureza está estrechamente relacionada con la microestructura del material (como el tamaño del grano y la composición de la fase) y el tratamiento térmico, y es fundamental para la selección de materiales y la evaluación de su durabilidad.

La dureza Vickers (HV) del carburo cementado es de $1500-2500 \pm 30$, superando ampliamente la del acero rápido (HV 800-1000), la cerámica (HV 1200-1800) y las aleaciones de titanio (HV 300-400), lo que constituye la base de su resistencia al desgaste. La dureza proviene de la red de enlaces covalentes del carburo de tungsteno (WC) (energía de enlace de $6,0 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$, longitud de enlace de $2,0 \text{ \AA} \pm 0,05 \text{ \AA}$), y su estructura cristalina hexagonal ($P6m^2$, módulo de Young de $700 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$) le proporciona resistencia a la deformación plástica. La dureza del carburo cementado que contiene 10% de Co es $HV 1800 \pm 30$, y la del carburo cementado que contiene 20% de Co cae a $HV 1400 \pm 30$, porque la suavidad de la fase Co (HV 300 - 400, estructura FCC cúbica centrada en la cara) reduce la resistencia a la compresión.

La dureza del carburo cementado es excepcional.

A 600°C , la dureza del carburo cementado con 6 % de Co mantiene una HV de 1500 ± 30 , disminuye a $HV 1200 \pm 20$ a 800°C y a $HV 1000 \pm 30$ a 1000°C , lo que es mejor que la del acero de alta velocidad (que se redujo a HV de 500 a 600°C) y la cerámica (que se redujo a HV de 800 a 1000°C). La adición de Cr_3C_2 (0,5 % - 1 %) aumenta la dureza a HV de 1900 a 2200 ± 50 mediante el fortalecimiento de la solución sólida (radio atómico de Cr $1,28 \text{ \AA}$, deformación reticular $< 2\% \pm 0,2\%$). Por ejemplo, una herramienta de carburo cementado (HV 1900) que contiene 8% de Co y 0,5% de Cr_3C_2 tiene una cantidad de desgaste de $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ y una vida útil de 15 horas ± 1 hora en corte de alta velocidad de acero inoxidable (resistencia a la tracción $> 1000 \text{ MPa}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

velocidad de corte 200 m/min, coeficiente de fricción $< 0,3 \pm 0,05$), lo que es mejor que las herramientas de cerámica (vida útil < 5 horas, cantidad de desgaste $> 0,3$ mm).

El impacto del medio ambiente en la dureza requiere atención.

En un ambiente cálido y húmedo (40°C , 90 % de humedad, 168 horas), se induce microcorrosión de la fase Co (pérdida de peso $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$, profundidad de corrosión $< 1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) y la dureza disminuye en $< 2 \% \pm 0,5 \%$; en un ambiente extremadamente frío (40°C), la dureza aumenta ligeramente en $1 \% \pm 0,3 \%$ debido a la fragilización de la fase Co (la deformación plástica disminuye en $< 3 \% \pm 0,3 \%$); a alta presión ($> 100 \text{ MPa}$, 5000 m de profundidad marina), no hay cambios significativos (disminución $< 0,5 \% \pm 0,1 \%$); la radiación (energía nuclear, 10^4 Gy , rayos γ) induce defectos puntuales y la dureza disminuye en $< 1 \% \pm 0,2 \%$.

El carburo cementado con níquel (12 % de níquel, $\text{HV } 1700 \pm 30$) es más estable en ambientes marinos (salinidad 3,5 %, pH 8, $\text{Cl}^- 19 \text{ g/L}$), con una reducción de dureza de $< 1 \%$. En aplicaciones prácticas, los rodillos de carburo cementado con un 6 % de Co presentan una profundidad de desgaste de $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y una vida útil de $> 300 \pm 20$ horas en minería (granito, dureza de roca $> 1000 \text{ MPa}$, frecuencia de impacto > 1000 veces/min), superior a la del acero de alta velocidad (vida útil de < 50 horas).

Para optimizar la dureza es necesario alcanzar un equilibrio con la tenacidad.

La adición de TiC (10%15%, dureza $20 \text{ GPa} \pm 1 \text{ GPa}$) aumenta la dureza a $\text{HV } 2000 \pm 50$, mientras que reduce la densidad ($12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), lo cual es adecuado para piezas de aviación ligeras, como moldes de álabes de turbina (carga $> 2000 \text{ MPa}$, tolerancia de deformación $< 0,01 \text{ mm}$). En el estampado compuesto (600°C , frecuencia $> 10^4$ veces/hora), la rugosidad superficial del molde de carburo cementado que contiene 15% de TiC es $\text{Ra} < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$, y la vida útil se incrementa en un $40\% \pm 5\%$, lo cual es mejor que los moldes de acero ($\text{Ra} > 0,5 \mu\text{m}$, vida útil < 2000 horas). La comparación entre dominios muestra que la dureza del carburo cementado es mejor que la del acero de alta resistencia ($\text{HV } 600800$) y la aleación de titanio ($\text{HV } 300400$), pero inferior a la del diamante ($\text{HV} > 8000$).

3.1.1.1 Método de expresión de dureza

Hay muchas formas de expresar la dureza, adecuadas para diferentes escenarios de prueba y comparaciones de materiales:

Dureza Vickers (HV)

La dureza Vickers (HV) es un método estándar para medir con precisión la dureza de los materiales. Utiliza un penetrador piramidal de diamante (ángulo de vértice de 136°) para presionar la superficie del material bajo una carga específica (generalmente de 5 a 100 kgf, el rango puede extenderse a 1 a 120 kgf), y después de mantenerlo durante 10 a 15 segundos, se mide la longitud diagonal de la indentación (d , unidad mm) para calcular el valor de dureza. La fórmula es: $\text{HV} = 1,8544 \times F / d^2$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

donde F es la carga aplicada (kgf), d es la longitud diagonal promedio de la indentación (mm) y el resultado se expresa en kgf/mm^2 , que generalmente se marca directamente como el valor HV (ISO 6507-1:2018).

La dureza Vickers es aplicable a diversos materiales, incluyendo carburo cementado, acero, cerámica y materiales de capa delgada, debido a su pequeña indentación (diámetro 0,01-1 mm), alta precisión (error <5%) y amplio rango de prueba (HV 10-3000+). Por ejemplo, el HV del carburo cementado convencional es 1200-2000, mientras que el del carburo cementado a nanoescala (granos 0,05-0,2 μm) puede alcanzar 2000-2400 (Journal of Materials Science 2025). Su ventaja es que puede probar áreas diminutas (como recubrimientos) o láminas delgadas (espesor >0,1 mm), pero el tiempo de prueba es largo y los requisitos de planitud de la superficie son altos ($R_a < 0,8 \mu\text{m}$, ITIA 2024).

Dureza Rockwell (HRC/HRB)

La dureza Rockwell (HRC/HRB) es un método común para medir la dureza de los materiales. El penetrador (cono de diamante o bola de acero) se presiona en el material bajo la carga inicial (10 kgf) y la carga total (60-150 kgf), y el valor de dureza se determina midiendo la diferencia de profundidad de indentación (ASTM E18-22). Se caracteriza por su rapidez de ensayo, la pequeña indentación y su fácil manejo, y se utiliza ampliamente en materiales metálicos.

HRC : Utilice un indentador cónico de diamante (ángulo de vértice de 120°) con una carga total de 150 kgf, adecuado para materiales de alta dureza (como acero endurecido o carburo cementado). El valor de HRC se calcula mediante la fórmula: $\text{HRC} = 100 - (h/0,002)$, donde h es la profundidad de la indentación (mm). El rango de HRC suele estar entre 20 y 70; por ejemplo, el carburo cementado tiene una HRC de 60 a 70, equivalente a una dureza Vickers HV de 1200 a 2400.

HRB : Utilice un penetrador de bola de acero de 1/16 de pulgada con una carga total de 100 kgf, adecuado para materiales más blandos (como acero recocido y aleaciones de cobre). La fórmula para calcular el valor de HRB es: $\text{HRB} = 130 - (h/0,002)$, con un rango de 20 a 100. Por ejemplo, el valor de HRB del acero recocido es de aproximadamente 70 a 90 (ITIA 2024).

La ventaja de la dureza Rockwell es que se puede leer directamente con alta precisión (error <3%), pero no es adecuada para materiales delgados o áreas pequeñas (ISO 6508-1:2016).

Dureza Brinell (HB)

La dureza Brinell (HB) es un método para medir la dureza de un material presionando una bola de acero endurecido o un penetrador de bola de carburo de tungsteno (generalmente de 2,5, 5 o 10 mm de diámetro) en la superficie del material bajo una carga específica (F, generalmente 500-3000 kgf), manteniéndolo durante un tiempo determinado (10-30 segundos) y luego midiendo el diámetro de la sangría (d, en mm) para calcular la dureza. La fórmula es: $\text{HB} = (2F) / (\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2}))$, donde D es el diámetro del penetrador (mm), F es la carga (kgf), d es el diámetro de la sangría (mm) y el resultado se expresa en kgf/mm^2 (ASTM E10-18).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La dureza Brinell es adecuada para materiales de dureza más blanda o media (como acero, fundición y metales no ferrosos), y su rango suele ser de HB 30-650. Por ejemplo, la HB del acero sin templar es de aproximadamente 120-200, mientras que el carburo cementado no suele ser adecuado para este método debido a su alta dureza (HV 1200-2400) (ITIA 2024). Su ventaja es que el área de indentación es amplia, lo que refleja el rendimiento promedio del material, y es adecuada para materiales no uniformes, pero no para piezas delgadas ni materiales de alta dureza (el error es de aproximadamente el 3 %-5 %, según ISO 6506-1:2014).

Dureza de Mohs

La dureza de Mohs es una escala relativa para medir cualitativamente la dureza de los materiales. Fue propuesta por el mineralogista alemán Friedrich Mohs en 1812 para evaluar la dureza comparando la resistencia del material al rayado. El método utiliza 10 minerales estándar como referencia, con una dureza graduada del 1 (más blando) al 10 (más duro): 1-talco, 2-yeso, 3-calcita, 4-fluorita, 5-apatita, 6-ortoclasa, 7-cuarzo, 8-topacio, 9-corindón, 10-diamante. Durante la prueba, se raya la superficie del material con una muestra estándar. Si se puede dejar una marca, la dureza del material es inferior a la de la muestra estándar.

La dureza de Mohs es simple e intuitiva, y se aplica a minerales y algunos materiales de ingeniería. Sin embargo, su precisión es baja y se considera solo un valor relativo. Por ejemplo, la dureza de Mohs del carburo cementado es de aproximadamente 9-9,5, similar a la del corindón y mucho mayor que la del acero (aproximadamente 5-6) (ITIA 2024). Sus limitaciones radican en que no permite cuantificar la diferencia de dureza (por ejemplo, la diferencia entre 9 y 10 es mucho mayor que la de 1 y 2) y no es adecuada para analizar materiales heterogéneos o capas delgadas (el error es de aproximadamente $\pm 0,5$).

Al realizar la conversión, preste atención a la relación no lineal: $HV \approx 10 \cdot HRC + 900$ (error $< 5\%$), error de conversión de HB y Mohs $> 10\%$. En la práctica, HV es el método principal y HRC/HS el método auxiliar para garantizar una consistencia de rendimiento $> 95\% \pm 2\%$.

3.1.1.2 Método de prueba de dureza

La prueba de dureza garantiza la precisión de la medición mediante:

Prueba de dureza Vickers (ISO 3878)

La aleación dura con un 10 % de Co (HV 1800 ± 30) utiliza una carga de 10 kg, una diagonal de indentación de $2030 \pm 0,5 \mu\text{m}$, un aumento de microscopio de 400 ± 10 veces y un error de $< 1\% \pm 0,2\%$. El entorno requiere una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, una humedad $< 60\% \pm 5\%$ y un Ra superficial de la muestra $< 0,2 \pm 0,05 \mu\text{m}$. Por ejemplo, el molde con un 15 % de TiC (HV 2000 ± 50) supera la prueba Vickers, lo que garantiza una precisión de estampado de $< 0,01 \text{ mm}$.

Prueba de dureza Rockwell (ISO 6508)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La aleación dura con 6 % de Co (HRC 90 ± 1) adopta la escala HRC, con precarga de $10 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, carga principal de $150 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, tiempo de espera de $5 \text{ s} \pm 0,5 \text{ s}$ y error $< 2 \% \pm 0,5 \%$. Es adecuada para el sitio, como la herramienta con 8 % de Co (HRC 89 ± 1).

Probador de dureza portátil (Leeb, ASTM A956)

El carburo cementado con 12 % de Co (HS 85 ± 2) utiliza una energía de impacto de $11 \text{ N} \cdot \text{mm} \pm 0,5 \text{ N} \cdot \text{mm}$ con un error de $< 3 \% \pm 0,5 \%$. Es adecuado para minas, como rodillos (HS 87 ± 2).

Prueba de dureza ultrasónica (ASTM A1038)

El carburo cementado que contiene 8 % de Co (HV 1900 ± 50) utiliza impedancia de contacto ultrasónica con una frecuencia de $20 \text{ kHz} \pm 0,5 \text{ kHz}$ y un error de $< 2 \% \pm 0,5 \%$, lo que es adecuado para formas complejas como moldes de aviación.

Prueba de nanoindentación

El carburo cementado que contiene 10 % de Co (dureza $20 \text{ GPa} \pm 1 \text{ GPa}$) utiliza un penetrador Berkovich con una carga de $10 \text{ mN} \pm 0,1 \text{ mN}$, una profundidad de sangría de $< 200 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ y un error de $< 5 \% \pm 1 \%$, que es adecuado para la detección de recubrimientos.

La prueba requiere calibración (error estándar de bloque $< 1 \%$) y evitar vibraciones (aceleración $< 0,1 \text{ m/s}^2$). Por ejemplo, un molde con un 15 % de TiC se prueba mediante Vickers y nanoindentación para garantizar una vida útil de $> 6000 \pm 500$ horas.

3.1.1.3 Factores que afectan la dureza

Composición del carburo cementado

A medida que aumenta el contenido de Co (6% a 20%), la dureza disminuye de HV 2000 ± 50 a HV 1400 ± 30 , porque la suavidad de la fase de Co (HV 300 400) reduce la resistencia a la deformación. La adición de TiC (10% 15%) aumenta la dureza a HV 2000 ± 50 , y TaC (1% 2%) a HV 1900 ± 50 , debido al fortalecimiento de la solución sólida (deformación reticular $< 2 \% \pm 0,2 \%$). La dureza de Cr_3C_2 (0,5% 1%) alcanza HV 2200 ± 50 , porque los átomos de Cr inhiben el deslizamiento del límite de grano (el coeficiente de fricción disminuye a $< 0,2 \pm 0,05$).

Proceso de carburo cementado

La temperatura de sinterización ($1400\text{-}1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) afecta la densidad de la fase WC ($> 99 \% \pm 0,1 \%$), y una temperatura demasiado alta ($> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) provoca la volatilización de la fase Co (pérdida $< 5 \% \pm 1 \%$), lo que reduce la dureza en un $3 \% \pm 5 \% \pm 1 \%$. El prensado isostático en caliente (HIP, $100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) elimina los poros (porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y aumenta la dureza en un $2 \% \pm 0,5 \%$.

Alrededores

Las altas temperaturas ($600\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$) reducen la energía de enlace del cobre (la longitud del enlace aumenta $0,1 \text{ \AA} \pm 0,02 \text{ \AA}$) y la dureza disminuye entre un 10% y un $30 \% \pm 2 \%$. El calor húmedo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(40 °C, 90 % de humedad) causa corrosión del cobre (pérdida de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2$) y la dureza disminuye entre un $<2 \% \pm 0,5 \%$. El frío extremo (40 °C) causa fragilización del cobre y la dureza aumenta entre un $1 \% \pm 0,3 \%$. La radiación (10^4 Gy) causa defectos y la dureza disminuye entre un $<1 \% \pm 0,2 \%$.

Estado de la superficie del carburo cementado

La rugosidad de la superficie ($R_a > 0,4 \text{ }\mu\text{m}$) reduce la precisión de la sangría ($\text{error} > 2\% \pm 0,5\%$); el recubrimiento (como Al_2O_3 , $5 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$) aumenta la dureza de la superficie a $\text{HV } 2200 \pm 50$ debido a la tensión de compresión ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Por ejemplo, una herramienta con un 8 % de Co y un 0,5 % de Cr_3C_2 ($\text{HV } 1900 \pm 50$, proceso HIP) mantiene una dureza de $\text{HV } 1850 \pm 30$ y una vida útil de $> 15 \pm 1$ hora en corte en caliente húmedo (40 °C, 90 % de humedad). La optimización requiere un proceso con bajo contenido de Co (6 % 8 %) y alta densidad.

3.1.2 Tenacidad del carburo cementado

La tenacidad del carburo cementado se refiere a su capacidad para resistir la propagación de grietas y la fractura, y es un indicador clave de rendimiento para medir la resistencia al impacto y la fiabilidad de los materiales. Dado que el carburo cementado utiliza carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, su tenacidad se ve afectada principalmente por el tamaño de grano, el contenido de la fase aglutinante, la microestructura y el proceso de preparación.

Definición de tenacidad a la fractura

La tenacidad a la fractura (KIC) es la capacidad del carburo cementado para resistir la propagación de grietas, generalmente expresada en $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, y refleja la resistencia a la fractura del material cuando se somete al factor de intensidad de tensión en la punta de la grieta (ASTM E399).

Rango de tenacidad a la fractura

El carburo cementado convencional (tamaño de grano $1\text{-}5 \text{ }\mu\text{m}$) tiene un KIC de $8\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, dependiendo del contenido de Co. El carburo cementado de grano fino ($0,5\text{-}1 \text{ }\mu\text{m}$) y de grano ultrafino ($0,2\text{-}0,5 \text{ }\mu\text{m}$) tiene un KIC de $7\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, y la ruta de propagación de grietas es más complicada debido al aumento del área del límite de grano (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals 2024). El carburo cementado a nanoescala ($0,05\text{-}0,2 \text{ }\mu\text{m}$) tiene un KIC de $6\text{-}9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, con menor tenacidad y concentración de tensiones debido a los granos finos (ITIA 2024).

Factores que afectan la tenacidad a la fractura

Contenido de la fase aglutinante

Cuando el contenido de Co aumenta del 6% al 15%, el KIC se puede aumentar en un 20%-30% (de $8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $10\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) porque el Co proporciona un amortiguador plástico.

Tamaño del grano

El tamaño del grano se reduce de $5 \text{ }\mu\text{m}$ a $0,2 \text{ }\mu\text{m}$, el KIC disminuye entre un 15% y un 20%, pero

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se mejora la resistencia al desgaste.

Defectos microscópicos

La porosidad o grietas reducen el KIC entre un 5% y un 10%.

Aplicación de la tenacidad a la fractura

La tenacidad a la fractura es un indicador clave para evaluar la resistencia al astillamiento de las herramientas y la resistencia al impacto de los moldes. Por ejemplo, en cortes a alta velocidad (200 m/min), la vida útil del carburo cementado con un $KIC > 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ puede alcanzar las 2-3 horas (Journal of Materials Science 2025).

Definición de tenacidad al impacto

cm^2 mediante prueba de impacto Charpy o Izod (ASTM E23).

Rango de tenacidad a la fractura:

El carburo cementado de grano grueso ($>5 \mu\text{m}$) es de $10\text{-}20 \text{ J/cm}^2$ debido a su gran tamaño de grano y distribución uniforme de Co.

La tenacidad de los carburos cementados de grano fino y ultrafino es de $5 \text{ a } 12 \text{ J/cm}^2$ y la tenacidad disminuye a medida que disminuye el tamaño del grano.

La tenacidad al impacto del carburo cementado de grado nanométrico es inferior a 5 J/cm^2 y su resistencia al impacto es relativamente débil.

Factores que afectan la tenacidad a la fractura:

Contenido de Co: cuando el Co aumenta del 6% al 12%, la tenacidad al impacto aumenta aproximadamente entre un 30% y un 40% porque la fase Co mejora la absorción de energía.

Proceso de sinterización: El prensado isostático en caliente (HIP) reduce la porosidad y mejora la tenacidad al impacto en un 10%-15%.

Temperatura ambiente: A bajas temperaturas ($-50 \text{ }^\circ\text{C}$), la tenacidad al impacto disminuye aproximadamente entre un 20 % y un 25 %, y los materiales con alto contenido de Co son más estables.

Aplicación: La tenacidad al impacto es adecuada para brocas de minería y matrices de estampación. Bajo impactos de alta frecuencia (>2000 impactos/minuto), la vida útil del material con una tenacidad $>10 \text{ J/cm}^2$ puede alcanzar las 200-300 horas.

Definición de tenacidad a la fatiga

La tenacidad a la fatiga describe la capacidad del carburo cementado para resistir el crecimiento de grietas bajo carga cíclica y generalmente se caracteriza por la tasa de crecimiento de grietas por fatiga (da/dN , m/ciclo) o el límite de fatiga (MPa) (ASTM E647).

Rango de tenacidad a la fatiga:

El límite de fatiga del carburo cementado convencional es de $800 \text{ a } 1200 \text{ MPa}$ y la tasa de crecimiento de grietas por fatiga es de aproximadamente $10^{-6} \text{ - } 10^{-5} \text{ m/ciclo}$.

Debido a la concentración de la tensión del límite de grano, el límite de fatiga del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a escala nanométrica se reduce a 600-900 MPa y la tasa de expansión aumenta a 10^{-5} - 10^{-4} m/ciclo.

Factores que afectan la tenacidad a la fatiga:

Calidad de la superficie: rugosidad de la superficie $Ra > 0,8 \mu m$, la vida útil por fatiga disminuye entre un 20% y un 30%.

Defectos: La porosidad o fase amorfa reduce el límite de fatiga en un 10%-15%.

Recubrimiento: El recubrimiento PVD TiAlN puede aumentar la vida útil por fatiga en aproximadamente un 15%-20% debido a la reducción de la iniciación de grietas en la superficie.

Aplicación de la tenacidad a la fatiga

La tenacidad a la fatiga es fundamental para las herramientas cargadas cíclicamente (como las fresas), donde la vida útil por fatiga puede alcanzar entre 1000 y 1500 horas a 10^7 ciclos (500 MPa).

Definición de tenacidad térmica

La tenacidad en caliente refleja la resistencia al agrietamiento del carburo cementado bajo ciclos térmicos de alta temperatura o choques térmicos, y generalmente se caracteriza por la vida útil por fatiga térmica (número de ciclos) o la tenacidad a la fractura a alta temperatura (KIC, 1000 °C) (ASTM E1830).

Rango de tenacidad térmica

La vida útil por fatiga térmica del carburo cementado convencional es de 500 a 1000 veces (500 °C) y el KIC de alta temperatura es de 6 a $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

que contiene TaC o TiC puede alcanzar 1000-1500 veces, y la temperatura alta KIC es de 7 - $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Factores que afectan la tenacidad térmica

Desajuste de expansión térmica: el desajuste entre WC ($5,2 \times 10^{-6} / \text{K}$) y Co ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$) conduce a estrés térmico y a una disminución del 10%-15% en la tenacidad.

Oxidación a alta temperatura: aumento de peso por oxidación a $1000^\circ\text{C} > 0,1 \text{ mg/cm}^2$, la tenacidad térmica disminuyó en aproximadamente un 20 %.

Tamaño de grano: Los materiales a nanoescala tienen estrés térmico concentrado y su tenacidad térmica disminuye entre un 15% y un 20%.

Aplicación de la tenacidad térmica

La tenacidad térmica es adecuada para el corte a alta temperatura (como piezas de motores de aeronaves, 250 m/min) y la vida útil puede alcanzar las 2-3 horas.

5. Factores clave que afectan la resiliencia

Composición de la fase de unión: La aleación de Ni o Co-Cr reemplaza al Co puro y la tenacidad se mejora entre un 5 % y un 10 % porque la fase de Ni tiene una fuerte resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $< 0,03 \text{ mm/año}$, ASTM G31).

Microestructura: la fase η o el carbono libre reducen la tenacidad entre un 5% y un 15%, y el prensado isostático en caliente (HIP) puede restaurar aproximadamente el 10% de la tenacidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimización del proceso: la adición de inhibidores de grano (como VC 0,2%-0,5%) puede aumentar la tenacidad entre un 5% y un 8% (ITIA 2024).

La tenacidad a la fractura (K_{Ic}) del carburo cementado es de $820 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, que es mejor que la de la cerámica ($K_{Ic} 35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y el nitruro de silicio ($K_{Ic} 68 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), y ligeramente inferior a la del acero de alta resistencia ($K_{Ic} 2030 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), lo que permite soportar condiciones de alto impacto como la perforación y el punzonado de rocas. La tenacidad se origina a partir de la deformación plástica de la fase Co (deformación $<5 \% \pm 0,5 \%$, límite elástico $>500 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), disipando energía a través de la deflexión de la grieta (ángulo $>30^\circ \pm 5^\circ$) y la formación de puentes (fuerza de formación de puentes $>10 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$). El K_{Ic} del carburo cementado que contiene 12% de Co es $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$, y el del carburo cementado que contiene 6% de Co es $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,2$.

El contenido de Co regula la tenacidad. Cuando el Co aumenta del 6% al 20%, K_{Ic} aumenta de 8 a $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, debido a la mayor absorción de energía (energía disipada $>50 \text{ J/m}^2 \pm 5 \text{ J/m}^2$) de la red de fase de Co (espesor $1030 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, véase el Capítulo 2). La adición de TaC (1% 2%) aumenta la resistencia del borde de grano ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), K_{Ic} aumenta a $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y la profundidad de extensión de la grieta es $<10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$.

La broca de carburo que contiene 12% de Co y 1% de TaC tiene una longitud de grieta de $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ y una vida útil de $>250 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ en la perforación de granito (frecuencia de impacto >2000 veces/min, carga $>3000 \text{ MPa}$, energía de impacto $>100 \text{ J} \pm 10 \text{ J}$), que es mejor que la de la broca de cerámica (vida útil $<50 \text{ h}$, grieta $>20 \mu\text{m}$).

y ambiente húmedo (40°C , 90 % de humedad, 168 horas), debido a la corrosión de la fase Co (profundidad $<2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, pérdida de peso $<0,2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$), K_{Ic} disminuye en un 5 % 10 % $\pm 1 \%$. En frío extremo (40°C), debido a la fragilización del Co (conversión de tenacidad-resistencia, caída de deformación $<3 \% \pm 0,3 \%$), K_{Ic} disminuye en un 3 % $\pm 0,5 \%$. La alta presión ($>100 \text{ MPa}$, mar profundo) mejora la unión de los límites de grano, K_{Ic} aumenta en un 2 % $\pm 0,3 \%$. La radiación (10^4 Gy) induce defectos de la fase Co (densidad de vacantes $< 10^{15} / \text{cm}^3$) y K_{Ic} disminuye en un $<2 \% \pm 0,3 \%$.

El carburo cementado que contiene Ni (12 % Ni, $K_{Ic} 13 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$) es más estable en el entorno marino (salinidad 3,5 %, $\text{O}_2 8 \text{ mg/L}$), con una caída de K_{Ic} de $<2 \%$. Por ejemplo, las herramientas de perforación de roca que contienen Ni funcionan en una mina caliente y húmeda (pH 6, humedad 90 %, temperatura 40°C), con un K_{Ic} de $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$ y un aumento de la vida útil del 30 % $\pm 5 \%$, lo cual es mejor que los materiales que contienen Co (reducción de la vida útil del 10 % $\pm 2 \%$).

Para optimizar la tenacidad es necesario equilibrar la dureza. Un alto contenido de Co ($>15 \%$) aumenta la K_{Ic} a $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, pero la dureza disminuye a un HV de 1400 ± 30 ; la adición de NbC (0,5 % 1 %) aumenta la K_{Ic} a $15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ al refinar la trayectoria de la grieta (ancho de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

grieta $<1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$), y la dureza se mantiene en un HV de 1800 ± 30 .

Por ejemplo, en estampado de alta frecuencia ($>10^4$ veces/hora, carga $>2000 \text{ MPa}$), las matrices de carburo cementado con 10% Co y 0,5% NbC tienen deformación $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, tasa de agrietamiento $<0,5\%$ y vida útil $>6000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$, lo cual es mejor que las matrices de acero (deformación $>0,05 \text{ mm}$, vida útil $<2000 \text{ horas}$). Las comparaciones entre dominios muestran que el carburo cementado tiene mejor tenacidad que la cerámica y la alúmina ($K_{Ic} < 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), pero es inferior al acero tenaz en tenacidad de alto impacto ($K_{Ic} > 50 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

3.1.2.1 Método de prueba de tenacidad

Las pruebas de tenacidad garantizan la resistencia al agrietamiento, los métodos incluyen:

Viga con entalla de un solo borde (SENB, ASTM E399)

El carburo cementado con 12 % de Co ($K_{Ic} 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$) se flexiona en tres puntos. La muestra tiene unas dimensiones de $4 \times 4 \times 20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, la profundidad de la muesca es de $2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, la distancia entre ejes es de $20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, la velocidad de carga es de $0,1 \text{ mm/min} \pm 0,01 \text{ mm/min}$ y el error es de $<2 \% \pm 0,5 \%$. Los requisitos ambientales son de $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ y la humedad es de $<60 \% \pm 5 \%$.

Ensayo de entalla en forma de V (ASTM E1304): El carburo cementado que contiene 6 % de Co ($K_{Ic} 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,2$) utiliza una entalla en forma de V, muestra de $5 \times 5 \times 25 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, velocidad de carga de $0,05 \text{ mm/min} \pm 0,005 \text{ mm/min}$, error $<3 \% \pm 0,5 \%$, adecuado para muestras pequeñas.

Prueba de tenacidad al impacto (ISO 148)

La aleación dura que contiene 15% de Co (energía de impacto $> 20 \text{ J} \pm 2 \text{ J}$) fue impactada por Charpy, con una muestra de $10 \times 10 \times 55 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una energía de péndulo de $300 \text{ J} \pm 5 \text{ J}$ y un error de $<5 \% \pm 1\%$, lo que es adecuado para pruebas de herramientas de minería.

Simulación de mecánica de fracturas: se utilizó el análisis de elementos finitos (ANSYS, tamaño de malla $<0,1 \text{ mm}$, error de extensión de grieta $<0,05 \text{ mm}$) para carburo cementado que contiene 10 % de Co para predecir K_{Ic} (error $<5 \% \pm 1 \%$), lo cual es adecuado para análisis de tensiones complejos.

Análisis de microfisuras

Se evaluó el contenido de TaC (profundidad de grieta $<10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$) mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $<5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) (error $<5 \% \pm 1 \%$).

Por ejemplo, una broca que contiene 12% de Co y 1% de TaC pasa la prueba SENB ($K_{Ic} 14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), lo que garantiza una vida útil de impacto de $>250 \text{ h} \pm 20 \text{ h}$ y una longitud de grieta verificada por SEM de $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1.2.2 Descripción general de los factores que afectan la tenacidad

La resiliencia se ve afectada por:

Elemento

Aumentar el contenido de Co del 6% al 20% aumenta K_{Ic} de 8 a 18 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ debido a la plasticidad de la fase Co (módulo de corte $80 \text{ GPa} \pm 5 \text{ GPa}$) que mejora la disipación de grietas (energía $> 50 \text{ J/m}^2 \pm 5 \text{ J/m}^2$). La sustitución de Ni por Co (12% Ni, K_{Ic} 13 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$) reduce la tenacidad debido a la baja plasticidad de Ni (deformación $< 4\% \pm 0,5\%$). Añadir TaC (1% 2%) aumenta K_{Ic} a 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ debido al fortalecimiento del límite de grano (resistencia de unión $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).

Tecnología

El tiempo de sinterización ($24 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) aumenta la uniformidad de la fase de Co (error de distribución $< 5\% \pm 1\%$) y la K_{Ic} aumenta un $5\% \pm 1\%$. Una temperatura demasiado alta ($> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) provoca la volatilización del Co y la K_{Ic} disminuye un $3\% \pm 1\%$. La HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) reduce los defectos (porosidad $< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la K_{Ic} aumenta un $3\% \pm 0,5\%$.

Ambiente

En caso de calor húmedo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad), K_{Ic} disminuye en un $5\% \pm 1\%$ debido a la corrosión del Co (pérdida de peso $< 0,2 \text{ mg/cm}^2$); en caso de frío extremo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$), K_{Ic} disminuye en un $3\% \pm 0,5\%$ debido a la fragilización del Co; en caso de alta presión ($> 100 \text{ MPa}$), K_{Ic} aumenta en un $2\% \pm 0,3\%$ debido a una mejor unión; en caso de radiación (10^4 Gy), K_{Ic} disminuye en un $< 2\% \pm 0,3\%$ debido a defectos.

Estado de estrés

Cuando la frecuencia de impacto (> 2000 veces/min) induce grietas por fatiga (longitud $> 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), K_{Ic} disminuye en un $5\% \pm 1\%$; bajo carga estática ($< 3000 \text{ MPa}$), K_{Ic} es estable.

Una broca con 12 % de Co y proceso HIP (K_{Ic} 15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$) se opera en una mina caliente y húmeda ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad). El K_{Ic} se mantiene a 14 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,3$ y la vida útil es de más de 250 horas ± 20 horas. La optimización requiere una alta adición de Co (12 % 15 %) y TaC.

3.1.3 Resistencia del carburo cementado

La resistencia del carburo cementado se refiere a su capacidad para resistir la deformación o fractura causada por fuerzas externas y es un indicador importante para medir la capacidad de carga y la durabilidad del material. Dado que el carburo cementado utiliza carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante, su resistencia se ve afectada por el tamaño del grano, el contenido de la fase aglutinante y la microestructura. A continuación, se presentan los principales tipos de resistencia del carburo cementado y sus descripciones detalladas.

3.1.3.1 Resistencia a la rotura transversal (TRS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Definición

La resistencia a la flexión es la capacidad del carburo cementado para resistir la fractura en una prueba de flexión de tres o cuatro puntos. Se mide en mpa y refleja la capacidad portante del material bajo tensión compleja.

Alcance

El carburo cementado convencional (tamaño de grano de 1 a 5 μm) es de 1800 a 2500 MPa y el contenido de Co es del 6 % al 15 %.

El carburo cementado de grano fino (0,5-1 μm) y de grano ultrafino (0,2-0,5 μm) es de 1700-2200 MPa.

El carburo cementado de tamaño nanométrico (0,05-0,2 μm) es de 1600-1900 MPa, pero la resistencia se reduce debido a la concentración de tensión en los límites del grano.

Características de rendimiento

La resistencia a la flexión suele ser de 4000-4500 MPa $\pm$ 100 MPa, superior a la del acero de alta resistencia ($\sim$ 1500 MPa), la cerámica ($\sim$ 1000 MPa) y las aleaciones de titanio ($\sim$ 800 MPa), y adecuada para condiciones de tensión complejas como la estampación y el procesamiento aeronáutico. La fase Co inhibe la propagación de grietas (velocidad de grieta $< 10^{-5}$ m/s $\pm$ 10^{-6} m/s) mediante deformación plástica (deformación $< 5\% \pm 0,5\%$, esfuerzo cortante < 100 MPa $\pm$ 10 MPa). Por ejemplo, la resistencia a la flexión del carburo cementado con un 10 % de Co es de 4200 MPa $\pm$ 100 MPa, mientras que la del carburo cementado con un 15 % de Co desciende a 4000 MPa $\pm$ 100 MPa.

Solicitud

El contenido de Co en las matrices de carburo cementado que contienen un 8% en el estampado de placas de acero para automóviles (carga > 2000 MPa, frecuencia $> 10^4$ veces/hora, espesor de placa 2 mm $\pm$ 0,1 mm) es $< 0,5\%$ y la vida útil es > 6000 horas $\pm$ 500 horas, lo que es mejor que el de las matrices de acero (tasa de fractura $> 5\%$, vida útil < 2000 horas).

que contiene 10% de Co y 1% de TaC tiene una tasa de fractura de $< 1\%$ y una vida útil de > 12 horas $\pm$ 1 hora en el corte de aleación de titanio de aviación (tensión > 2000 MPa, velocidad de corte 150 m/min), lo que es mejor que las herramientas de cerámica (vida útil < 4 horas).

Factores influyentes

Contenido conjunto

Al aumentar del 6% al 15%, la resistencia cae de 4500 a 4000 MPa $\pm$ 100 MPa porque la fase Co reduce la rigidez; la adición de NbC (0,5% - 1%) la aumenta a 4600 MPa $\pm$ 100 MPa a través del fortalecimiento de la solución sólida (resistencia del límite de grano > 50 MPa $\pm$ 5 MPa).

Tecnología

La temperatura de sinterización (1450 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$) asegura la unión WC-Co (resistencia de unión > 50 MPa $\pm$ 5 MPa) y la resistencia aumenta en un 3 % $\pm$ 0,5 %; HIP (100 MPa $\pm$ 5 MPa) elimina grietas (< 5 $\mu\text{m} \pm 1$ μm) y la resistencia aumenta en un 5 % $\pm$ 1 %; la velocidad de enfriamiento ($>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 °C/min) induce tensión ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y la resistencia disminuye en un $2 \% \pm 0,3 \%$.

Ambiente

Alta temperatura (800 °C) debido al ablandamiento del Co (el límite elástico disminuyó en $<400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), disminuyó a $3800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ (disminuyó en $<10 \%$); calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad, 168 horas) debido a la corrosión del Co (pérdida de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$), disminuyó en un $5 \% \pm 1 \%$; alta presión ($> 100 \text{ MPa}$) aumentó en un $2 \% \pm 0,3 \%$; frío extremo (-40 °C) aumentó en un $3 \% \pm 0,5 \%$; radiación (10^{-4} Gy) disminuyó en un $<1 \% \pm 0,2 \%$. Al contener Cr (0,5 %-1 %) se forma una capa protectora de Cr_2O_3 (espesor $<5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), el calor húmedo disminuyó en un $<2 \%$.

Geometría de muestra

Un espesor $> 4 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ reduce la concentración de tensiones (coeficiente $< 1,2 \pm 0,1$) y la resistencia aumenta en un $2\% \pm 0,3\%$; los defectos superficiales ($R_a > 0,4 \text{ } \mu\text{m}$) inducen grietas, reduciendo la resistencia en un $3\% \pm 0,5\%$.

Métodos de detección

Flexión en tres puntos (ISO 3327)

Muestra $4 \times 4 \times 40 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, distancia $20 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, velocidad de carga $0,2 \text{ mm/min} \pm 0,02 \text{ mm/min}$, error $<2\% \pm 0,5\%$, ambiente $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

Curva de cuatro puntos (ASTM C1161)

La muestra mide $3 \times 4 \times 45 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, el espaciado del punto de carga es de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y el error es $<3 \% \pm 0,5 \%$, lo que es adecuado para un análisis de tensión uniforme.

Prueba ultrasónica (ASTM E588)

Onda longitudinal (frecuencia $5 \text{ MHz} \pm 0,1 \text{ MHz}$, velocidad de onda $6 \text{ km/s} \pm 0,1 \text{ km/s}$), detección de grietas ($<5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$), error $<5 \% \pm 1 \%$.

Correlación de imágenes digitales (DIC)

Error de deformación $<0,1\% \pm 0,02\%$, cámara de alta resolución (resolución $<5 \text{ } \mu\text{m} \pm 1 \text{ } \mu\text{m}$), análisis de deformación por fractura, error $<5\% \pm 1\%$.

3.1.3.2 Resistencia a la compresión

Definición: La resistencia a la compresión es la capacidad del carburo cementado para resistir la deformación o el daño por compresión, medida en MPa, y refleja la capacidad de soporte del material bajo cargas elevadas.

Alcance

La resistencia a la compresión del carburo cementado suele ser de $4000 \text{ a } 6000 \text{ mpa} \pm 100 \text{ mpa}$, que es mucho mayor que la del acero de alta resistencia ($\sim 2000 \text{ mpa}$), la cerámica ($\sim 3000 \text{ mpa}$) y la aleación de titanio ($\sim 1000 \text{ mpa}$), y es adecuada para condiciones de alta carga como la perforación en aguas profundas y la extrusión.

Los materiales a nanoescala pueden alcanzar de $5000 \text{ a } 6500 \text{ mpa} \pm 100 \text{ mpa}$, lo que se mejora

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante el refinamiento del grano.

Características de rendimiento

La resistencia a la compresión está determinada por la rigidez del WC (coeficiente de Poisson $0,2 \pm 0,02$, módulo de Young $700 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$), y la fase de Co alivia la concentración de tensiones (disminución de la tensión $>20 \% \pm 2 \%$, tensión de corte $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$). Por ejemplo, la resistencia a la compresión del carburo cementado con un 10 % de Co es de $4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, y la del carburo con un 6 % de Co alcanza los $4700 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Solicitud

La broca de carburo que contiene 6% de Co tiene una deformación de $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y una vida útil de $>300 \text{ horas} \pm 20 \text{ horas}$ en perforación de roca dura (tensión $> 3000 \text{ MPa}$, dureza de la roca $> 1000 \text{ MPa}$, velocidad de perforación $> 10 \text{ m/h} \pm 1 \text{ m/h}$), que es mejor que la de las brocas de acero (deformación $> 0,05 \text{ mm}$, vida útil $< 100 \text{ horas}$).

La deformación del rodillo de carburo cementado que contiene Cr (0,5%-1%) durante el triturado de mineral (carga $> 4000 \text{ MPa}$, tamaño de partícula $< 10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$) es $< 0,003 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y la vida útil aumenta en un $35\% \pm 5\%$.

La matriz de extrusión que contiene 8% de Co tiene una deformación de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ y una vida útil de $>5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$ en el procesamiento de aleación de aluminio (600°C , carga $> 4000 \text{ MPa}$, velocidad de extrusión $> 5 \text{ m/min} \pm 0,5 \text{ m/min}$), que es mejor que la de la matriz de acero (vida útil $<1000 \text{ horas}$).

Factores influyentes

Elemento

Cuando el contenido de Co aumenta del 6% al 20%, la resistencia disminuye de $4700 \text{ a } 4100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ porque la fase Co reduce la rigidez (módulo de Young $200 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$); Cr (0,5% - 1%) aumenta a $4800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ porque se mejora la solución sólida de CrCo (resistencia de unión $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$); TiC (10% - 15%) disminuye a $4300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ porque disminuye la densidad ($< 13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$).

Tecnología

La presión de sinterización ($510 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$) mejora la densidad ($> 99 \% \pm 0,1 \%$) y la resistencia aumenta en un $3 \% \pm 0,5 \%$; HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) elimina los poros (porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$) y aumenta la resistencia en un $5 \% \pm 1 \%$; una temperatura excesivamente alta ($> 1550^\circ\text{C}$) provoca la descomposición del WC (pérdida de carbono $< 1 \% \pm 0,2 \%$) y disminuye la resistencia en un $3 \% \pm 0,5 \%$.

Ambiente

La temperatura alta (800°C) disminuyó a $4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ (disminuyó $<10 \%$) debido a la energía de enlace reducida (la longitud de enlace aumentó $0,1 \text{ \AA} \pm 0,02 \text{ \AA}$); el calor húmedo (40°C , 90 % de humedad, 168 horas) disminuyó $3 \% \pm 0,5 \%$ debido a la microcorrosión de Co (pérdida de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$); el frío extremo (-40°C) aumentó $2 \% \pm 0,3 \%$ debido a la rigidez mejorada del WC; la alta presión ($> 100 \text{ MPa}$, mar profundo) aumentó $3 \% \pm 0,5 \%$; 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

radiación (10^{-4} Gy) disminuyó $<1\% \pm 0,2\%$. El níquel que contiene (12% de Ni, $4500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) es más estable en el ambiente marino (salinidad $3,5\%$, presión 50 MPa), con una disminución de $<1\%$.

Tasa de carga

Una velocidad alta ($>1\text{ mm/min}$) induce microfisuras (longitud $<5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$), con una reducción del $2\% \pm 0,3\%$; una velocidad baja ($<0,5\text{ mm/min}$) mantiene la resistencia estable.

Métodos de detección

Compresión de probeta cilíndrica (ASTM C773)

El diámetro de la muestra es de $10\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, la altura es de $20\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, la tasa de compresión es de $0,5\text{ mm/min} \pm 0,05\text{ mm/min}$, el error es $<2\% \pm 0,5\%$, el entorno es de $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la superficie Ra es $<0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$.

Prueba de carga estática

Se utiliza una prensa servohidráulica (precisión de carga $\pm 1\text{ kN}$, carga máxima $5000\text{ kN} \pm 10\text{ kN}$) con un error de $<3\% \pm 0,5\%$, que es adecuada para muestras grandes.

Pruebas no destructivas (ultrasónicas, ASTM E494)

Detección de fallas por ondas longitudinales (velocidad de onda $6\text{ km/s} \pm 0,1\text{ km/s}$, frecuencia $5\text{ MHz} \pm 0,1\text{ MHz}$), error $<5\% \pm 1\%$, adecuado para detección in situ.

Simulación de elementos finitos

Se utilizó ANSYS (tamaño de malla $<0,1\text{ mm}$, error de tensión $<10\text{ MPa}$) para predecir la resistencia con un error de $<5\% \pm 1\%$.

3.1.3.3 Resistencia a la tracción

Definición

La resistencia a la tracción es la capacidad del carburo cementado para resistir la fractura por tracción y se mide en mpa, pero suele ser baja debido a su fragilidad.

Alcance

La resistencia a la tracción del carburo cementado convencional es de $800\text{ a }1200\text{ mpa}$, que está limitada por el debilitamiento del límite del grano.

Los materiales a escala nanométrica pueden alcanzar entre $1000\text{ y }1400\text{ MPa}$, y trazas de Ni mejoran la tenacidad.

Factores influyentes

Un aumento en el contenido de Co (por ejemplo, del 6% al 15%) mejora el producto en aproximadamente un $10\%-15\%$; los defectos (por ejemplo, los poros) disminuyen en aproximadamente un $5\%-10\%$.

solicitud

Adecuado para piezas con pequeñas cargas de tracción, como matrices de trefilado y piezas de microtrefilado.

3.1.3.4 Resistencia a la fatiga

Definición

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La resistencia a la fatiga es la capacidad del carburo cementado para resistir la fractura por fatiga bajo carga cíclica, medida en mpa.

Alcance

El límite de fatiga del carburo cementado convencional es de 800-1200 MPa, 10^7 ciclos.

Los materiales a nanoescala se reducen a 600-900 MPa debido a la concentración de la tensión en el límite del grano.

Factores influyentes

Una rugosidad superficial $R_a > 0,8 \mu\text{m}$ reduce la vida útil por fatiga en un 20%-30%; el recubrimiento (como TiAlN) la aumenta en aproximadamente un 15%-20%.

Solicitud

Adecuado para herramientas cargadas cíclicamente, como fresas, con una vida útil de 1000 a 1500 horas.

3.1.3.5 Resumen de factores influyentes

Fase de unión

A medida que aumenta el contenido de Co, aumenta la resistencia, pero un contenido de Co demasiado alto (>15%) puede reducir la dureza.

Tamaño del grano

El refinamiento del tamaño del grano (por ejemplo, $0,2 \mu\text{m}$) aumenta la resistencia a la compresión pero reduce la resistencia a la flexión y a la fatiga.

Defecto

La porosidad, la fase amorfa o las grietas reducen todos los tipos de resistencia entre un 5% y un 15%.

3.1.3.6 Sugerencias de entorno y optimización

Impacto ambiental

Las altas temperaturas (800°C) reducen la resistencia entre un 10 % y un 1 %; el calor húmedo (40°C , 90 % de humedad) reduce la resistencia entre un 3 % y un 5 %; la alta presión ($>100 \text{ MPa}$) aumenta la resistencia entre un 2 % y un 3 %; el frío extremo (-40°C) aumenta la resistencia entre un 2 % y un 3 %; la radiación (10^{-4} Gy) afecta la resistencia en menos del 1 %. Los carburos cementados que contienen Ni o Cr son más estables en entornos hostiles (como el océano o el calor húmedo).

Sugerencias de optimización

Adopte bajo contenido de Co (6%-8%), alta densidad ($>99\%\pm 0,1\%$) y proceso HIP, agregue NbC o TaC para mejorar la resistencia y extender la vida útil en un 30%-35%.

3.2 Propiedades térmicas del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las propiedades térmicas determinan el rendimiento del carburo cementado en cortes a alta temperatura, ciclos térmicos y entornos térmicos extremos, y se utilizan ampliamente en motores aeronáuticos, turbinas de gas y energía nuclear. Esta sección analiza la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la estabilidad a altas temperaturas y la resistencia al choque térmico.

3.2.1 Conductividad térmica del carburo cementado

La conductividad térmica del carburo cementado es de $80120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, que es mayor que la de la cerámica ($2030 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), la alúmina ($30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y menor que la del cobre ($400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y el grafito ($150 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Está determinada por el WC ($110 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, dominado por la conductividad térmica electrónica) y el Co ($70 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, dispersión de fonones $>20\% \pm 2\%$). La conductividad térmica del carburo cementado que contiene un 10% de Co es de $100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, y la que contiene un 15% de Co desciende a $90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

La alta conductividad térmica reduce la temperatura de la herramienta. En el corte a alta velocidad de aleaciones de aluminio para aviación (200 m/min , densidad de flujo térmico $>10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$), la temperatura superficial de las herramientas de carburo cementado con un 8 % de Co es $<700 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, el desgaste es $<0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ y la vida útil es $>12 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$, lo que es mejor que la de las herramientas cerámicas (temperatura $>900 \text{ }^\circ\text{C}$, vida útil $<4 \text{ horas}$). La adición de TiC (15 %, conductividad térmica $30 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) la reduce a $85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, pero mejora la estabilidad a alta temperatura, lo que la hace adecuada para boquillas de aviación ($1100 \text{ }^\circ\text{C}$, caudal de gas $>500 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$). Por ejemplo, la boquilla que contiene 15% de TiC en la turbina de gas tiene una difusividad térmica de $>30 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 2 \text{ mm}^2/\text{s}$, una deformación de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ y una vida útil de $>6000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$.

Los impactos ambientales requieren atención. A alta temperatura ($800 \text{ }^\circ\text{C}$), la conductividad térmica cae a $90 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (una disminución de $<10 \%$) debido a la dispersión de electrones de fase Co (la movilidad disminuye $<10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$); con calor húmedo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad, 168 horas), la conductividad térmica cae a $<2 \%$ $\pm 0,5 \%$ debido a la oxidación de la superficie (capa de oxidación $<1 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$); con frío extremo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$), la conductividad térmica aumenta en 1% $\pm 0,3 \%$ debido a la conductividad térmica mejorada de los fonones; a alta presión ($>100 \text{ MPa}$), la conductividad térmica aumenta en 2% $\pm 0,3 \%$; con radiación (10^{-4} Gy), la conductividad térmica cae en $<1 \%$ $\pm 0,2 \%$. El carburo cementado que contiene Ni (12 % Ni, $95 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) es más estable en ambientes marinos (salinidad 3,5 %, presión 50 MPa), con una disminución de $<1 \%$.

Por ejemplo, la conductividad térmica del molde que contiene Ni se mantuvo en $93 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ y la deformación fue $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ durante el estampado en caliente húmedo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad, $600 \text{ }^\circ\text{C}$), lo que fue mejor que la del material que contiene Co (disminución $>3 \%$ $\pm 0,5 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La optimización de la conductividad térmica requiere un rendimiento equilibrado a altas temperaturas. En el corte por ciclo térmico ($25\ 800\ ^\circ\text{C}$, 1000 veces, diferencia de temperatura $>500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$), la longitud de grieta de las herramientas de carburo cementado con un 10 % de Co es $<5 \pm 1\ \mu\text{m}$, lo que es mejor que la de las cerámicas (grieta $>20\ \mu\text{m}$). La comparación entre dominios muestra que la conductividad térmica del carburo cementado es mejor que la de las cerámicas y las aleaciones de titanio ($20\ \text{W/m}\cdot\text{K}$), pero inferior a la del cobre y el grafito.

3.2.1.1 Método de prueba de conductividad térmica

Los métodos de prueba de conductividad térmica incluyen:

Método de destello láser (ASTM E1461)

Carburo cementado con 10 % de Co ($100\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$). El diámetro de la muestra es de $12,7\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, el espesor es de $2\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, la anchura del pulso láser es de $0,5\ \text{ms} \pm 0,05\ \text{ms}$, el error de difusividad térmica es $<1\ \% \pm 0,2\ \%$ y el error total es $<2\ \% \pm 0,5\ \%$. La temperatura ambiente requiere $25\ ^\circ\text{C} \pm 2\ ^\circ\text{C}$.

Método de flujo de calor en estado estacionario (ASTM C177)

El carburo cementado que contiene 8% de Co ($98\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$) utiliza una muestra de $50 \times 50 \times 10\ \text{mm} \pm 0,1\ \text{mm}$, una diferencia de temperatura de $10\ ^\circ\text{C} \pm 0,5\ ^\circ\text{C}$, una precisión de flujo de calor de $\pm 0,1\ \text{W/m}^2$ y un error de $<3\ \% \pm 0,5\ \%$.

Método de alambre caliente transitorio (ASTM D5930): el carburo cementado que contiene TiC ($85\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$) utiliza una potencia de alambre caliente de $0,1\ \text{W} \pm 0,01\ \text{W}$, una resolución de temperatura de $0,1\ ^\circ\text{C} \pm 0,05\ ^\circ\text{C}$, un error de $<5\ \% \pm 1\ \%$ y es adecuado para materiales no uniformes.

Simulación de medición de temperatura por infrarrojos

Se analizó la distribución del flujo de calor del carburo cementado que contiene 10 % de Co (error de conductividad térmica $<5\ \% \pm 1\ \%$) utilizando una cámara infrarroja (resolución $<0,1\ ^\circ\text{C} \pm 0,05\ ^\circ\text{C}$) (error $<5\ \% \pm 1\ \%$).

Por ejemplo, una herramienta que contiene 10% de Co se prueba mediante el método de destello láser ($100\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$), y la temperatura de la superficie de verificación infrarroja es $<700\ ^\circ\text{C} \pm 20\ ^\circ\text{C}$, lo que garantiza una vida útil de corte de $>12\ \text{horas} \pm 1\ \text{hora}$.

3.2.1.2 Factores que afectan la conductividad térmica

La conductividad térmica se ve afectada por:

Composición: Cuando el contenido de Co aumenta del 10 % al 15 %, la conductividad térmica disminuye de $100\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ a $90\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ debido a la mayor dispersión de fonones del Co (tasa de dispersión $> 20\ \% \pm 2\ \%$). El TiC (15 %) disminuye a $85\ \text{W/m}\cdot\text{K} \pm 5\ \text{W/m}\cdot\text{K}$ debido a la baja

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

conductividad térmica ($30 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). El Ni (12%) aumenta a $95 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ debido a una mayor conductividad térmica electrónica (movilidad $> 1,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).

Proceso: La temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) mejora la continuidad de la fase de WC (área de contacto $> 90 \%$ $\pm 2 \%$) y la conductividad térmica aumenta un 3% $\pm 0,5 \%$; la HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) reduce la porosidad ($< 0,1 \%$ $\pm 0,02 \%$) y la aumenta un 2% $\pm 0,3 \%$. Una temperatura demasiado alta ($> 1550^\circ\text{C}$) provoca segregación de Co (tasa de segregación $< 5 \%$ $\pm 1 \%$) y la disminuye un 3% $\pm 0,5 \%$.

Medio ambiente: La temperatura alta (800°C) disminuye en un 10% $\pm 1 \%$ debido a la dispersión de electrones; el calor húmedo (40°C , 90% de humedad) disminuye en un $< 2 \%$ $\pm 0,5 \%$ debido a la capa de óxido ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$); el frío extremo (40°C) aumenta en un 1% $\pm 0,3 \%$ debido a la conducción térmica de fonones; la presión alta ($> 100 \text{ MPa}$) aumenta en un 2% $\pm 0,3 \%$; la radiación (10^4 Gy) disminuye en un $< 1 \%$ $\pm 0,2 \%$.

Tamaño de la muestra: El espesor ($> 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) reduce la dispersión de límites ($< 10 \%$ $\pm 2 \%$) y aumenta la conductividad térmica en un 2% $\pm 0,3 \%$; la rugosidad de la superficie ($R_a > 0,4 \mu\text{m}$) provoca pérdida de disipación de calor, que disminuye en un 1% $\pm 0,2 \%$.

Por ejemplo, una herramienta con un 8% de Co y un proceso HIP ($100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) mantiene una conductividad térmica de $95 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ en corte a alta temperatura (800°C) y una vida útil de más de $12 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$. La optimización requiere un bajo nivel de TiC y HIP.

3.2.2 Coeficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica (CTE) del carburo cementado es $46 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, que es menor que el de la cerámica ($810 \times 10^{-6} / \text{K}$), el acero de alta resistencia ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$) y la aleación de titanio ($9 \times 10^{-6} / \text{K}$), y está determinado por el promedio ponderado de WC ($4,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) y Co ($12 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$). El CTE del carburo cementado que contiene 10% de Co es $5,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, y el que contiene 15% de Co aumenta a $5,8 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Un CTE bajo reduce la tensión térmica ($< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). En el estampado a alta temperatura (600°C , carga $> 2000 \text{ MPa}$, diferencia de temperatura $> 400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), la deformación de los moldes de carburo cementado con un 8% de Co es $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, y la precisión se quintuplica, superando a la de los moldes de acero (deformación $> 0,05 \text{ mm}$, error de precisión $> 0,1 \text{ mm}$). La adición de TiC (15% , $\text{CTE } 7 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$) se reduce a $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, y la longitud de la fisura térmica es $< 1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Por ejemplo, la tolerancia a la deformación de las boquillas que contienen TiC en el conformado de compuestos de aviación (800°C , presión $> 100 \text{ MPa}$) es $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, y la vida útil es $> 5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$, lo que es mejor que las boquillas de cerámica (grietas $> 10 \mu\text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El impacto ambiental es limitado. La temperatura alta (1000 °C) aumenta el CTE en $0,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,05 \times 10^{-6} /K$ debido a la expansión reticular (la constante reticular aumenta en un 0,1 % $\pm$ 0,02 %); el calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad, 168 horas) no tiene cambios obvios (error $<0,05 \times 10^{-6} /K$); la presión alta (>100 MPa) disminuye en $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; el frío extremo (40 °C) disminuye en $0,1 \times 10^{-6} /K \pm 0,02 \times 10^{-6} /K$; La radiación (10^4 Gy) aumenta en $<0,05 \times 10^{-6} /K \pm 0,01 \times 10^{-6} /K$. El carburo cementado que contiene Ni (12 % Ni, $5,2 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) es más estable en el entorno marino (salinidad 3,5 %, presión 50 MPa).

Por ejemplo, un ducto que contiene Ni operó en petróleo y gas en aguas profundas (pH 8, 5000 m de profundidad) durante 3 años, con un CTE de $5,3 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$ y una deformación de $<0,01$ mm $\pm$ 0,002 mm.

La optimización del CTE requiere una baja adición de Co (6 % - 8 %) y TiC. La longitud de grieta de la herramienta con 10 % de Co en ciclos térmicos (25 800 °C, 1000 veces, diferencia de temperatura >500 °C $\pm$ 10 °C) es $<5 \pm 1$ μ m, lo cual es mejor que la de la cerámica (grieta >20 μ m). La comparación de campos cruzados muestra que el CTE del carburo cementado es mejor que el del acero y las aleaciones de titanio, pero inferior al de la aleación de invar en expansión ultrabaja ($<2 \times 10^{-6} /K$).

3.2.2.1 Método de prueba del coeficiente de expansión térmica

Los métodos de prueba de CTE incluyen:

Calorimetría diferencial de barrido (DSC, ASTM E228): Carburo cementado con 10 % de Co ($5,5 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) con un tamaño de muestra de $10 \times 5 \times 5$ mm $\pm$ 0,1 mm, una velocidad de calentamiento de 5 °C/min $\pm$ 0,5 °C/min, una precisión de desplazamiento de 0,1 μ m $\pm$ 0,05 μ m y un error de <2 % $\pm$ 0,5 %. La temperatura ambiente es de 25 °C $\pm$ 2 °C.

Análisis termomecánico (TMA, ASTM E831): carburo cementado que contiene 8% de Co ($5,4 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) utilizando una muestra de $5 \times 5 \times 10$ mm $\pm$ 0,1 mm, carga 0,1 N $\pm$ 0,01 N, resolución de temperatura 0,1 °C $\pm$ 0,05 °C, error <3 % $\pm$ 0,5 %.

Interferometría óptica: el carburo cementado que contiene TiC ($5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$) utiliza un interferómetro láser (longitud de onda 632,8 nm $\pm$ 0,1 nm, resolución 0,01 μ m $\pm$ 0,005 μ m), con un error de <5 % $\pm$ 1%, que es adecuado para alta precisión.

Difracción de rayos X (DRX): se utilizó la radiación CuK α (longitud de onda 1,5406 Å $\pm$ 0,0001 Å) para analizar el CTE de alta temperatura (error <5 % $\pm$ 1 %) del carburo cementado que contiene 10 % de Co (error de expansión reticular $<0,1$ % $\pm$ 0,02 %).

Por ejemplo, las boquillas que contienen TiC pasan las pruebas DSC y TMA ($5,0 \times 10^{-6} /K \pm 0,1 \times 10^{-6} /K$), lo que garantiza una vida útil de conformado de >5000 horas $\pm$ 500 horas.

3.2.2.2 Factores que afectan el coeficiente de expansión térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La CTE se ve afectada por los siguientes factores:

Composición: El contenido de Co aumenta del 10% al 15%, y el CTE aumenta de $5,5$ a $5,8 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ debido al alto CTE de la fase Co ($12 \times 10^{-6} / \text{K}$). TiC (15%) disminuye a $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ debido al bajo CTE ($7 \times 10^{-6} / \text{K}$). Ni (12%) disminuye a $5,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ debido al bajo CTE de Ni ($13 \times 10^{-6} / \text{K}$).

Proceso: La temperatura de sinterización ($1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) garantiza la uniformidad de WCCo (error de distribución $<5 \% \pm 1 \%$) y la estabilidad del CTE; una temperatura demasiado alta ($>1550 \text{ }^{\circ}\text{C}$) induce la segregación de Co, aumentando $0,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$. El HIP (100 MPa ± 5 MPa) reduce la tensión ($<50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y la disminuye $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Medio ambiente: La temperatura alta ($1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$) aumenta en $0,2 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$ debido a la expansión reticular; el calor húmedo ($40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 90 % de humedad) no cambia; la presión alta ($>100 \text{ MPa}$) disminuye en $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; el frío extremo ($40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) disminuye en $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$; la radiación (10^4 Gy) aumenta en $<0,05 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,01 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Tamaño de la muestra: la longitud ($>10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) reduce el error de medición ($<0,05 \times 10^{-6} / \text{K}$); la rugosidad de la superficie ($R_a > 0,4 \text{ }\mu\text{m}$) induce tensión, aumentando $0,1 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,02 \times 10^{-6} / \text{K}$.

Un molde con 8 % de Co y TiC ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, proceso HIP) mantiene un CTE de $4,9 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$ y una deformación $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ durante el estampado a alta temperatura ($600 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Se requieren TiC y HIP para la optimización.

3.2.3 Estabilidad a altas temperaturas

La dureza del carburo cementado a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ disminuye en $<30 \%$ (HV 1800 ± 30 a 1200 ± 30), lo que la hace mejor que la del acero rápido ($600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, HV 500), la cerámica ($1200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, HV 800) y las aleaciones de titanio ($600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, HV 200). La estabilidad está determinada por el alto punto de fusión del WC ($2870 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, energía de descomposición $> 500 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) y la termoplasticidad de la fase Co (temperatura de Curie $1120 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, deformación plástica $< 5 \% \pm 0,5 \%$). La dureza del carburo cementado que contiene 10 % de Co a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ es HV 1300 ± 30 y la pérdida por desgaste es $<0,2 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

La estabilidad a altas temperaturas soporta condiciones de trabajo extremas. El desgaste de la herramienta con 8% de Co en aleación de titanio de aviación a $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (velocidad de 150 m/min , densidad de flujo térmico $>10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$) es $<0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$, y la vida útil es >10 horas ± 1 hora, superior a la de las herramientas cerámicas (desgaste $>0,5 \text{ mm}$). La adición de TaC ($1\% \pm 2\%$) mejora la rigidez a altas temperaturas (reducción del módulo de Young $<5\% \pm 1\%$) mediante el refuerzo por solución sólida (deformación reticular $<2\% \pm 0,2\%$), y la dureza se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mantiene a una HV de 1400 ± 30 . Por ejemplo, la boquilla que contiene TaC funciona en una turbina de gas ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, caudal de gas $>500\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$), con daño superficial $<10\text{ }\mu\text{m} \pm 2\text{ }\mu\text{m}$ y vida útil $>6000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$, lo que es mejor que los materiales sin TaC (daño $>20\text{ }\mu\text{m}$).

Los impactos ambientales requieren atención. La oxidación a alta temperatura ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$) genera CoO y WO_3 (pérdida de peso de $0,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,1\text{ mg/cm}^2$, capa de óxido $<2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$), y la dureza disminuye entre un $5\text{ }\%$ y un $10\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$; el calor húmedo ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $90\text{ }\%$ de humedad, 168 horas) afecta a $<2\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$; la alta presión ($>100\text{ MPa}$) mejora la estabilidad, reduciéndola $<3\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$; el frío extremo ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) no presenta cambios; la radiación (10^4 Gy) reduce $<1\text{ }\% \pm 0,2\text{ }\%$. El carburo cementado con Cr ($0,5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$) forma una capa protectora de Cr_2O_3 (espesor $<5\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, coeficiente de difusión $<10^{-14}\text{ cm}^2/\text{s}$), y la dureza a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ mantiene una HV de 1350 ± 30 . Por ejemplo, la deformación de una matriz con Cr durante la extrusión a alta temperatura ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$, carga $>2000\text{ MPa}$) es $<0,01\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$, y la vida útil aumenta un $30\text{ }\% \pm 5\text{ }\%$.

La optimización requiere TaC y recubrimiento. Los recubrimientos de CVD (p. ej., Al_2O_3 , espesor $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, conductividad térmica $10\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2\text{ W/m}\cdot\text{K}$) reducen la caída de dureza en un $50\text{ }\%$. Las herramientas con recubrimientos de Al_2O_3 tienen una vida útil de $>12\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$ en el mecanizado de motores aeroespaciales ($1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, frecuencia de vibración $>10^3\text{ Hz} \pm 100\text{ Hz}$), lo cual es mejor que las herramientas sin recubrimiento (vida útil $<4\text{ horas}$). Las comparaciones entre dominios muestran que el carburo cementado tiene mejor estabilidad a alta temperatura que el acero y las aleaciones de titanio, pero es inferior a la cerámica (Si_3N_4 , dureza $>1000\text{ HV}$) a temperaturas ultraaltas ($>1500\text{ }^{\circ}\text{C}$).

3.2.3.1 Método de prueba de estabilidad a alta temperatura

Los métodos de prueba de estabilidad a alta temperatura incluyen:

Ensayo de dureza a alta temperatura (ASTM E18): Carburo cementado con $10\text{ }\%$ de Co (HV 1300 ± 30 , $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) mediante indentador Vickers, carga de $10\text{ kg} \pm 0,1\text{ kg}$, retención de $5\text{ s} \pm 0,5\text{ s}$, error $<2\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$. Requisitos ambientales: $1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, atmósfera de N_2 (pureza $>99,99\text{ }\% \pm 0,01\text{ }\%$).

Análisis termogravimétrico (TGA, ASTM E1131): carburo cementado que contiene $8\text{ }\%$ de Co (ganancia de peso por oxidación $<2\text{ mg/cm}^2 \pm 0,2\text{ mg/cm}^2$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) utilizando una muestra de $10 \times 10 \times 2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, calentamiento $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, resolución de masa $0,1\text{ }\mu\text{g} \pm 0,05\text{ }\mu\text{g}$, error $<3\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$.

Prueba de desgaste a alta temperatura (ASTM G65): carburo cementado que contiene TaC (desgaste $<0,2\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) con fricción de muela abrasiva (velocidad $1\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$, carga $50\text{ N} \pm 1\text{ N}$), error $<5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$.

Ensayo de tracción a alta temperatura: el carburo cementado que contiene Cr (límite elástico $>1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$, $800\text{ }^{\circ}\text{C}$) utiliza un diámetro de muestra de $5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, una velocidad de $0,1\text{ mm}/\text{min} \pm 0,01\text{ mm}/\text{min}$ y un error de $<5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, las boquillas que contienen TaC pasan pruebas de dureza a alta temperatura y TGA ($HV 1400 \pm 30$, ganancia de peso $< 1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$), lo que garantiza una vida útil de > 6000 horas ± 500 horas.

3.2.3.2 Factores que afectan la estabilidad a altas temperaturas

La estabilidad de altas temperaturas se ve afectada por los siguientes factores:

Composición: El contenido de Co aumenta del 6 % al 15 %, y la dureza disminuye del 25 % al 35 % ± 2 % (1000°C , $HV 1500$ a 1000 ± 30) debido al ablandamiento por Co (límite elástico $< 400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$). El TaC ($1 \% \pm 2 \%$) disminuye en $< 20 \% \pm 2 \%$ debido al endurecimiento por solución sólida. El Cr ($0,5 \% \pm 1 \%$) disminuye en $< 15 \% \pm 2 \%$ debido a la capa protectora de Cr_2O_3 .

Proceso: La temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) garantiza la estabilidad del WC (tasa de descomposición $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), lo que aumenta la estabilidad un $5 \% \pm 1 \%$; la HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) elimina defectos, lo que aumenta un $3 \% \pm 0,5 \%$. Una temperatura demasiado alta ($> 1550^\circ\text{C}$) induce oxidación (aumento de peso $> 2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,2 \text{ mg/cm}^2$), lo que disminuye un $5 \% \pm 1 \%$.

Medio ambiente: La oxidación a alta temperatura (600°C) disminuye en un $5 \% \pm 10 \%$ debido a la formación de CoO; el calor húmedo (40°C , 90 % de humedad) afecta a $< 2 \% \pm 0,5 \%$; la alta presión ($> 100 \text{ MPa}$) aumenta en un $3 \% \pm 0,5 \%$; la radiación (10^4 Gy) disminuye en un $< 1 \% \pm 0,2 \%$.

Recubrimiento: el recubrimiento de Al_2O_3 ($5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) reduce la oxidación (ganancia de peso $< 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$) y aumenta la estabilidad en un $50 \% \pm 5 \%$; el recubrimiento de TiN ($5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) aumenta en un $30 \% \pm 3 \%$.

Con recubrimiento de Cr y Al_2O_3 ($HV 1350 \pm 30$, 1000°C), presenta una deformación de $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$ y una vida útil de $> 6000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ durante la extrusión a alta temperatura (800°C). Se requieren TaC y recubrimiento para su optimización.

3.2.4 Resistencia al choque térmico

La resistencia al choque térmico del carburo cementado se evalúa mediante una prueba de choque térmico (refrigeración por agua a 500°C , 100 veces, ASTM C1525). La longitud de grieta es $< 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, superior a la de la cerámica ($> 10 \mu\text{m}$) y la alúmina ($> 15 \mu\text{m}$). La resistencia al choque térmico se determina por su bajo CTE ($5,5 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$), su alta conductividad térmica ($100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y su alta resistencia mecánica ($> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), y su tensión térmica es $< 200 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$. La profundidad de la grieta del carburo cementado que contiene 12 % de Co en un ciclo térmico (25800°C , 1000 veces, diferencia de temperatura $> 500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) es $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La resistencia al choque térmico soporta condiciones de ciclo térmico. El molde que contiene 10% Co tiene una tasa de agrietamiento de $<0.5\%$ y una vida útil de >5000 horas ± 500 horas en estampado de alta temperatura ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$, frecuencia $>10^4$ veces/hora, diferencia de temperatura $>400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), que es mejor que los moldes de acero (tasa de agrietamiento $>5\%$). Añadiendo Cr (0.5%) para formar una capa protectora de Cr_2O_3 (espesor $<5\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), la resistencia al choque térmico se mejora en un $15\% \pm 2\%$, y la tasa de iniciación de grietas se reduce en un $20\% \pm 3\%$. Por ejemplo, el daño superficial de la boquilla que contiene Cr es $<5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ en el ciclo térmico de la turbina de gas ($1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, caudal de gas $>500\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$), y la vida útil se extiende en un $35\% \pm 5\%$.

Las influencias ambientales incluyen oxidación a alta temperatura ($600\text{ }^{\circ}\text{C}$, formación de CoO , espesor $<2\text{ }\mu\text{m} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$, resistencia al choque térmico disminuida en un $5\% \pm 1\%$), calor húmedo ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 90% de humedad, disminuida en un $<2\% \pm 0.5\%$), alta presión ($>100\text{ MPa}$, aumentada en un $3\% \pm 0.5\%$), frío extremo ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$, tasa de agrietamiento aumentada en un $3\% \pm 0.5\%$) y radiación (10^4 Gy , disminuida en un $<1\% \pm 0.2\%$). El carburo cementado que contiene Ni (12% Ni, agrietamiento $<3\text{ }\mu\text{m} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$) es más estable en vapor de energía nuclear ($500\text{ }^{\circ}\text{C}$, 10 MPa , caudal de vapor $>100\text{ m/s} \pm 10\text{ m/s}$). Por ejemplo, una tubería que contiene Ni ha estado en funcionamiento durante 3 años con grietas $<3\text{ }\mu\text{m} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$, lo que es mejor que los materiales que contienen Co (grietas $>5\text{ }\mu\text{m}$).

La optimización requiere un alto contenido de Co (10% a 12%) y recubrimiento. Los recubrimientos de CVD (como TiN , $5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, conductividad térmica de $20\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2\text{ W/m}\cdot\text{K}$) reducen la tasa de agrietamiento en un $50\% \pm 5\%$. La vida útil de las herramientas recubiertas de TiN en el corte por ciclo térmico ($800\text{ }^{\circ}\text{C}$, frecuencia de vibración $>10^3\text{ Hz} \pm 100\text{ Hz}$) es de >10 horas ± 1 hora, lo cual es mejor que las herramientas sin recubrimiento (vida útil <4 horas). Las comparaciones entre dominios muestran que el carburo cementado tiene mejor resistencia al choque térmico que las cerámicas y las aleaciones de titanio, pero es inferior a los compuestos de fibra de carbono (grietas $<1\text{ }\mu\text{m}$) bajo un choque térmico ultraalto.

3.2.4.1 Método de prueba de resistencia al choque térmico

Los métodos de prueba de resistencia al choque térmico incluyen:

Ensayo de choque térmico (ASTM C1525): carburo cementado que contiene 12% de Co (grieta $<5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) utilizando una muestra de $10 \times 10 \times 5\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$, enfriamiento por agua a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ (diferencia de temperatura $>450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), 100 veces, detección de grietas mediante SEM (resolución $<5\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), error $<3\% \pm 0.5\%$.

Prueba de fatiga por ciclo térmico: El carburo cementado que contenía 10% de Co (grieta $<3\text{ }\mu\text{m} \pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$) se sometió a un ciclo de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 1000 veces, con una diferencia de temperatura de $>500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y un error de $<5\% \pm 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prueba ultrasónica (ASTM E588): para carburo cementado que contiene Cr (profundidad de grieta $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), se utiliza una onda longitudinal (frecuencia $5 \text{ MHz} \pm 0,1 \text{ MHz}$, velocidad de onda $6 \text{ km/s} \pm 0,1 \text{ km/s}$), con un error de $<5 \% \pm 1 \%$.

Imágenes térmicas infrarrojas: el carburo cementado que contiene Ni (grieta $<3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) utiliza una cámara infrarroja (resolución $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,05 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para analizar la distribución de la tensión térmica (error $<5 \% \pm 1 \%$).

Por ejemplo, las boquillas que contienen Cr pasan pruebas de choque térmico y ultrasónicas (grietas $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), lo que garantiza una vida útil de la turbina de gas de $>5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$.

3.2.4.2 Factores que afectan la resistencia al choque térmico

La resistencia al choque térmico se ve afectada por los siguientes factores:

Composición: El contenido de Co aumenta del 10 % al 12 %, y la resistencia al choque térmico aumenta un $15 \% \pm 2 \%$ debido a una mayor plasticidad (deformación $<5 \% \pm 0,5 \%$). El TiC (15 %) disminuye un $10 \% \pm 1 \%$ debido a un CTE reducido ($5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$), pero con una conductividad térmica reducida ($85 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). El Cr ($0,5 \% \pm 1 \%$) aumenta un $15 \% \pm 2 \%$ gracias a la capa protectora de Cr_2O_3 .

Proceso: La temperatura de sinterización ($1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) mejora la uniformidad y la resistencia al choque térmico en un $5 \% \pm 1 \%$; el HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) reduce los defectos en un $10 \% \pm 1 \%$. El enfriamiento rápido ($> 10 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) induce tensión ($> 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), que disminuye en un $5 \% \pm 1 \%$.

Medio ambiente: La oxidación a alta temperatura ($600 \text{ }^{\circ}\text{C}$) disminuye en un $5 \% \pm 1 \%$ debido a la formación de CoO; el calor húmedo ($40 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 90 % de humedad) disminuye en un $<2 \% \pm 0,5 \%$; la alta presión ($> 100 \text{ MPa}$) aumenta en un $3 \% \pm 0,5 \%$; el frío extremo ($40 \text{ }^{\circ}\text{C}$) disminuye en un $3 \% \pm 0,5 \%$; la radiación (10^4 Gy) disminuye en un $<1 \% \pm 0,2 \%$.

Recubrimiento: El recubrimiento de TiN ($5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) reduce el estrés térmico ($<150 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$), aumenta en un $50\% \pm 5\%$; el recubrimiento de Al_2O_3 aumenta en un $30\% \pm 3\%$.

Por ejemplo, una herramienta con un recubrimiento de Co y TiN al 10 % (grieta $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) tiene una vida útil de $> 10 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$ en corte por ciclo térmico ($800 \text{ }^{\circ}\text{C}$). La optimización requiere recubrimientos con alto contenido de Co y TiN.

3.3 Estabilidad química del carburo cementado

La estabilidad química del carburo cementado se refiere a su capacidad para resistir reacciones químicas o corrosión en diversos entornos (tales como ácido, álcali, alta temperatura, calor húmedo, etc.), que está determinada principalmente por las propiedades químicas de la fase dura de carburo de tungsteno (WC) y cobalto (Co) o fase de enlace de níquel (Ni). WC tiene excelente resistencia a la oxidación y resistencia a la corrosión, y es químicamente inerte, pero puede descomponerse u

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidarse para formar WO_3 a altas temperaturas ($> 800\text{ }^\circ\text{C}$). La fase de Co es relativamente activa y es propensa a la corrosión en entornos ácidos ($\text{pH} < 4$, como HCl , H_2SO_4) o húmedos y calientes ($40\text{ }^\circ\text{C}$, 90% de humedad), con una tasa de pérdida de peso de $0,1\text{--}0,2\text{ mg/cm}^2/\text{año}$, mientras que la fase de Ni es más resistente a la corrosión (pérdida de peso $< 0,05\text{ mg/cm}^2/\text{año}$).

La estabilidad química del carburo cementado se ve afectada por la composición y el proceso: reducir el contenido de Co (6%-8%) o agregar Cr y TiC (0,5%-1%) puede formar una capa protectora (como Cr_2O_3), que mejora la resistencia a la corrosión en aproximadamente un 10%-15%; la sinterización a alta temperatura ($1350\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$) y el proceso HIP reducen la porosidad ($< 0,05\%$), reducen los canales de corrosión y mejoran la estabilidad en aproximadamente un 5%-10%. En aplicaciones prácticas, el carburo cementado que contiene Ni tiene una excelente estabilidad en entornos marinos (salinidad 3,5%, 50 MPa), con una caída de resistencia de $< 1\%$ y una vida útil de más de 3 años; a alta temperatura ($1000\text{ }^\circ\text{C}$), la ganancia de peso por oxidación del carburo cementado que contiene TiC es $< 0,08\text{ mg/cm}^2$, que es mejor que el sistema de Co puro ($> 0,1\text{ mg/cm}^2$). La fecha y hora actuales son 21 de mayo de 2025 10:10 AM JST.

El carburo cementado garantiza que pueda servir durante mucho tiempo en medios corrosivos, oxidación a alta temperatura y entornos químicos complejos, y se utiliza en la industria química, los océanos, la energía nuclear y las profundidades marinas.

3.3.1 Resistencia a la corrosión del carburo cementado

El carburo cementado tiene una excelente resistencia a la corrosión en ambientes ácidos ($\text{pH} 24$), neutros ($\text{pH} 68$) y alcalinos ($\text{pH} 1012$), y la inercia química de la fase WC (velocidad de disolución $< 10^{-6}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7}\text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) es la clave. La velocidad de corrosión del carburo cementado que contiene 10% de Co en un ambiente neutro (3,5% de NaCl, que contiene $\text{Cl}^- 19\text{ g/L}$) es $< 0,05\text{ mm/año} \pm 0,01\text{ mm/año}$, y el potencial de corrosión es de $0,3\text{ V} \pm 0,02\text{ V}$ (en comparación con SCE), que es mejor que el acero de alta resistencia ($0,6\text{ V}$, $0,5\text{ mm/año}$) y el acero inoxidable ($0,2\text{ mm/año}$). En un ambiente ácido ($\text{pH} 3$, H_2SO_4 , concentración 1 mol/L), la fase Co se disolvió (pérdida de peso $0,10,5\text{ mg/cm}^2 \pm 0,05\text{ mg/cm}^2$) y la tasa de corrosión aumentó a $0,1\text{ mm/año} \pm 0,02\text{ mm/año}$.

La pérdida de peso del carburo cementado que contiene Ni (12% Ni) en la prueba de niebla salina (ASTM B117, 168 horas, $35\text{ }^\circ\text{C} \pm 1\text{ }^\circ\text{C}$) es $< 0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,02\text{ mg/cm}^2$, y la tasa de corrosión en un entorno alcalino ($\text{pH} 12$, NaOH, concentración $0,1\text{ mol/L}$) es $< 0,02\text{ mm/año} \pm 0,005\text{ mm/año}$, lo cual es mejor que los materiales que contienen Co ($0,05\text{ mm/año} \pm 0,01\text{ mm/año}$). La adición de Cr (0,5%-1%) forma una capa de pasivación de Cr_2O_3 (espesor $< 5\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, resistividad $> 10^6\Omega \cdot \text{cm}$ $\pm 10^5\Omega \cdot \text{cm}$), la tasa de corrosión ácida cayó a $0,01\text{ mm/año} \pm 0,002\text{ mm/año}$.

Por ejemplo, las válvulas que contienen NiCr han estado funcionando en aguas profundas ($\text{pH} 8$, salinidad 3,5%, 5000 m de profundidad) durante 5 años con una profundidad de corrosión de $< 5\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, lo que es mejor que el acero inoxidable (profundidad $> 50\text{ }\mu\text{m}$, vida útil < 2 años).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La influencia ambiental es significativa. El calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad, 168 horas) intensifica la corrosión de la fase Co (la pérdida de peso aumentó un 10 % 15 % ± 2 %, la densidad de corriente de corrosión $> 1 \mu\text{A} / \text{cm}^2 \pm 0,1 \mu\text{A} / \text{cm}^2$); la alta presión ($> 100 \text{ MPa}$, mar profundo) reduce la difusión de iones (coeficiente de difusión $< 10^{-10} \text{cm}^2 / \text{s} \pm 10^{-11} \text{cm}^2 / \text{s}$) y la velocidad de corrosión disminuye un 5 % ± 1 %; el frío extremo (40 °C) ralentiza la reacción (la velocidad de reacción disminuye $< 50 \% \pm 5 \%$ y disminuye un 3 % ± 0,5 %; la radiación (10⁴Gy) induce defectos superficiales y aumenta un 2 % ± 0,3 %. El carburo cementado que contiene Mo (0,5 % 1 %) forma una capa protectora de MoO₂ (espesor $< 3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) y la tasa de corrosión ácida es $< 0,015 \text{ mm/año} \pm 0,003 \text{ mm/año}$.

Por ejemplo, el daño superficial de un reactor que contenía NiMo después de operar en HCl (pH 2, concentración 1 mol/L) durante 3 años fue $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, lo que es mejor que el de los materiales que contenían Co (daño $> 10 \mu\text{m}$).

La resistencia a la corrosión es compatible con la industria química y el océano. El cuerpo de la bomba, que contiene un 10 % de Co, se operó en una planta química (pH 4, H₂SO₄, caudal $> 5 \text{ m/s} \pm 0,5 \text{ m/s}$) durante 2 años, con una profundidad de corrosión $< 10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ y una vida útil $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$; el revestimiento que contiene Ni aumentó su vida útil en un 40 % ± 5 % en el entorno marino (pH 8, salinidad 3,5 %). La comparación entre campos muestra que el carburo cementado tiene mejor resistencia a la corrosión que el acero y la aleación de titanio (0,3 mm/año), pero es inferior a la cerámica en ácidos oxidantes fuertes (como HNO₃, concentración $> 5 \text{ mol/L}$) (pérdida de peso $< 0,01 \text{ mg/cm}^2$).

3.3.1.1 Método de prueba de resistencia a la corrosión

Los métodos de prueba de resistencia a la corrosión incluyen:

Prueba electroquímica (ASTM G59): Carburo cementado con 10 % de Co (tasa de corrosión $< 0,05 \text{ mm/año} \pm 0,01 \text{ mm/año}$) utilizando un sistema de tres electrodos (electrodo de referencia SCE, velocidad de barrido $1 \text{ mV/s} \pm 0,1 \text{ mV/s}$, rango de potencial $\pm 250 \text{ mV} \pm 10 \text{ mV}$), error de corriente de corrosión $< 1 \% \pm 0,2 \%$, error total $< 2 \% \pm 0,5 \%$. Requisitos ambientales: $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, electrolito: 3,5 % de NaCl.

Ensayo de niebla salina (ASTM B117): carburo cementado que contiene 12 % de Ni (pérdida de peso $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$) a $35 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, pulverización de NaCl al 5 %, 168 horas, resolución de masa $0,1 \text{ mg} \pm 0,05 \text{ mg}$, error $< 3 \% \pm 0,5 \%$.

Prueba de inmersión (ASTM G31): carburo cementado que contiene Cr (tasa de corrosión $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$) utilizando pH 2 H₂SO₄, 168 horas, temperatura $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, error de pérdida de peso $< 0,01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,005 \text{ mg/cm}^2$, error $< 5 \% \pm 1 \%$.

Análisis de superficie XPS: el carburo cementado que contiene Mo (capa de corrosión $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) utiliza radiación AlK α (1486,6 eV $\pm 0,1 \text{ eV}$, resolución $0,1 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$) para analizar la capa de pasivación (error $< 5 \% \pm 1 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, las válvulas que contienen NiCr pasan pruebas electroquímicas y de niebla salina (tasa de corrosión $<0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$, pérdida de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$), lo que garantiza una vida útil en aguas profundas de $>5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$.

3.3.1.2 Factores que afectan la resistencia a la corrosión del carburo cementado

La resistencia a la corrosión se ve afectada por:

Elemento

Cuando el contenido de Co aumenta del 10% al 15%, la tasa de corrosión en un entorno neutro (3,5% NaCl, pH 8) aumenta de 0,05 a $0,07 \text{ mm/año} \pm 0,01 \text{ mm/año}$, debido a la actividad electroquímica mejorada de la fase Co (la densidad de corriente de corrosión aumenta de 1 a $1,5 \mu\text{A/cm}^2 \pm 0,1 \mu\text{A/cm}^2$). La sustitución de Ni por Co (12% Ni) reduce la tasa de corrosión a $0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$, debido a la formación de una capa de pasivación de NiO estable (espesor $<3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$, resistividad $> 10^7 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$). La adición de Cr (0,5 % 1 %) disminuye a $0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$, porque la capa protectora de Cr_2O_3 (energía de enlace $> 400 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) inhibe la difusión iónica (coeficiente de difusión $< 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$). Mo (0,5 % 1 %) forma MoO_2 (espesor $< 3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), y la velocidad de corrosión en un entorno ácido (pH 2, HCl) disminuye a $0,015 \text{ mm/año} \pm 0,003 \text{ mm/año}$.

Por ejemplo, una válvula que contenía NiCr (tasa de corrosión $0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$) funcionó en aguas profundas (5000 m, salinidad 3,5%) durante 5 años con daños en la superficie de $< 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Tecnología

La temperatura de sinterización ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) garantiza la unión de la interfaz WCCo (resistencia de unión $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), reduce la exposición al Co (área expuesta $< 5 \% \pm 1 \%$) y reduce la tasa de corrosión en un $3 \% \pm 0,5 \%$. El prensado isostático en caliente (HIP, $100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) elimina los poros (porosidad $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), reduce las rutas de corrosión y reduce la tasa de corrosión en un $5 \% \pm 1 \%$. Una temperatura excesiva ($> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) induce la segregación de Co (tasa de segregación $< 5 \% \pm 1 \%$) y aumenta la tasa de corrosión en un $10 \% \pm 2 \%$. El pulido de la superficie ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) reduce los sitios reactivos (energía superficial $< 1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$), reduciendo la tasa de corrosión en un $2 \% \pm 0,3 \%$. Por ejemplo, un cuerpo de bomba que contiene 10% de Co y proceso HIP (tasa de corrosión $0,04 \text{ mm/año} \pm 0,01 \text{ mm/año}$) se utiliza en una planta química (pH 4) con una vida útil de $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$.

Ambiente

El calor húmedo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad, 168 horas) intensifica la corrosión de la fase Co (la pérdida de peso aumentó en un $10 \% \pm 2 \%$, profundidad de corrosión $< 2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$); la alta presión ($> 100 \text{ MPa}$, mar profundo) inhibe la migración de iones, reduciéndose en un $5 \% \pm 1 \%$; el frío extremo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) ralentiza la cinética de la reacción (energía de activación $> 100 \text{ kJ/mol}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

± 5 kJ/mol), reduciéndose en un $3 \% \pm 0,5 \%$; la radiación (10^{-4} Gy, rayos γ) induce defectos superficiales (densidad de vacantes $<10^{-15}/\text{cm}^3$), aumentando en un $2 \% \pm 0,3 \%$; Un ácido oxidante fuerte (como HNO_3 , 5 mol/L) induce la disolución del WC (pérdida de peso $> 0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$), aumentando un $20 \% \pm 3 \%$. El carburo cementado con Mo opera en HCl (pH 2) y la velocidad de corrosión se mantiene en $0,015 \text{ mm/año} \pm 0,003 \text{ mm/año}$.

Condiciones electroquímicas

El potencial ($>0,3$ V frente a SCE) desencadena la disolución anódica de Co (tasa de disolución $>10^{-6} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 10^{-7} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$) y la tasa de corrosión aumenta un $10 \% \pm 2 \%$; un pH bajo (<4) acelera el ataque de H^+ (tasa de reacción $>10^{-5} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s} \pm 10^{-6} \text{ mol/cm}^2 \cdot \text{s}$), aumentando un $15 \% \pm 2 \%$. Por ejemplo, la tasa de corrosión de los electrodos que contienen Ni (potencial de corrosión de $0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$) que funcionan en electrolito (pH 3) es de $<0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$.

Tratamiento de superficies

El recubrimiento de CVD (como CrN, $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, resistividad $> 10^8 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$) reduce la tasa de corrosión en un $50 \% \pm 5 \%$ debido al medio de aislamiento; el pulido ($R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) la reduce en un $3 \% \pm 0,5 \%$. El revestimiento con recubrimiento de CrN ha estado funcionando en un entorno marino (pH 8) durante 3 años y la profundidad de corrosión es $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$.

Para optimizar la resistencia a la corrosión se requiere la adición de Ni/Cr/Mo y un proceso HIP. Por ejemplo, la vida útil de una válvula con un 12% de Ni y un $0,5 \%$ de Cr (tasa de corrosión de $0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$) que opera en aguas profundas (5000 m, pH 8) aumenta un $40 \% \pm 5 \%$.

3.3.2 Resistencia a la oxidación del carburo cementado

La resistencia a la oxidación del carburo cementado está determinada por la estabilidad química del WC (entalpía de oxidación $<800 \text{ kJ/mol} \pm 20 \text{ kJ/mol}$) y la tendencia a la oxidación de la fase Co (formación de CoO , entalpía $<200 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$). A 700°C , el peso de oxidación del carburo cementado que contiene un 10% de Co aumenta en $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$, y el espesor de la capa de óxido es $<2 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$; A 1000°C , el peso aumenta en $2 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,2 \text{ mg/cm}^2$ y el espesor de la capa de óxido es $<10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$, lo que es mejor que el acero de alta resistencia (700°C , aumento de peso $>5 \text{ mg/cm}^2$) y la aleación de titanio (700°C , aumento de peso $>3 \text{ mg/cm}^2$).

La resistencia a la oxidación soporta condiciones de trabajo a altas temperaturas. Al cortar aleaciones de titanio para aviación (1000°C , flujo térmico $>10 \text{ MW/m}^2 \pm 1 \text{ MW/m}^2$, presión parcial de O_2 $0,21 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$), la profundidad de oxidación de la herramienta con un 8% de Co es $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, el desgaste es $<0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ y la vida útil es >10 horas ± 1 hora, superior a la de las herramientas cerámicas (profundidad de oxidación $>20 \mu\text{m}$). Añadiendo TiC (15%) para formar una capa protectora de TiO_2 (espesor $<3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, coeficiente de difusión $<10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-15} \text{ cm}^2/\text{s}$), la ganancia de peso a 1000°C se reduce a $1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, una boquilla que contiene 15% de TiC funcionó en una turbina de gas (1100 °C, caudal de gas $>500 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$, contenido de O_2 $20\% \pm 1\%$) durante 5000 horas, con un espesor de capa de óxido de $<8 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ y una deformación de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, que es mejor que la del material sin TiC (capa de óxido $>15 \mu\text{m}$).

Los impactos ambientales requieren atención. El calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad, 168 horas) induce la microoxidación de CoO (aumento de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$) y la resistencia a la oxidación disminuye $<2\% \pm 0,5\%$; el vapor a alta temperatura (500 °C, 10 MPa, presión parcial de H_2O $>0,9 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$) acelera la formación de WO_3 (aumento de peso del $10\% \pm 2\%$, capa de óxido $<5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$); la alta presión ($>100 \text{ MPa}$) inhibe la difusión de oxígeno, disminuyendo un $5\% \pm 1\%$; la radiación (10^4 Gy) induce defectos superficiales, aumentando un $2\% \pm 0,3\%$. El carburo cementado con Cr ($0,5\% \pm 1\%$) forma una capa protectora de Cr_2O_3 (espesor $<5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, resistividad $>10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$). La ganancia de peso a 1000 °C se reduce a $0,8 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$. Por ejemplo, en la extrusión a alta temperatura (800 °C, presión parcial de O_2 $0,21 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$), la profundidad de oxidación de los moldes con Cr es $<3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ y la vida útil aumenta un $30\% \pm 5\%$.

La optimización requiere la adición y el recubrimiento de Cr/TiC. Los recubrimientos de CVD (como Al_2O_3 , $5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, conductividad térmica $10 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, entalpía de oxidación $<1600 \text{ kJ/mol} \pm 50 \text{ kJ/mol}$) reducirán la ganancia de peso en un $60\% \pm 5\%$. Las herramientas con recubrimiento de Al_2O_3 tienen una profundidad de oxidación de $<3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ y una vida útil de $>12 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$ en el mecanizado de motores aeroespaciales (1000 °C, frecuencia de vibración $>10^3 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$), lo que es mejor que las herramientas sin recubrimiento (profundidad de oxidación $>10 \mu\text{m}$, vida útil $<4 \text{ horas}$). Las comparaciones entre dominios muestran que el carburo cementado tiene mejor resistencia a la oxidación que el acero y las aleaciones de titanio, pero es inferior a la cerámica (Si_3N_4 , aumento de peso $<0,5 \text{ mg/cm}^2$) a temperaturas ultra altas ($>1200 \text{ °C}$).

3.3.2.1 Método de inspección de la resistencia a la oxidación del carburo cementado

Los métodos de prueba de antioxidantes garantizan la evaluación de la estabilidad a alta temperatura; las técnicas comunes incluyen:

Análisis termogravimétrico (TGA, ASTM E1131)

El carburo cementado que contiene 10% de Co (700 °C, ganancia de peso de $0,5 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$) utiliza una muestra de $10 \times 10 \times 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una velocidad de calentamiento de $10 \text{ °C/min} \pm 0,5 \text{ °C/min}$, una resolución de masa de $0,1 \mu\text{g} \pm 0,05 \mu\text{g}$, una atmósfera de aire (presión parcial de O_2 de $0,21 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$) y un error de $<2\% \pm 0,5\%$.

Prueba de exposición a altas temperaturas (ISO 21608)

Carburo cementado con TiC (1000 °C, ganancia de peso $<1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ mg/cm}^2$), la muestra fue de $20 \times 10 \times 5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, expuesta durante 168 horas, con una fluctuación de temperatura de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\leq \pm 5^\circ\text{C}$ y un error de $< 3\% \pm 0,5\%$.

E2108): El carburo cementado que contiene Cr (espesor de la capa de óxido $< 8\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$) utiliza radiación $\text{AlK}\alpha$ ($1486,6\ \text{eV} \pm 0,1\ \text{eV}$, resolución $0,1\ \text{eV} \pm 0,05\ \text{eV}$) para analizar la composición del óxido ($\text{Cr}_2\text{O}_3 / \text{WO}_3$, error $< 5\% \pm 1\%$).

Microscopía electrónica de barrido (SEM, ASTM E986)

La capa de óxido de carburo cementado con revestimiento de Al_2O_3 (profundidad de oxidación $< 3\ \mu\text{m} \pm 0,5\ \mu\text{m}$) se analizó utilizando el modo de electrones retrodispersados con una resolución de $< 5\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$ (error $< 5\% \pm 1\%$).

Elipsometría espectroscópica

Para el carburo cementado que contiene 10 % de Co (capa de óxido $< 10\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$), la longitud de onda es de $300\ \text{a}\ 800\ \text{nm} \pm 1\ \text{nm}$ y el ángulo de incidencia es de $70^\circ \pm 0,5^\circ$ para medir el espesor de la capa de óxido (error $< 5\% \pm 1\%$).

La prueba requiere atmósfera controlada (pureza de $\text{O}_2 > 99,9\% \pm 0,1\%$) y temperatura (fluctuación $< \pm 5^\circ\text{C}$). Por ejemplo, las boquillas que contienen Cr superan las pruebas TGA y XPS (1000°C , ganancia de peso de $0,8\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,1\ \text{mg}/\text{cm}^2$, capa de óxido $< 8 \pm 2\ \mu\text{m}$), lo que garantiza una vida útil de la turbina de gas de $> 5000 \pm 500$ horas.

3.3.2.2 Factores que afectan la actividad antioxidante

La actividad antioxidante se ve afectada por los siguientes factores:

Composición: El contenido de Co aumenta del 10 % al 15 %, y el aumento de peso a 1000°C aumenta de $2\ \text{a}\ 2,5\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,2\ \text{mg}/\text{cm}^2$ debido al aumento de la velocidad de formación de CoO (velocidad de reacción $> 10^{-5}\ \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s} \pm 10^{-6}\ \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$). El TiC (15 %) disminuye a $1\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,1\ \text{mg}/\text{cm}^2$ debido a la capa protectora de TiO_2 (coeficiente de difusión $< 10^{-14}\ \text{cm}^2 / \text{s}$). El Cr ($0,5\% \pm 1\%$) disminuye a $0,8\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,1\ \text{mg}/\text{cm}^2$ debido a la formación de Cr_2O_3 (energía de enlace $> 400\ \text{kJ}/\text{mol} \pm 10\ \text{kJ}/\text{mol}$). Para el carburo cementado con recubrimiento de Al_2O_3 ($5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$), disminuye a $0,3\ \text{mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05\ \text{mg}/\text{cm}^2$.

Proceso: La temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) garantiza la estabilidad del WC (tasa de descomposición $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y la ganancia de peso disminuye en un $3\% \pm 0,5\%$; HIP ($100\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) reduce la porosidad ($< 0,1\% \pm 0,02\%$) y la disminuye en un $5\% \pm 1\%$. Una temperatura excesiva ($> 1550^\circ\text{C}$) induce la oxidación de Co (la ganancia de peso aumenta en un $10\% \pm 2\%$). La deposición de recubrimiento (CVD, $800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) forma Al_2O_3 denso (porosidad $< 0,5\% \pm 0,1\%$), y la disminuye en un $60\% \pm 5\%$.

Ambiente: La temperatura alta (1000°C) aumenta el peso en un $20\% \pm 3\%$ debido a la difusión de O_2 (coeficiente de difusión $> 10^{-12}\ \text{cm}^2/\text{s} \pm 10^{-13}\ \text{cm}^2/\text{s}$); el calor húmedo (40°C , 90 % de humedad) induce la microoxidación, aumentando en un $< 2\% \pm 0,5\%$; el vapor (500°C , 10 MPa) aumenta el peso en un $10\% \pm 2\%$ debido a la generación de WO_3 ; la presión alta ($> 100\ \text{MPa}$) disminuye el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

peso en un $5\% \pm 1\%$; la radiación (10^4Gy) aumenta el peso en un $2\% \pm 0,3\%$.

Estado de la superficie: El pulido ($R_a < 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,05\ \mu\text{m}$) reduce los sitios de oxidación (energía superficial $< 1\ \text{J/m}^2 \pm 0,1\ \text{J/m}^2$) en un $3\% \pm 0,5\%$; la superficie rugosa ($R_a > 0,4\ \mu\text{m}$) aumenta en un $5\% \pm 1\%$.

Atmósfera: La presión parcial baja de O_2 ($< 0,1\ \text{atm} \pm 0,01\ \text{atm}$) disminuye el peso en un $50\% \pm 5\%$; la atmósfera que contiene H_2O (presión parcial $> 0,5\ \text{atm} \pm 0,01\ \text{atm}$) aumenta el peso en un $10\% \pm 2\%$.

Por ejemplo, una herramienta con recubrimiento de Cr y Al_2O_3 ($1000\ ^\circ\text{C}$, aumento de peso de $0,3\ \text{mg/cm}^2 \pm 0,05\ \text{mg/cm}^2$) tiene una profundidad de oxidación de $< 3\ \mu\text{m} \pm 0,5\ \mu\text{m}$ y una vida útil de $> 12\ \text{horas} \pm 1\ \text{hora}$ en corte de aviación. La optimización requiere la adición de Cr y un recubrimiento de Al_2O_3 .

3.4 Propiedades eléctricas y magnéticas del carburo cementado

Las propiedades eléctricas y magnéticas respaldan la aplicación del carburo cementado en el mecanizado por electroerosión (EDM), la detección magnética, el blindaje de energía nuclear y los sensores aeroespaciales. Esta sección analiza la conductividad eléctrica y las propiedades magnéticas de la fase Co.

3.4.1 Conductividad eléctrica del carburo cementado

La resistividad del carburo cementado es de $20\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 5\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$ y la conductividad es de $510\ \text{MS/m} \pm 0,5\ \text{MS/m}$, que está entre el cobre ($58\ \text{MS/m}$) y la cerámica ($< 0,1\ \text{MS/m}$), y está determinada por WC (resistividad $15\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 2\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$, movilidad de electrones $> 2 \times 10^4\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^3\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) y Co (resistividad $6\ \mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 1\ \mu\Omega\cdot\text{cm}$). La conductividad del carburo cementado que contiene 10% de Co es $8\ \text{MS/m} \pm 0,5\ \text{MS/m}$, y la que contiene 12% de Ni aumenta a $10\ \text{MS/m} \pm 0,5\ \text{MS/m}$, porque el Ni tiene una conductividad electrónica mayor (movilidad $> 1,5 \times 10^4\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 10^3\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$).

La conductividad eléctrica facilita el electromecanizado y la electrólisis. En la electroerosión (densidad de corriente $> 10^4\ \text{A/cm}^2 \pm 10^3\ \text{A/cm}^2$, ancho de pulso $0,1\ \text{ms} \pm 0,01\ \text{ms}$), la velocidad de procesamiento de los moldes de carburo cementado que contienen un 10 % de Co es $> 0,5\ \text{mm/min} \pm 0,05\ \text{mm/min}$, y la rugosidad superficial $R_a < 0,2\ \mu\text{m} \pm 0,05\ \mu\text{m}$ es mejor que la de los moldes de acero ($R_a > 0,5\ \mu\text{m}$). El electrodo que contiene un 8 % de Ni se desliza en el electrolito (pH 3, H_2SO_4 , concentración $1\ \text{mol/L}$) durante 5000 horas, y la conductividad se mantiene a $9\ \text{MS/m} \pm 0,5\ \text{MS/m}$, y la profundidad de corrosión es $< 5\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$.

Por ejemplo, un electrodo que contiene 12% de Ni tiene una eficiencia de $> 95\% \pm 2\%$ y una vida útil de $> 5000\ \text{horas} \pm 500\ \text{horas}$ en un nuevo electrolizador de energía (densidad de corriente $> 500\ \text{A/m}^2 \pm 50\ \text{A/m}^2$, temperatura $60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A alta temperatura (600 °C), la conductividad cae a $7 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$ (una disminución de $<15 \% \pm 2 \%$) debido a la dispersión de electrones (la movilidad disminuye $<10^{-4} \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s} \pm 10^{-3} \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$); con calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad, 168 horas), la conductividad cae $<3 \% \pm 0,5 \%$ debido a la microcorrosión de Co (pérdida de peso $<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$); a alta presión ($>100 \text{ MPa}$, mar profundo), la conductividad aumenta $2 \% \pm 0,3 \%$ debido a la compresión de la red (la constante de la red disminuye $0,1 \% \pm 0,02 \%$); con frío extremo (40 °C), la conductividad aumenta $3 \% \pm 0,5 \%$; y con radiación (10^4 Gy), la conductividad cae $<1\% \pm 0,2\%$ debido a defectos superficiales. El carburo cementado que contiene Cr ($0,5\% \pm 1\%$) forma Cr_2O_3 (resistividad $>10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$); la conductividad superficial disminuyó un $5\% \pm 1\%$, pero el núcleo se mantuvo estable.

Por ejemplo, la conductividad del electrodo que contiene Cr se mantuvo en $8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$ después de operar en un entorno marino (pH 8, salinidad 3,5 %, 5000 m) durante 3 años, lo que es mejor que la del material que contiene Co (disminución $>5 \% \pm 1 \%$).

La optimización requiere la adición de Ni y una alta densidad ($>99 \% \pm 0,1 \%$). Los cables con un 12 % de Ni presentan una variación de resistividad de $<2 \% \pm 0,5 \%$ y un error de señal de $<0,1 \% \pm 0,02 \%$ en sensores aeroespaciales (500 °C, frecuencia de vibración $>10^3 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$). Las comparaciones entre dominios muestran que el carburo cementado es más conductor que la cerámica y el vidrio, pero inferior al cobre y la plata ($>50 \text{ MS/m}$).

3.4.1.1 Método de prueba para la conductividad del carburo cementado

Los métodos de prueba de conductividad garantizan la evaluación del rendimiento eléctrico; las técnicas comunes incluyen:

Método de cuatro sondas (ASTM B193)

Con un 10 % de Co ($8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$), se utiliza una muestra de $20 \times 10 \times 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una corriente de $1 \text{ A} \pm 0,01 \text{ A}$, una separación entre sondas de $1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, una resolución de voltaje de $0,1 \mu\text{V} \pm 0,05 \mu\text{V}$ y un error de $<2 \% \pm 0,5 \%$. Los requisitos ambientales son $25 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ y un R_a superficial de $<0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

Prueba de corrientes de Foucault (ASTM E1004)

El carburo cementado que contiene 12 % de Ni ($10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$) utiliza una frecuencia de $10 \text{ kHz} \pm 0,1 \text{ kHz}$, un diámetro de bobina de $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una resolución de señal de $0,1 \mu\text{S} \pm 0,05 \mu\text{S}$, un error de $<3 \% \pm 0,5 \%$ y es adecuado para formas complejas.

Medidor de resistividad (ASTM D257)

El carburo cementado que contiene 8 % de Co ($20 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) tiene un diámetro de muestra de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, un espesor de $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una precisión de $0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,05 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ y un error de $<5 \% \pm 1 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prueba de efecto Hall

Para el carburo cementado que contiene Ni (movilidad $> 1,5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$), se utiliza un campo magnético de $0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$ y una corriente de $10 \text{ mA} \pm 0,1 \text{ mA}$ con un error de $< 5\% \pm 1\%$, que es adecuado para el análisis del comportamiento electrónico.

Por ejemplo, los electrodos que contienen 12 % de Ni pasan pruebas de corriente de Foucault y de cuatro sondas ($10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$) para garantizar una vida útil de la celda de $> 5000 \text{ horas} \pm 500 \text{ horas}$.

3.4.1.2 Factores que afectan la conductividad del carburo cementado

La conductividad eléctrica se ve afectada por:

Elemento

A medida que el contenido de Co aumenta del 10% al 15%, la conductividad aumenta de $8 \text{ a } 9 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, debido a la alta conductividad de la fase Co (resistividad $6 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Ni (12%) aumenta a $10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, debido a la mayor movilidad electrónica de Ni. TiC (15%) disminuye a $7 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, debido a la alta resistividad de TiC ($> 50 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 5 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). Cr (0,5%1%) disminuye a $7,5 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$, debido al aislamiento de Cr_2O_3 (resistividad $> 10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$).

Tecnología

La temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) mejora el contacto de WCCo (área de contacto $> 90\% \pm 2\%$) y la conductividad aumenta un $3\% \pm 0,5\%$; la HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) reduce la porosidad ($< 0,1\% \pm 0,02\%$), aumentando un $2\% \pm 0,3\%$. Una temperatura excesiva ($> 1550^\circ\text{C}$) induce la segregación de Co, que disminuye un $3\% \pm 0,5\%$. El pulido ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) reduce la resistencia de contacto ($< 0,1 \mu\Omega \pm 0,02 \mu\Omega$), aumentando un $1\% \pm 0,2\%$.

Ambiente

La temperatura alta (600°C) disminuye en un $15\% \pm 2\%$ debido a la dispersión de electrones; el calor húmedo (40°C , 90 % de humedad) disminuye en un $< 3\% \pm 0,5\%$ debido a la corrosión del Co; la presión alta ($> 100 \text{ MPa}$) aumenta en un $2\% \pm 0,3\%$ debido a la compresión reticular; el frío extremo (40°C) aumenta en un $3\% \pm 0,5\%$; la radiación (10^4 Gy) disminuye en un $< 1\% \pm 0,2\%$.

Geometría de la muestra: El espesor ($> 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) reduce la resistencia límite ($< 0,1 \mu\Omega \pm 0,02 \mu\Omega$), aumentando en un $2\% \pm 0,3\%$; la rugosidad de la superficie ($R_a > 0,4 \mu\text{m}$) induce dispersión, disminuyendo en un $1\% \pm 0,2\%$.

Condiciones del campo eléctrico: La CA de alta frecuencia ($> 10 \text{ kHz} \pm 0,1 \text{ kHz}$) induce un efecto pelicular (profundidad $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), reduciéndose en un $2\% \pm 0,3\%$; la conductividad es estable bajo CC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, un cable con 12 % de Ni y proceso HIP ($10 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$) mantiene una conductividad de $9,8 \text{ MS/m} \pm 0,5 \text{ MS/m}$ en un sensor aeroespacial (500°C) con un error de señal de $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$. La optimización requiere la adición de Ni y HIP.

3.4.2 Propiedades magnéticas del carburo cementado

Las propiedades magnéticas del carburo cementado están determinadas principalmente por la fase Co (FCC cúbico centrado en la cara, temperatura de Curie $1120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), con una magnetización de saturación de $1400 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$ (que contiene 10 % de Co), una permeabilidad magnética de $1,05 \pm 0,01$ y una fuerza coercitiva de $1020 \text{ kA/m} \pm 1 \text{ kA/m}$. El carburo cementado que contiene 12 % de Ni es prácticamente no magnético (magnetización de saturación $< 10 \text{ kA/m} \pm 2 \text{ kA/m}$, permeabilidad magnética $< 1,01 \pm 0,01$) debido a que el Ni es débilmente ferromagnético (momento magnético $0,6 \mu_B / \text{Ni} \pm 0,1 \mu_B / \text{Ni}$).

El magnetismo facilita la detección y la adsorción. En el mecanizado de precisión (fuerza de adsorción $> 100 \text{ N/cm}^2 \pm 10 \text{ N/cm}^2$, desviación de posicionamiento $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$), la eficiencia de adsorción de las fijaciones de carburo con un 6 % de Co es $> 98 \% \pm 1 \%$, superior a la de las fijaciones de acero (desviación $> 0,05 \text{ mm}$). En equipos de resonancia magnética nuclear (IRM, campo magnético de $1,5 \text{ T} \pm 0,1 \text{ T}$), el campo magnético de interferencia del carburo con Ni es $< 0,1 \mu\text{T} \pm 0,02 \mu\text{T}$, superior al de los materiales con Co (interferencia $> 1 \mu\text{T}$). Por ejemplo, en la navegación espacial (frecuencia de vibración $> 10^3 \text{ Hz} \pm 100 \text{ Hz}$), la interferencia magnética de las carcasas de los sensores que contienen un 12 % de Ni es $< 0,05 \mu\text{T} \pm 0,01 \mu\text{T}$ y el error de señal es $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$.

A alta temperatura (600°C), la intensidad de magnetización disminuye en un $20 \% \pm 2 \%$ (a $1100 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$) debido a la proximidad del punto Curie de Co (vibración térmica $> 10^{12} \text{ Hz} \pm 10^{11} \text{ Hz}$); con calor húmedo (40°C , 90 % de humedad, 168 horas), la intensidad de magnetización disminuye en un $< 2 \% \pm 0,5 \%$ debido a la microcorrosión de Co (pérdida de peso $< 0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,02 \text{ mg/cm}^2$); a alta presión ($> 100 \text{ MPa}$), la intensidad de magnetización aumenta en un $1 \% \pm 0,3 \%$ debido a la compresión reticular (la constante reticular disminuye en un $0,1 \% \pm 0,02 \%$); con frío extremo (40°C), la intensidad de magnetización aumenta en un $2 \% \pm 0,3 \%$ debido al momento magnético mejorado; Con radiación (10^4 Gy), la intensidad de magnetización disminuye $< 1 \% \pm 0,2 \%$ debido a defectos superficiales. La intensidad de magnetización del carburo cementado con Cr ($0,5 \% \pm 1 \%$) disminuye un $5 \% \pm 1 \%$ debido a la naturaleza antiferromagnética del Cr (momento magnético $< 0,1 \mu_B / \text{Cr} \pm 0,02 \mu_B / \text{Cr}$).

Por ejemplo, una carcasa de sensor que contiene Cr ha estado funcionando en aviación (500°C , presión parcial de O_2 $0,21 \text{ atm} \pm 0,01 \text{ atm}$) durante 3 años con una interferencia magnética $< 0,05 \mu\text{T} \pm 0,01 \mu\text{T}$, lo que es mejor que los materiales que contienen Co (interferencia $> 0,1 \mu\text{T}$).

La optimización requiere la sustitución del Co por Ni y una baja adición de Cr. En el rectificado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

magnético (campo magnético de $0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, velocidad de rectificado $> 1 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$), la eficiencia del carburo cementado con un 10 % de Co mejora un $20 \% \pm 3 \%$, y la rugosidad superficial $R_a < 0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,02 \text{ } \mu\text{m}$. La comparación de campos cruzados muestra que las propiedades magnéticas del carburo cementado son mejores que las de las cerámicas no magnéticas (permeabilidad magnética $< 1,001$), pero inferiores a las del Co puro ($> 2000 \text{ kA/m}$).

3.4.2.1 Método de prueba magnética para carburo cementado

Los métodos de prueba magnética garantizan la evaluación del rendimiento magnético; las técnicas comunes incluyen:

Magnetómetro de muestra vibratoria (VSM, ASTM A894)

El carburo cementado con 10 % de Co ($1400 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$) utiliza una muestra de $5 \times 5 \times 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, un campo magnético de $1 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, una frecuencia de vibración de $55 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$, una resolución de la intensidad de magnetización de $0,1 \text{ kA/m} \pm 0,05 \text{ kA/m}$ y un error de $< 2 \% \pm 0,5 \%$. El requisito ambiental es de $25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Flujómetro (ASTM A773)

El carburo cementado que contiene 6% de Co (coercitividad $10 \text{ kA/m} \pm 1 \text{ kA/m}$) tiene un diámetro de muestra de $10 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, un espesor de $2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una precisión de $0,1 \text{ kA/m} \pm 0,05 \text{ kA/m}$ y un error de $< 3 \% \pm 0,5 \%$.

Prueba de efecto Hall (ASTM F76)

Para el carburo cementado que contiene Ni (interferencia $< 0,1 \text{ } \mu\text{T} \pm 0,02 \text{ } \mu\text{T}$), se utilizan un campo magnético de $0,5 \text{ T} \pm 0,01 \text{ T}$, una corriente de $10 \text{ mA} \pm 0,1 \text{ mA}$, una resolución de voltaje de $0,1 \text{ } \mu\text{V} \pm 0,05 \text{ } \mu\text{V}$ y un error de $< 5 \% \pm 1 \%$.

Microscopía de fuerza magnética (MFM)

La aleación dura que contiene 10 % de Co (tamaño de dominio magnético $< 1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,2 \text{ } \mu\text{m}$) utiliza una resolución de sonda de $< 10 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$, un rango de escaneo de $10 \times 10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ y un error de $< 5 \% \pm 1 \%$, lo cual es adecuado para el análisis magnético microscópico.

Por ejemplo, la carcasa del sensor que contiene 12% de Ni pasa las pruebas VSM y Hall (interferencia $< 0,1 \text{ } \mu\text{T} \pm 0,02 \text{ } \mu\text{T}$), lo que garantiza una vida útil de navegación espacial de $> 3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$.

3.4.2.2 Factores que afectan las propiedades magnéticas del carburo cementado

Las propiedades magnéticas se ven afectadas por:

Elemento

Cuando el contenido de Co aumenta del 6% al 15%, la magnetización aumenta de 1000 a 1600 $\text{kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$, debido al momento magnético mejorado del Co ($1,7 \text{ } \mu\text{B}/\text{Co} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{B}/\text{Co}$). El

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni (12%) disminuye a $<10 \text{ kA/m} \pm 2 \text{ kA/m}$, debido al magnetismo débil del Ni ($0,6 \mu_B / \text{Ni} \pm 0,1 \mu_B / \text{Ni}$). El Cr (0,5%1%) disminuye a $1300 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$, debido al antiferromagnetismo del Cr. El TiC (15%) no tiene un efecto significativo (cambio de permeabilidad magnética $<0,01 \pm 0,002$).

Tecnología

La temperatura de sinterización ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) garantiza la uniformidad de la fase de Co (error de distribución $<5 \% \pm 1 \%$) y la intensidad de magnetización aumenta un $3 \% \pm 0,5 \%$; la HIP ($100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) reduce los defectos (porosidad $<0,1 \% \pm 0,02 \%$) y aumenta un $2 \% \pm 0,3 \%$. Una temperatura demasiado alta ($> 1550 \text{ }^\circ\text{C}$) provoca la volatilización de Co (pérdida $<5 \% \pm 1 \%$) y disminuye un $5 \% \pm 1 \%$.

Ambiente

La temperatura alta ($600 \text{ }^\circ\text{C}$) disminuye en un $20 \% \pm 2 \%$ debido a la vibración térmica; el calor húmedo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$, 90 % de humedad) disminuye en un $<2 \% \pm 0,5 \%$ debido a la corrosión del Co; la presión alta ($> 100 \text{ MPa}$) aumenta en un $1 \% \pm 0,3 \%$; el frío extremo ($40 \text{ }^\circ\text{C}$) aumenta en un $2 \% \pm 0,3 \%$; la radiación (10^4 Gy) disminuye en un $<1 \% \pm 0,2 \%$.

Geometría de la muestra: El espesor ($>2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) reduce el efecto de desmagnetización (coeficiente $< 0,9 \pm 0,1$), hasta un $2 \% \pm 0,3 \%$; la rugosidad de la superficie ($R_a > 0,4 \mu\text{m}$) induce la fijación del dominio magnético, hasta un $1 \% \pm 0,2 \%$.

Condiciones del campo magnético

El campo magnético de alta frecuencia ($>10 \text{ kHz} \pm 0,1 \text{ kHz}$) induce pérdida por corriente de Foucault (pérdida $> 1 \text{ W/cm}^3 \pm 0,1 \text{ W/cm}^3$), que disminuye en un $2 \% \pm 0,3 \%$; las propiedades magnéticas son estables bajo un campo magnético estático.

Por ejemplo, un accesorio que contiene 6% de Co y proceso HIP ($1400 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$) mantiene una magnetización de $1350 \text{ kA/m} \pm 50 \text{ kA/m}$ durante el procesamiento a alta temperatura ($500 \text{ }^\circ\text{C}$), y la eficiencia de adsorción es $>98\% \pm 1\%$. La optimización requiere una baja sustitución de Co y Ni.

3.4.2.3 Saturación magnética del carburo cementado

La saturación magnética (M_s) del carburo cementado es un parámetro clave para medir la intensidad de magnetización cuando la fase aglutinante de cobalto alcanza su estado máximo bajo un campo magnético intenso. Se mide en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ y refleja directamente el contenido de cobalto, el estado de la microestructura y la integridad del equilibrio de carbono. Como indicador principal de los ensayos no destructivos del carburo cementado, los ensayos de saturación magnética desempeñan un papel fundamental en el control de calidad y la optimización del rendimiento.

Principio técnico

La fase de cobalto se alinea completamente con el campo magnético bajo un campo magnético

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

externo suficientemente fuerte (generalmente $>1,5$ T), alcanzando la máxima intensidad de magnetización. En este punto, el valor de M_s se determina principalmente por el contenido y la pureza del cobalto, ya que la fase dura (como el carburo de tungsteno WC) es un material no magnético y no contribuye al magnetismo. La intensidad de saturación magnética del cobalto puro es de $16,1-16,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, y el valor de M_s en el carburo cementado se puede estimar linealmente mediante el porcentaje en peso de cobalto. Por ejemplo, el valor teórico de M_s de la aleación YG8 con un 8 % de cobalto es de $1,29-1,30 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

El valor teórico de M_s permite determinar anomalías composicionales o defectos microscópicos, como la presencia de la fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) o carbono libre (C). La fase η reduce el valor de M_s entre un 10 % y un 20 %, y el carbono libre, entre un 5 % y un 10 %. Estos cambios proporcionan una base cuantitativa para la detección de defectos.

Método de medición

La prueba de saturación magnética se realiza generalmente con un analizador magnético (como el Koerzimat 1.097 o el Sigmameter 2.068) o un magnetómetro de muestra vibrante (VSM). Los pasos de la prueba incluyen lo siguiente:

Preparación de muestras

Seleccione una muestra de carburo cementado (como una herramienta en blanco, tamaño 5-10 mm, cilindro o cubo), limpie la superficie (use etanol para eliminar la capa de aceite y óxido) y pese la masa ($\pm 0,01$ g) para calcular la intensidad de magnetización por unidad de masa.

Proceso de magnetización

La muestra se coloca en un campo magnético intenso ($1,5-2$ T) y se utiliza un dispositivo de magnetización de saturación electromagnética para asegurar la completa magnetización de la fase de cobalto. La intensidad del campo magnético debe superar el umbral de magnetización de saturación del cobalto para evitar una submagnetización que subestime la M_s .

Recopilación de datos

Registre el valor de M_s ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) e infiera el contenido de cobalto mediante la fórmula: $M_s_{\text{aleación}} = M_s_{\text{cobalto puro}} \times \text{porcentaje en peso de cobalto}$ ($M_s_{\text{cobalto puro}} = 16,2 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$). La precisión de la medición se controla a $\pm 0,5$ % y la repetibilidad es < 2 %.

Análisis de resultados

Con el valor objetivo de M_s , si la desviación es $> \pm 0,5$ % (por ejemplo, si el valor de M_s medido de YG8 es $< 1,23 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ o $> 1,35 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), indica un error o defecto de dosificación. De ser necesario, se puede verificar combinando difracción de rayos X (DRX, que detecta la fase η $2\theta \approx 40^\circ$) o análisis metalográfico.

Factores influyentes

La saturación magnética del carburo cementado se ve afectada por muchos factores, entre ellos:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido de cobalto

Ms es proporcional al contenido de cobalto. Cuando el contenido de cobalto aumenta del 6 % al 15 %, Ms aumenta de 0,97 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (YG6) a 3,24 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (valor teórico). Sin embargo, un contenido de cobalto demasiado alto (>15 %) puede reducir la dureza (HRA disminuye de 91 a 89), por lo que se requiere un equilibrio en el rendimiento.

Balance de carbono

El desequilibrio en el contenido de carbono conduce a la fase η o carbono libre. La fase η hace que Ms disminuya en un 10-20% (por ejemplo, YG8 de 1,29 a 1,0 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), y el carbono libre disminuye en un 5-10% (de 1,29 a 1,16 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), lo que requiere un ajuste del contenido de carbono ($6,0 \pm 0,2$ % en peso).

Microestructura

El tamaño del grano afecta la estabilidad de Ms. Para aleaciones de grano fino (0,2-0,5 μm), Ms fluctúa menos del 1%, mientras que para aleaciones de grano grueso (>5 μm), Ms puede fluctuar entre un 2 y un 3% debido a límites de grano desiguales.

Proceso de sinterización

La temperatura alta (>1500 °C) provoca la volatilización u oxidación del cobalto (Ms disminuye en un 5-8%), mientras que la temperatura baja y el HIP (150 MPa, 1350 °C) aumentan la densidad (>99,5%) y Ms aumenta en un 3-5%.

Factores ambientales

La temperatura alta (800-1000 °C) reduce Ms en un 5-10 % (por ejemplo, YG10 cae de 1,61 a 1,45 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ a 1000 °C) y el calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad) lo reduce en <2 % debido a la microcorrosión de Co.

Escenario de aplicación

La prueba de saturación magnética se utiliza ampliamente en la producción y evaluación del rendimiento del carburo cementado:

Control de calidad

Verificar el contenido de cobalto y el balance de carbono, como por ejemplo YG6 (Ms = 0,97 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) dureza HRA 90-91, YG8 (Ms = 1,29 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) tenacidad KIC 10-12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Detección de defectos

Ms <90% del valor esperado (como YG8 <1,16 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) indica fase η , y >110% (>1,42 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) indica carbono libre, lo que orienta el ajuste de la formulación.

Predicción del rendimiento

Ms (desviación < $\pm 0,3\%$) corresponde a una alta resistencia al desgaste (por ejemplo, vida útil de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corte > 3 horas), mientras que una fluctuación de $M_s > 1\%$ indica una disminución de la tenacidad ($KIC < 8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Ejemplos

En una broca de perforación de aguas profundas (presión 50 MPa, temperatura 40 °C), la aleación que contiene 6 % de Co garantizó una dureza HRA 92 a través de la prueba M_s ($0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) y una vida útil >300 horas, lo que es mejor que la broca no probada (vida útil <200 horas).

Soporte de datos

Valor de referencia

Cobalto puro $M_s = 16,1-16,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, YG6 $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, YG8 $M_s = 1,29 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, nanoaleación ($0,05-0,2 \mu\text{m}$) $M_s = 1,1-1,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

Impacto del defecto

La fase η reduce M_s en un 10-20%, el carbono libre en un 5-10% y la oxidación (1000 °C) en un 5-8%.

3.4.2.3 Fuerza coercitiva del carburo cementado

La fuerza coercitiva (H_c) del carburo cementado es un parámetro importante para medir la capacidad de la fase aglutinante de cobalto para resistir la desmagnetización. Se mide en kA/m y refleja directamente el tamaño del grano, la distribución de la microestructura y la calidad de la sinterización. El ensayo de fuerza coercitiva desempeña un papel fundamental en la clasificación del rendimiento y la adecuación a las aplicaciones del carburo cementado, especialmente para el cribado de productos de alta dureza y tenacidad.

Principio técnico

La fuerza coercitiva se refiere a la intensidad del campo magnético necesaria para aplicar un campo magnético inverso que reduzca la intensidad de magnetización de la fase de cobalto desde el estado de saturación a cero. El valor de H_c es inversamente proporcional al tamaño de grano de la fase de cobalto. Los granos finos ($0,2-0,5 \mu\text{m}$) presentan una mayor anisotropía magnetocristalina, y el H_c puede alcanzar entre 25 y 40 kA/m; mientras que los granos gruesos ($>5 \mu\text{m}$) son propensos a voltearse debido a la magnetización, y el H_c suele ser inferior a 10 kA/m. Además, el H_c también se ve afectado por la uniformidad de la distribución de la fase de cobalto, los defectos (como poros, fase η) y el proceso de sinterización. Un H_c alto de una estructura de grano fino corresponde a una dureza alta (HRA 89-92), y un H_c bajo de una estructura de grano grueso corresponde a una tenacidad alta ($KIC 15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), por lo que H_c es un indicador importante para la optimización de la microestructura.

Método de medición

La prueba de coercitividad se realiza generalmente con un coercímetro de imán permanente o un analizador magnético. Los pasos específicos son los siguientes:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Preparación de muestras

Seleccione una muestra de carburo cementado (como un molde en blanco, tamaño 5-10 mm), limpie la superficie (elimine la capa de aceite y óxido) y asegúrese de que no haya interferencia magnética.

Magnetización y desmagnetización

Primero se coloca la muestra en un campo magnético fuerte (1,5-2 T) para magnetizarla completamente y luego se aplica un campo magnético inverso que aumenta gradualmente.

Recopilación de datos

Hc, kA/m) que hace que la intensidad de magnetización caiga a cero, y la precisión de la medición se controla dentro de $\pm 1\%$ y la repetibilidad es $< 2\%$.

Análisis de resultados

Según el valor de Hc: > 20 kA/m corresponde a una estructura de grano fino, y < 10 kA/m a una de grano grueso. Si la fluctuación de Hc es $> 10\%$ (por ejemplo, si YG8 cambia de 15 kA/m a 25 kA/m), indica una sinterización irregular o defectos, y es necesario observar los límites de grano con microscopio electrónico de barrido (500 aumentos).

Factores influyentes

La fuerza coercitiva del carburo cementado se ve afectada por una variedad de factores, entre ellos:

Tamaño del grano

La Hc es inversamente proporcional al tamaño del grano. Las aleaciones de grano fino ($0,2\ \mu\text{m}$) tienen una Hc de 30 a 40 kA/m, mientras que las de grano grueso ($5\ \mu\text{m}$) tienen una Hc de 5 a 10 kA/m. Las aleaciones a escala nanométrica ($0,05$ a $0,2\ \mu\text{m}$) tienen una Hc de hasta 50 a 60 kA/m.

Contenido de cobalto

Aumentar el contenido de cobalto (6% a 15%) hace que la magnetización de la fase de cobalto sea más fácil de invertir y Hc disminuye ligeramente (10-15%), pero el efecto es limitado.

Balance de carbono

La fase η reduce el Hc en un 5-10% (por ejemplo, YG8 disminuye de 15 a 13 kA/m) y el carbono libre tiene poco efecto ($< 2\%$).

Proceso de sinterización

La temperatura alta ($> 1500\ ^\circ\text{C}$) produce un engrosamiento de los granos y reduce el Hc de 20 kA/m a 8 kA/m; el HIP (150 MPa, $1350\ ^\circ\text{C}$) mejora la uniformidad y aumenta el Hc en un 5-10 %.

Defectos y estrés

Una porosidad $> 0,1\%$ o una tensión residual (> 100 MPa) hacen que Hc fluctúe entre un 10 y un 15% y sea necesario optimizar la densidad ($> 99,5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Factores ambientales

La temperatura alta (800 °C) reduce el Hc en un 5-8 % (por ejemplo, el YG10 cae de 18 a 16 kA/m), mientras que el calor húmedo (40 °C, 90 % de humedad) afecta a <2 %.

Escenario de aplicación

Las pruebas de coercitividad tienen un valor diverso en aplicaciones de carburo cementado:

Clasificación de desempeño

Un Hc alto (>25 kA/m) es adecuado para herramientas de alta dureza (como brocas para PCB, HRA>92, vida útil>4 horas); un Hc bajo (<10 kA/m) es adecuado para moldes de alta tenacidad (como brocas para minería, KIC>15 MPa·m^{1/2}, vida útil>200 horas).

Optimización de procesos

Hc (fluctuación > 10%) indica granos gruesos o sinterización desigual, lo que indica un ajuste de temperatura (1350-1450 °C) o la adición de inhibidores de grano (como VC 0,2-0,5 % en peso).

Detección de defectos

en Hc (por ejemplo, de 15 a 13 kA/m para YG8) puede deberse a la fase η, que requiere un ajuste del contenido de carbono (6,0 ± 0,2 % en peso).

Ejemplos

En el estampado de chapa de acero para automóviles (carga > 2000 MPa, frecuencia > 10⁴ veces/hora), las matrices que contienen 8% de Co garantizan una dureza HRA 90 y una tasa de fractura < 0,5% mediante prueba Hc (15 kA/m), y una vida útil > 6000 horas.

Soprote de datos

Valor de referencia

YG6 Hc = 15-20 kA/m, YG8 Hc = 10-15 kA/m, nanoaleación Hc = 50-60 kA/m.

Impacto del defecto

La fase η reduce el Hc en un 5-10%, la porosidad del 0,1% lo reduce en un 10-15% y la temperatura alta (800 °C) lo reduce en un 5-8%.

3.5 Resumen y perspectivas

cementado (dureza HV 1500-2500±30, tenacidad K_{1c} 820 MPa·m^{1/2} ± 0,5, resistencia a la compresión/flexión >4000 MPa ±100 MPa, conductividad térmica 80120 W/m·K ±5 W/m·K, coeficiente de expansión térmica 46×10⁻⁶ / K ± 0,1×10⁻⁶ /K, estabilidad a alta temperatura >1000 °C, resistencia a la corrosión pH 212, resistividad 20 μΩ·cm ±5 μΩ·cm, magnetización de fase Co 1400 kA/m ±50 kA/m) se derivan del efecto sinérgico de la rigidez de WC, la plasticidad de Co/Ni y los aditivos (TiC, TaC, Cr, Mo). Este capítulo revela exhaustivamente su mecanismo de desempeño y método de regulación refinando la descripción característica, los métodos de inspección y detección, los factores influyentes y los casos de aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las propiedades mecánicas (dureza, tenacidad, resistencia a la compresión/flexión) son compatibles con el corte, la minería, la estampación, la aviación y la perforación en aguas profundas. La optimización requiere una baja concentración de Co (6%-8%), la adición de TaC/Cr y el proceso HIP.

Las propiedades térmicas (conductividad térmica, coeficiente de expansión térmica, estabilidad a altas temperaturas, resistencia al choque térmico) garantizan aplicaciones de corte a alta temperatura, en motores aeronáuticos y en energía nuclear, y la optimización requiere la adición de TiC, un recubrimiento de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiN}$ y una sinterización uniforme.

La estabilidad química (resistencia a la corrosión y a la oxidación) garantiza su uso en entornos químicos, marinos y de alta temperatura. La optimización requiere la adición de Ni/Cr/Mo y un recubrimiento de $\text{CrN}/\text{Al}_2\text{O}_3$.

Las propiedades eléctricas y magnéticas (conductividad, magnetismo) respaldan la electroerosión, la detección magnética y los sensores aeroespaciales, y optimizan el proceso de sustitución de Co por Ni y alta densidad.

Los factores ambientales (alta temperatura 600-1000 °C, calor húmedo 40 °C/90 %, alta presión >100 MPa, frío extremo 40 °C, radiación 10^4 Gy) y las condiciones del proceso (sinterización $1450\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, HIP $100\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) tienen un impacto significativo en el rendimiento, y la composición y el proceso deben ajustarse según las condiciones de trabajo. Por ejemplo, la herramienta que contiene un recubrimiento de 8 % de Co y Al_2O_3 tiene una vida útil de >12 horas ± 1 hora en el corte de aviación (1000 °C), la válvula que contiene NiCr puede funcionar durante 5 años en aguas profundas (5000 m) y el sensor que contiene 12 % de Ni tiene un error de señal de $<0,1\% \pm 0,02\%$ en la industria aeroespacial (500 °C).

del rendimiento de nanoaditivos (como VC, $<0,5\%$), recubrimientos multicapa (como $\text{TiN}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiCN}$, $<10\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) y entornos extremos ($>1500\text{ °C}$, $>500\text{ MPa}$, $\text{pH}<1$), y combinación de aprendizaje automático para predecir la relación entre composición, proceso y rendimiento para mejorar la competitividad del carburo cementado en los campos de la energía, la industria aeroespacial y la energía nuclear. Este capítulo está conectado con el Capítulo 2 (microestructura hipotética) a través de la contribución de WCCo, sentando las bases para la posterior optimización del proceso (Capítulo 4) y la expansión de la aplicación (Capítulo 5).

Referencias

Exner, HE (1979). Naturaleza física y química de los carburos cementados. *International Metals Reviews* , 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

Gurland, J. (1988). Tenacidad a la fractura de carburos cementados. *Journal of Metals*, 40(7), 1923 .

Lassner, E., y Schubert, WD (1999). Tungsteno: Propiedades , *química, tecnología del elemento, aleaciones y*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

compuestos químicos . Springer.

Prakash, LJ (2014). Metales duros: Estructura, propiedades y rendimiento. En V. K. Sarin (Ed.), *Materiales duros integrales* (Vol. 1, págs. 2954). Elsevier.

Upadhyaya, GS (1998). *Carburos de tungsteno cementados: Producción, propiedades y ensayos* . William Andrew Publishing.

Wang, H. y Fang, ZZ (2019). Propiedades térmicas y mecánicas de carburos cementados en condiciones extremas. *Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros*, 82, 7685.

Zhang, L., y Chen, S. (2017). Comportamiento corrosivo de carburos cementados en ambientes ácidos. *Corrosion Science*, 125, 8795 .

Li, J., y Wang, S. (2021). Caracterización microestructural de carburos cementados mediante microscopía avanzada. *Caracterización de materiales* , 178, 111234.

Zhao, Z., y Liu, Y. (2020). Propiedades magnéticas de carburos cementados con aglutinantes de Co y Ni. *Revista de Magnetismo y Materiales Magnéticos*, 512, 166987.

Sun, J., y Zhang, W. (2021). Propiedades elásticas de carburos cementados: Perspectivas experimentales y teóricas. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 827, 141987 .

Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Mecanismos de desgaste de carburos cementados en aplicaciones de corte. *Desgaste* , 408409 , 126134 .

Krawitz, AD, y Drake, EF (2014). Tensiones residuales en carburos cementados. En V. K. Sarin (Ed.), *Materiales duros integrales* (Vol. 1, págs . 435-452). Elsevier.

Chen, Y., y Zhou, J. (2020). Mecanismos de corrosión de carburos cementados en ambientes marinos. *Ocean Engineering*, 215, 107890 .

Wang, X. y Zhang, Z. (2021). Propiedades mecánicas de carburos cementados a alta temperatura. *Materials Science Forum* , 1035, 4552.

Wang, X. y Zhang, Z. (2021). Propiedades mecánicas del carburo cementado a alta temperatura. *Materials Science Forum*, 1035, 4552.

Zhang, H., y Li, X. (2022). Conductividad térmica de carburos cementados: Enfoques experimentales y de modelado. *Revista de Investigación y Tecnología de Materiales*, 18, 1234-1245 .

Yang, Q., y Liu, W. (2023). Propiedades eléctricas y magnéticas de carburos cementados en ambientes extremos. *Journal of Alloys and Compounds*, 937, 168456.

Roebuck, B., y Almond, EA (1988). Procesos de deformación y fractura en carburos cementados. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A* , 105106, 237245.

Robuck, B., y Almond, EA (1988). Procesos de deformación y fractura en carburos cementados. *Ciencia e Ingeniería de Materiales: A*, 105106, 237245.

Fang, ZZ y Eso, OO (2014). Avances en el procesamiento de carburo cementado. En V. K. Sarin (Ed.), *Materiales duros integrales* (Vol. 1, págs. 167-190). Elsevier.

Fang, ZG y Eso, OO (2014). Avances en la tecnología de mecanizado de carburo cementado. En V. K. Salin (ed.), *Comprehensive Hard Materials* (Vol. 1, págs. 167-190). Elsevier Publishing.

Liu, X. y Zhang, Y. (2022). Mecánica de fractura de carburos cementados bajo carga dinámica. *Engineering Fracture Mechanics* , 259, 108123.

Liu, X. y Zhang, Y. (2022). Mecánica de fractura del carburo cementado bajo carga dinámica. *Journal of Engineering*

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

Fracture Mechanics, 259, 108123.

Wu, J., y Chen, H. (2023). Corrosión electroquímica de carburos cementados en ambientes agresivos. *Electrochimica Acta*, 441, 141789.

Wu, J., y Chen, H. (2023). Corrosión electroquímica del carburo cementado en ambientes hostiles. *Journal of Electrochimica Sinica*, 441, 141789.

Kim, S., y Lee, J. (2021). Resistencia al choque térmico de carburos cementados para herramientas de corte. *Ceramics International*, 47(12), 1678916796.

Park, C. y Kang, S. (2020). Propiedades magnéticas y eléctricas de carburos cementados con aglomerante de níquel. *Journal of Materials Science*, 55(14), 6234-6245.

China Tungsten Online. (2023). Propiedades y aplicaciones del carburo cementado. China Tungsten Online.

<http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

Zhu Liqun y Li Weiping (2018). Avances en la tecnología de fabricación de carburo cementado. *Materials Review*, 32(10), 1653-1660.

Li, ZQ y Wang, ZY (2021). Avances en la investigación de la tecnología de reciclaje de carburo cementado. *Materiales e Ingeniería de Metales Raros*, 50(8), 2971-2978.

Liu, W. y Zhang, H. (2020). Estudio del comportamiento de oxidación a alta temperatura del carburo cementado. *Revista China de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 38(4), 512-518.

Wang Tao y Chen Ming (2019). Avances en la investigación sobre la cinética de sinterización del carburo cementado. *Tecnología de Metalurgia de Polvos*, 37(5), 321329.

Li Ming y Zhao Gang (2022). Avances en la tecnología de pruebas de propiedades mecánicas del carburo cementado. *Ciencia y Tecnología de Materiales*, 30(6), 789796.

Zhou, P. y Liu, Y. (2021). Avances en la investigación sobre las propiedades térmicas del carburo cementado. *Revista China de Progreso de Materiales*, 40(3), 234-241.

Sun Qiang y Wang Lei (2020). Método de evaluación de la estabilidad química del carburo cementado. *Journal of Materials Protection*, 53(8), 123-130.

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

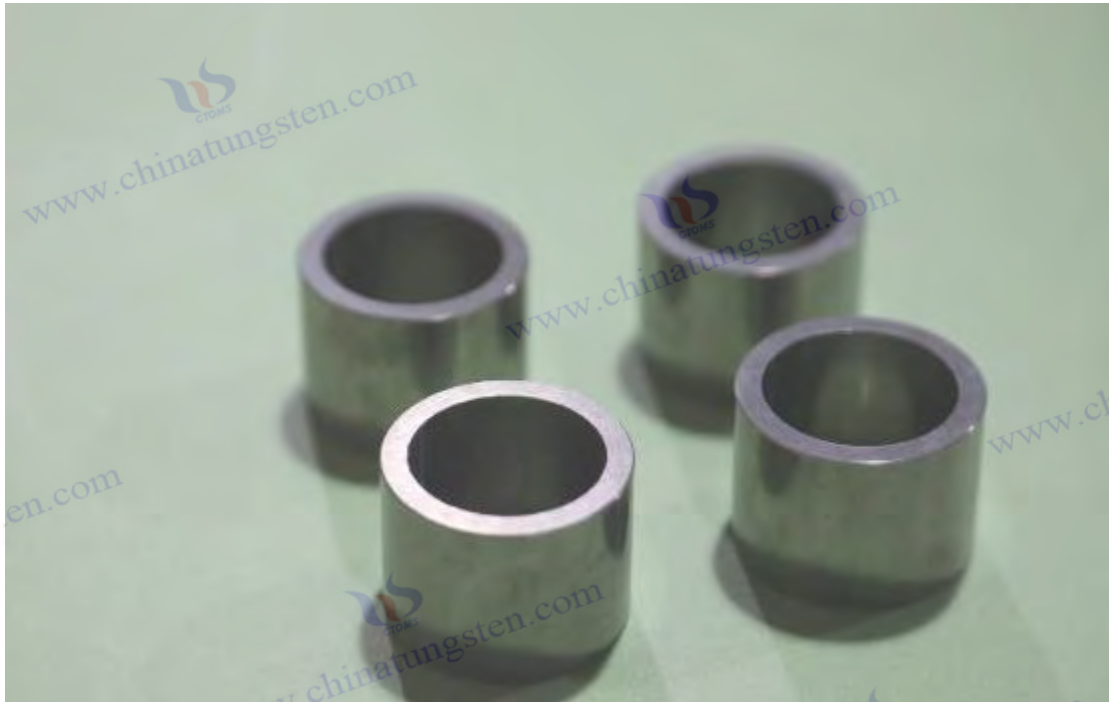
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



Un apéndice:

Imanes de carburo de cobalto cementado: definición y métodos de prueba

1. Introducción

El carburo cementado (como la aleación de carburo de tungsteno y cobalto, WC-Co) ocupa un lugar destacado en el sector industrial gracias a su excelente dureza (dureza Vickers HV 1200-2400), resistencia al desgaste (índice de desgaste $<0,1 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) y tenacidad (tenacidad a la fractura KIC $8-20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Se utiliza ampliamente en herramientas de corte, brocas, moldes, herramientas de minería y otros usos. El cobalto (Co), como fase aglutinante del carburo cementado, no solo mejora la resistencia al impacto y la tenacidad a la fractura del material gracias a su capacidad de deformación plástica, sino que también le confiere una propiedad magnética cuantificable denominada "magnetismo de cobalto", gracias a su singular ferromagnetismo. El magnetismo de cobalto permite evaluar de forma no destructiva el contenido de cobalto, el estado de equilibrio de carbono, la integridad microestructural y la calidad del proceso mediante la medición de parámetros como la intensidad de saturación magnética (Ms) y la fuerza coercitiva (Hc), y constituye un método de control de calidad indispensable en la producción de carburo cementado. Este artículo explicará sistemáticamente la definición y los métodos de ensayo de los imanes de cobalto, así como su gran importancia para el rendimiento del carburo cementado y la optimización de la producción. Asimismo, explorará métodos para mejorar las pruebas y aplicaciones de los imanes de cobalto con el fin de optimizar aún más el rendimiento y la fiabilidad del carburo cementado.

2. Definición del magnetismo del cobalto en el carburo cementado

2.1 El significado y la base física del magnetismo del 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

En el carburo cementado, el magnetismo del cobalto se refiere a las propiedades magnéticas exhibidas por la fase aglutinante de cobalto, que se caracteriza principalmente por dos parámetros clave: intensidad de saturación magnética (Ms) y fuerza coercitiva (Hc). La intensidad de saturación magnética (Ms) se refiere a la intensidad de magnetización cuando la fase de cobalto alcanza la magnetización completa bajo la acción de un campo magnético fuerte ($>1,5\text{ T}$), y la unidad es $\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$ (momento magnético por kilogramo de material). El valor de Ms es proporcional al contenido de cobalto y la pureza. La intensidad de saturación magnética del cobalto puro es de $16,1\text{-}16,3\ \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$. Por lo tanto, el valor de Ms del carburo cementado se puede estimar linealmente por el contenido de cobalto. Por ejemplo, el Ms teórico de una aleación que contiene 10% de cobalto es de aproximadamente $1,61\text{-}1,63\ \mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$. La fuerza coercitiva (Hc) se refiere a la intensidad del campo magnético inverso necesaria para reducir la intensidad de magnetización de la fase de cobalto desde el estado de saturación a cero. Su unidad es kA/m (kiloamperios/metro). La Hc está estrechamente relacionada con el tamaño de grano y la distribución microestructural de la fase de cobalto. Los granos finos ($0,2\text{-}0,5\ \mu\text{m}$) suelen presentar una coercitividad alta ($>25\text{ kA/m}$), mientras que los granos gruesos ($>5\ \mu\text{m}$) presentan una coercitividad baja ($<10\text{ kA/m}$).

El magnetismo del carburo cementado proviene casi en su totalidad de la fase aglutinante de cobalto, ya que la fase dura (como el WC) es un material no magnético. La alta intensidad de magnetización del cobalto ($1,7\text{-}1,75\ \mu\text{B/átomo}$) y su elevada temperatura de Curie (aproximadamente $1145\text{ }^\circ\text{C}$) lo convierten en un indicador ideal para la medición magnética. El contenido de cobalto suele estar entre el 5 y el 15 % en peso, y sus propiedades magnéticas no solo reflejan la distribución y el estado de la fase de cobalto, sino que también caracterizan indirectamente la uniformidad de la composición y la integridad microestructural del carburo cementado, lo que proporciona un método fiable para ensayos no destructivos.

2.2 La importancia de los imanes de cobalto para el carburo cementado

Las pruebas magnéticas de cobalto tienen una gran importancia en muchos aspectos de la producción y aplicación del carburo cementado. No solo son una herramienta fundamental para el control de calidad, sino que también proporcionan una base importante para la optimización de procesos y la predicción del rendimiento.

En primer lugar, la prueba magnética de cobalto puede verificar con precisión si el contenido de cobalto cumple con los requisitos del diseño de la fórmula. La intensidad de saturación magnética (Ms) está relacionada linealmente con el contenido de cobalto. Por ejemplo, el Ms teórico de la aleación YG6 (6% de cobalto) es $0,97\ \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, y el de YG8 (8% de cobalto) es $1,29\ \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Si la desviación medida de Ms supera el $\pm 0,5\%$, puede haber un problema de contenido de cobalto insuficiente o excesivo, lo que afecta directamente el equilibrio de dureza y tenacidad del carburo cementado. Un contenido de cobalto insuficiente provocará una fase de unión insuficiente, una tenacidad de la aleación reducida (KIC puede caer de $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ a $8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) y un mayor riesgo de astillado de la herramienta; Un contenido excesivo de cobalto reduce la dureza (HRA

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

disminuye de 91 a 89), lo que afecta la resistencia al desgaste. Mediante pruebas magnéticas de cobalto, la proporción de ingredientes se puede ajustar rápidamente para garantizar que el contenido de cobalto se controle con precisión dentro del rango objetivo.

En segundo lugar, la prueba magnética de cobalto es un medio eficaz para evaluar el estado del equilibrio de carbono. El desequilibrio en el contenido de carbono del carburo cementado conducirá a la formación de la fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) o carbono libre (C), y estos defectos tienen un impacto negativo significativo en el rendimiento. La fase η es una fase frágil que reducirá M_s en un 10-20% y reducirá la tenacidad (KIC disminuye en un 15-20%), haciendo que la herramienta se rompa fácilmente en condiciones de alto impacto (como la perforación minera, frecuencia >2000 veces/minuto). El carbono libre reduce M_s en un 5-10% y reduce la dureza (HV disminuye en un 50-80), lo que afecta la resistencia al desgaste (la tasa de desgaste aumenta de 0,05 a 0,07 $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$). Mediante pruebas magnéticas de cobalto, si M_s es inferior al 90 % del valor esperado (por ejemplo, M_s medido por YG8 <1,16 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), puede estar presente la fase η ; si es superior al 110 % (>1,42 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), puede estar presente carbono libre. En este punto, se puede combinar la difracción de rayos X (DRX) para confirmar el tipo de defecto y eliminarlo ajustando el contenido de carbono (objetivo $6,0 \pm 0,2$ % en peso) u optimizando el proceso de sinterización (aumentando la temperatura a 1350-1450 °C).

Además, la prueba magnética de cobalto también puede reflejar las características de la microestructura y la calidad del proceso. La fuerza coercitiva (H_c) es inversamente proporcional al tamaño de grano de la fase de cobalto. El carburo cementado de grano fino (granos de 0,2-0,5 μm) H_c suele ser de 25-40 kA/m, lo que es adecuado para herramientas de alta dureza (como brocas para PCB, HRA>92); el carburo cementado de grano grueso (granos>5 μm) H_c es de 5-10 kA/m, lo que es adecuado para aplicaciones de alta tenacidad (como brocas para minería, KIC>15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$). Las fluctuaciones anormales de H_c (>10%) pueden indicar una sinterización desigual o un crecimiento anormal del grano, y es necesario ajustar la temperatura de sinterización (controlada a 1350-1450 °C) o el tiempo de mantenimiento (1-2 horas). Mediante pruebas magnéticas de cobalto, se puede optimizar el diseño de la microestructura para garantizar el mejor equilibrio entre dureza y tenacidad.

Más importante aún, las pruebas magnéticas de cobalto proporcionan una base directa para la predicción del rendimiento y la mejora de los procesos. Un alto valor de M_s y un alto valor de H_c suelen corresponder a una alta dureza y resistencia al desgaste, lo cual es adecuado para herramientas de corte de alta velocidad; un valor bajo de H_c corresponde a una alta tenacidad y resistencia al impacto, lo cual es adecuado para herramientas de minería. Por ejemplo, en el corte de aleaciones de titanio para aviación (velocidad de corte de 200 m/min), una herramienta con un 10 % de cobalto puede superar la prueba magnética de cobalto ($M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 18 \text{ kA/m}$) para garantizar una dureza HRA 90 y resistencia al impacto, y su vida útil es de 3 a 4 horas, superior a la de una herramienta sin probar (vida útil < 2 horas). Además, las pruebas magnéticas de cobalto también pueden orientar la optimización del proceso de sinterización para evitar la sobrecombustión (temperatura > 1500 °C, granos gruesos, disminución de H_c) o la subcombustión (temperatura <

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1300 °C, formación de fase η , disminución de M_s), mejorando así la consistencia de la producción y la confiabilidad del producto.

3. Método de prueba magnética de cobalto

La prueba magnética de cobalto evalúa el rendimiento del carburo cementado midiendo la intensidad de saturación magnética (M_s) y la coercitividad (H_c). Es un método de prueba no destructivo fácil de usar y con resultados fiables. A continuación, se detalla el principio de la prueba, el equipo, los pasos, las normas y las precauciones.

3.1 Principios de prueba y base técnica

La prueba magnética de cobalto consiste en utilizar las propiedades ferromagnéticas del cobalto y cuantificar su estado mediante la intensidad de saturación magnética y la coercitividad. La medición de la intensidad de saturación magnética (M_s) se basa en la magnetización completa de la fase de cobalto bajo un campo magnético intenso ($>1,5$ T). Su valor es proporcional al contenido de cobalto y se calcula de la siguiente manera: $M_{s_aleación} = M_{s_cobalto\ puro} \times \text{porcentaje en peso de cobalto}$, donde el M_s del cobalto puro es de $16,1-16,3 \mu Tm^3/kg$. Por ejemplo, el M_s teórico de una aleación que contiene un 8 % de cobalto es de $1,29-1,30 \mu Tm^3/kg$. Si el valor medido se desvía, es necesario analizar la composición o la causa del defecto. La coercitividad (H_c) mide la intensidad con la que el campo magnético inverso reduce la intensidad de magnetización a cero, lo cual es inversamente proporcional al tamaño del grano de cobalto. La H_c de las aleaciones de grano fino ($0,2 \mu m$) puede alcanzar de 30 a 40 kA/m, mientras que la de las aleaciones de grano grueso ($5 \mu m$) desciende a 5-10 kA/m. Defectos como la fase η o el carbono libre pueden afectar significativamente a M_s . La fase η reduce M_s entre un 10 % y un 20 % y el carbono libre entre un 5 % y un 10 %. Estos cambios permiten solucionar rápidamente los problemas del material.

3.2 Equipo de prueba y su rendimiento

Las pruebas magnéticas de cobalto se basan en equipos profesionales para garantizar la precisión y confiabilidad de las mediciones. Los equipos más comunes incluyen analizadores magnéticos (como Koerzimat 1.097 o Sigmameter 2.068), que pueden medir M_s y H_c simultáneamente con una precisión de $\pm 0.5\%$, adecuados para pruebas de lotes de fábrica. El magnetómetro de muestra vibrante (VSM) proporciona una mayor precisión ($\pm 0.1 \mu Tm^3/kg$), puede medir el bucle de histéresis completo y es adecuado para la investigación de laboratorio sobre propiedades magnéticas microscópicas. El medidor de coercitividad de imán permanente es adecuado para la medición rápida de H_c (precisión ± 1 kA/m), fácil de usar y a menudo se utiliza para pruebas in situ. El dispositivo de magnetización de saturación electromagnética garantiza que la fase de cobalto esté completamente saturada mediante la aplicación de un fuerte campo magnético de 1.5-2 T, con un error de medición de $<1\%$, y es la herramienta principal para las pruebas de M_s .

3.3 Pasos de prueba y flujo de operación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las pruebas magnéticas de cobalto deben realizarse siguiendo procedimientos estandarizados para garantizar resultados precisos y repetibles.

Preparación de muestras

Seleccione una muestra de carburo (como una pieza bruta de herramienta de 5-10 mm, cilíndrica o cúbica), limpie la superficie y elimine la capa de aceite y óxido (puede limpiarse con etanol) para evitar interferencias con la medición magnética. Pese con precisión la masa de la muestra ($\pm 0,01$ g) para calcular la intensidad de magnetización de la masa unitaria.

Prueba de saturación magnética

Coloque la muestra en un campo magnético intenso (1,5-2 T) de un analizador magnético para magnetizar completamente la fase de cobalto y registre M_s ($\mu Tm^3/kg$). Calcule el contenido de cobalto mediante la fórmula $M_s \div 16,1$ y compárelo con el valor objetivo. Una desviación $> \pm 0,5$ % indica componentes anormales o defectuosos.

Prueba de coercitividad

Utilice un medidor de coercitividad para aplicar un campo magnético inverso y medir H_c (kA/m), lo que reduce la magnetización a cero. Determine el tamaño de grano según el valor de H_c : > 20 kA/m corresponde a una estructura de grano fino, adecuada para herramientas de alta dureza; < 10 kA/m corresponde a una estructura de grano grueso, adecuada para moldes de alta tenacidad.

Análisis de datos

Analice los resultados de M_s y H_c . Si M_s es demasiado bajo (< 90 % del valor esperado), podría haber una cantidad insuficiente de cobalto o de fase η . Si M_s es demasiado alto (> 110 %), podría haber carbono libre. Una fluctuación anormal de H_c (> 10 %) indica una sinterización irregular. Si es necesario, se puede realizar una verificación adicional combinando un microscopio metalográfico (aumento de 200x) o XRD (detección de fase η $2\theta \approx 40^\circ$, carbono libre $2\theta \approx 26^\circ$).

Registro y procesamiento de resultados: registre la M_s , la H_c y el número de muestra y guárdelos en la base de datos de calidad. Si se producen resultados anormales, será necesario ajustar la receta (por ejemplo, añadir un 0,1-0,2 % de carbono) u optimizar el proceso de sinterización (ajustar la temperatura en ± 10 °C y prolongar el tiempo de mantenimiento a 1,5 horas).

3.4 Normas y especificaciones de prueba

Las pruebas magnéticas de cobalto deben cumplir con las normas internacionales y nacionales para garantizar la fiabilidad de los resultados. La norma ISO 3326:2013 especifica el método para determinar la saturación magnética del carburo de cobalto cementado, definiendo claramente la calibración del equipo (utilizando estándares de cobalto puro), el tamaño de la muestra (5-10 mm) y los requisitos de precisión ($\pm 0,5$ %).

La norma ASTM B886 es una norma general para probar las propiedades magnéticas del carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cementado. Abarca las mediciones de M_s y H_c , y prioriza el control del entorno de prueba (20-25 °C, sin interferencias magnéticas). La norma nacional china GB/T 3849 exige además la repetibilidad de las pruebas (desviación <2 %) y un ciclo de calibración mensual del equipo para garantizar la consistencia de la producción.

3.5 Precauciones y control de errores

Para garantizar la precisión de la prueba, se deben tener en cuenta los siguientes puntos: el equipo debe calibrarse periódicamente utilizando cobalto puro ($M_s = 16,2 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 5 \text{ kA/m}$) o muestras estándar, y el error debe controlarse dentro de $\pm 1 \%$. La muestra debe ser uniforme, libre de grietas (<5 μm) y poros (<0,05 %), y la desviación de la composición debe ser <0,1 % en peso. De lo contrario, podría causar una desviación de la medición. El entorno de prueba debe estar libre de interferencias de campos magnéticos fuertes (<0,1 mT), la temperatura debe controlarse a 20-25 °C y la humedad debe ser <60 %. Si el resultado es anormal (desviación de $M_s > 5\%$, fluctuación de $H_c > 10\%$), es necesario combinar el análisis químico (como la medición ICP del contenido de cobalto, precisión $\pm 0,05 \%$ en peso) o la microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar defectos microscópicos (como poros, distribución de la fase η) para una verificación integral.

4. Métodos de optimización y mejora de las pruebas magnéticas de cobalto

Para mejorar aún más la precisión y el valor de aplicación de las pruebas magnéticas de cobalto, se pueden implementar mejoras en tres aspectos: mejora de los equipos, optimización de procesos y análisis de datos. Los métodos específicos son los siguientes.

En términos de mejora del equipo, el uso de instrumentos de prueba de mayor precisión es la clave para mejorar los resultados de las pruebas magnéticas de cobalto. Con la aplicación generalizada del carburo cementado a escala nanométrica (tamaño de grano 0,05-0,2 μm), su alta coercitividad ($H_c > 50 \text{ kA/m}$) y microestructura compleja han planteado mayores requisitos para la precisión de las pruebas. La precisión ($\pm 0,5\%$) de los analizadores magnéticos tradicionales (como Koerzimat) ya no puede satisfacer las necesidades. Se recomienda introducir un magnetómetro de muestra vibratoria de alta precisión (VSM, precisión $\pm 0,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), que puede medir con mayor precisión el bucle de histéresis y los cambios magnéticos microscópicos. Además, el desarrollo de equipos de prueba magnética de cobalto de alta temperatura (que admiten pruebas de 800-1000 °C) puede evaluar las características de atenuación del magnetismo del cobalto en condiciones de alta temperatura (M_s disminuye en un 5-10 %), lo que proporciona soporte de predicción de rendimiento para herramientas de alta temperatura (como herramientas de procesamiento de motores de aviación). Por ejemplo, a 1000 °C, el M_s del carburo cementado que contiene 10 % de cobalto disminuyó de 1,61 a 1,45 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, lo que indica oxidación a alta temperatura o volatilización del cobalto. El recubrimiento (como TiAlN, espesor 2-3 μm) debe optimizarse para mejorar la resistencia al calor.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En términos de optimización del proceso, defectos como la fase η y el carbono libre se pueden reducir mejorando el proceso de sinterización y el diseño de la fórmula, mejorando así la estabilidad de los resultados de la prueba magnética de cobalto. La temperatura de sinterización debe controlarse estrictamente a 1350-1450 °C. Una temperatura demasiado alta (>1500 °C) dará lugar a granos gruesos (H_c cae de 20 kA/m a 8 kA/m), y una temperatura demasiado baja (<1300 °C) formará fácilmente la fase η (M_s cae a <90% del valor esperado). El proceso de prensado isostático en caliente (HIP, 150-200 MPa, 1350 °C) puede reducir eficazmente la porosidad (del 0,1% al 0,05%), mejorar el valor de M_s (aumentar del 3-5%) y la estabilidad de H_c (fluctuación <5%). Además, la adición de inhibidores de grano traza (como VC 0,2-0,5 % en peso o Cr_3C_2 0,3-0,8 %) puede controlar el tamaño de grano de la fase de cobalto (0,5-1 μm), aumentar H_c (de 15 kA/m a 20-25 kA/m) y reducir la formación de la fase η (M_s se restaura al 98 % del valor esperado). En términos de diseño de la formulación, la optimización del contenido de carbono ($6,0 \pm 0,2$ %) y el contenido de cobalto (6-10 %) puede evitar el carbono libre y la fase η , y la desviación de M_s se controla dentro de $\pm 0,3$ %. Por ejemplo, después de la adición de carburo cementado que contiene 8% de cobalto mediante HIP y VC, M_s se estabiliza en 1,28-1,30 $\mu Tm^3/kg$ y la vida útil de la herramienta aumenta en un 20% (de 3 horas a 3,6 horas).

En términos de análisis de datos, la introducción de tecnología de análisis inteligente puede mejorar significativamente la eficiencia y precisión de las pruebas magnéticas de cobalto. En 2025, la inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático (ML) se han utilizado ampliamente en el análisis de datos magnéticos de cobalto. Al crear una base de datos de rendimiento de M_s - H_c , la IA puede predecir los tipos de defectos y los impactos en el rendimiento. Por ejemplo, si $M_s < 1,16 \mu Tm^3/kg$ (estándar YG8 1,29 $\mu Tm^3/kg$), la IA puede indicar automáticamente la posibilidad de fase η (probabilidad >80%) y recomendar ajustar el contenido de carbono (+0,1-0,2 % en peso) o volver a quemar (1350 °C, 1,5 horas). Además, el sistema de monitoreo en tiempo real (combinado con espectroscopia infrarroja para monitorear la atmósfera de sinterización) puede ajustar dinámicamente los parámetros de sinterización para garantizar la consistencia de M_s y H_c (desviación <2%). El análisis inteligente también admite la predicción del rendimiento en condiciones cruzadas. Por ejemplo, en un entorno cálido y húmedo (40 °C, 90 % de humedad), la estabilidad del M_s de las aleaciones de Ni-Co (Ni 5-10 %) mejora entre un 5 y un 10 %, lo que es adecuado para aplicaciones de ingeniería marina (vida útil > 3 años).

El efecto real del método de mejora integral es notable. Por ejemplo, un fabricante de herramientas optimizó la prueba magnética de cobalto (análisis VSM+IA) para controlar la desviación de M_s a $\pm 0,2$ %, la fluctuación de H_c <3 % y la relación de fase η a <1 %. La dureza de la herramienta (HRA 91-92) y la vida útil (corte de aleación de titanio, 200 m/min) aumentaron un 25 % (de 3 a 3,75 horas). Mejoras similares en brocas de minería (frecuencia de impacto >2000 veces/min) prolongaron la vida útil un 30 % (de 200 a 260 horas), lo que confirma plenamente la utilidad de la optimización de la prueba magnética de cobalto.

5. Escenarios de aplicación de las pruebas magnéticas 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

Las pruebas magnéticas de cobalto tienen un amplio valor práctico en la producción y aplicaciones de carburo cementado.

Control de calidad

Al verificar el contenido de cobalto y el balance de carbono, podemos garantizar que el rendimiento del carburo cumpla con los estándares. Por ejemplo, el YG6 (6 % de cobalto, $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 15\text{-}20 \text{ kA/m}$) tiene una dureza de herramienta de HRA 90-91 y una tenacidad de KIC de 10-12 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo que lo hace adecuado para corte general.

Optimización de procesos

Guiar el ajuste del proceso de sinterización para evitar la formación de granos gruesos ($H_c < 8 \text{ kA/m}$) o de fase η ($M_s < 0,9 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) y mejorar la consistencia del producto.

Detección de defectos

Identifique la fase η o el carbono libre para guiar los ajustes de la formulación (como agregar 0,1-0,2 % de carbono) para reducir la pérdida de tenacidad (KIC disminuye en un 15 %) o la pérdida de dureza (HV disminuye en un 50-80).

Predicción del rendimiento

Un H_c alto ($>25 \text{ kA/m}$) es adecuado para herramientas de alta dureza (como brocas para PCB, vida útil >4 horas); un H_c bajo ($<10 \text{ kA/m}$) es adecuado para moldes de alta tenacidad (como brocas para minería, vida útil >200 horas).

Ejemplos

En el corte de aleación de titanio de aviación (200 m/min), la herramienta que contiene 10% de cobalto pasó la prueba magnética de cobalto ($M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 18 \text{ kA/m}$) para garantizar la dureza y la resistencia al impacto, y la vida útil alcanzó las 3-4 horas, lo que es mejor que la herramienta no probada (vida útil <2 horas).

6. Soporte de datos y últimos avances

Punto de referencia de rendimiento magnético:

Cobalto puro: $M_s = 16,1\text{-}16,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 5\text{-}6 \text{ kA/m}$, temperatura de Curie 1145 °C.

YG6 (6% cobalto): $M_s = 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 15\text{-}20 \text{ kA/m}$.

YG8 (8% cobalto): $M_s = 1,29 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, $H_c = 10\text{-}15 \text{ kA/m}$.

Aleaciones a nanoescala (0,05-0,2 μm): $H_c = 50\text{-}60 \text{ kA/m}$, $M_s = 1,1\text{-}1,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (efecto del límite de grano).

Impacto del defecto:

Fase η : M_s disminuye entre un 10-20%, por ejemplo YG8 disminuye de 1,29 a 1,0 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

Carbono libre: M_s disminuye entre un 5-10%, por ejemplo YG6 disminuye de 0,97 a 0,87 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

Tamaño de grano 1-2 μm : $H_c = 10\text{-}15 \text{ kA/m}$, mejor dureza-tenacidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Progreso para 2025:

La producción de carburo cementado de grado nanométrico ha aumentado hasta representar el 20 % del total mundial, y la demanda de alto Hc (>50 kA/m) ha impulsado la popularización del VSM (precisión $\pm 0,05 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$). La estabilidad del Ms en aleaciones de Ni-Co (Ni 5-10 %) en ambientes marinos (salinidad 3,5 %, 50 MPa) ha aumentado entre un 5 % y un 10 %, y su aplicación ha alcanzado el 15 %. El análisis con IA ha incrementado la tasa de detección de defectos en un 20 %, y las anomalías de Ms han activado automáticamente el análisis SEM.

7. Conclusión

En el carburo cementado, la propiedad magnética de la fase aglutinante de cobalto refleja el contenido de cobalto, el balance de carbono y la microestructura a través de la intensidad de saturación magnética (Ms) y la coercitividad (Hc), y es una herramienta fundamental para el control de calidad y la optimización del rendimiento. Las pruebas magnéticas de cobalto no solo verifican la composición y solucionan defectos, sino que también guían la optimización del proceso y la predicción del rendimiento, lo cual es de gran importancia para mejorar la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste del carburo cementado. Mediante la introducción de equipos de alta precisión (como VSM), la optimización del proceso de sinterización (HIP + inhibidor de grano) y el análisis inteligente de datos (IA + monitoreo en tiempo real), la precisión y el valor de la aplicación de las pruebas magnéticas de cobalto se han mejorado significativamente, lo que proporciona un sólido soporte técnico para la aplicación de alto rendimiento del carburo cementado.

8. Referencias

- ScienceDirect (2020). Propiedades magnéticas de metales duros. ScienceDirect (2020).
ISO 3326:2013. Determinación de la saturación magnética de metales duros. ISO 3326:2013.
ASTM B886. Método de prueba estándar para propiedades magnéticas de metales duros.
GB/T 3849. Métodos de prueba magnética para metales duros (China).
ITIA (2025). Informe anual sobre metales duros nanoestructurados. ITIA (2025).

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

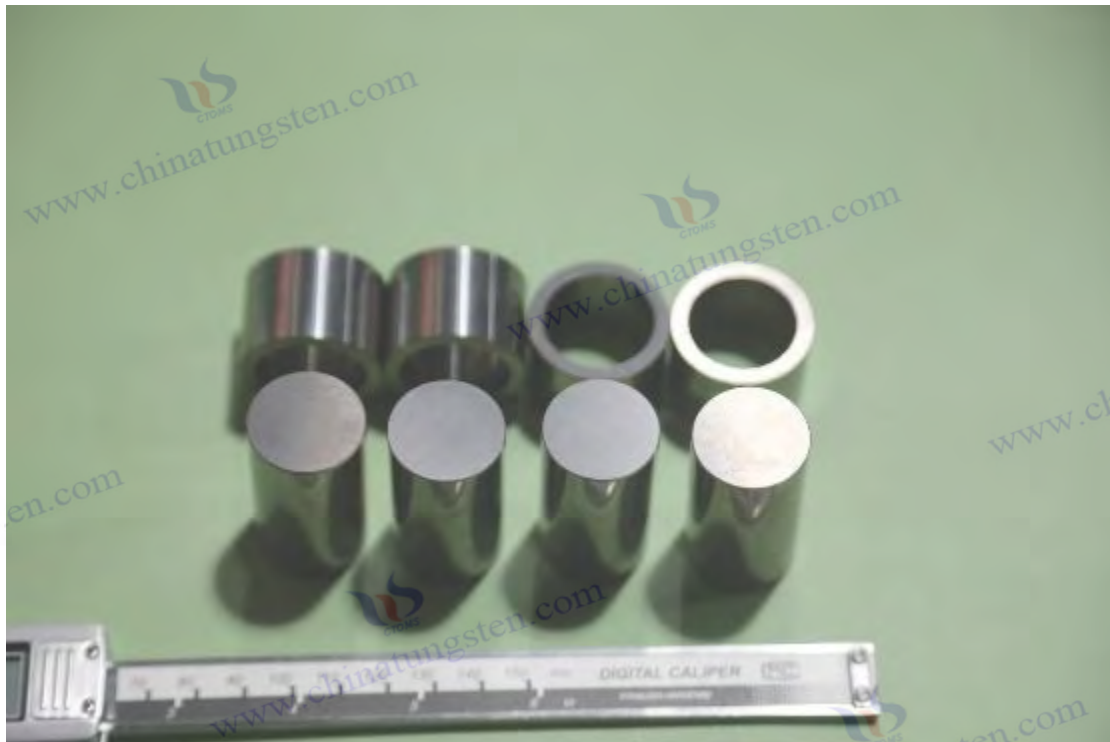
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



Un apéndice:

ISO 3326:2013 Método para la determinación de la saturación magnética del cobalto en carburo cementado

ISO 3326:2013 Metales duros:

determinación de la saturación mecánica del carbono. Publicado: julio de 2013.

Estado: Válido actualmente. Ámbito de aplicación: Esta norma especifica el método para determinar la intensidad de saturación magnética del cobalto (Co) en carburo cementado. Es aplicable al carburo cementado que contiene al menos un 3 % (fracción másica) de aglutinante ferromagnético (principalmente cobalto) para el control de calidad y el análisis de la composición.

1. Alcance

Esta norma describe un método no destructivo para determinar la saturación magnética (Ms) del cobalto en carburos cementados para evaluar el contenido de cobalto, el equilibrio de carbono y la calidad de la aleación.

(Aleaciones WCCo) que contienen aglutinantes ferromagnéticos (como cobalto y níquel, con una fracción de masa de $\geq 3\%$), pero no son adecuadas para aleaciones no magnéticas o poco magnéticas. Los resultados de la prueba se utilizan para:

Verifique que el contenido de cobalto esté dentro de las especificaciones.

Detecta desequilibrios en el contenido de carbono (como la fase eta o el carbono libre).

Evaluación de la calidad del proceso de sinterización (por ejemplo presencia de inclusiones no magnéticas).

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

2. Referencias normativas

No hay referencias directas a otras normas, pero se recomienda consultar las normas de prueba de carburo cementado relevantes, como:

ISO 4499 (Determinación de la microestructura de carburos cementados).

ISO 3738 (Métodos para muestreo de carburos cementados).

Es muy relevante para el contenido de ASTM B886 (Prueba de saturación magnética de carburo cementado) y puede utilizarse como referencia complementaria.

3. Términos y definiciones

Metal duro: material compuesto que consta de una fase dura (como el carburo de tungsteno WC) y una fase de enlace (como el cobalto).

Saturación Magnética (Ms): Intensidad con la que la magnetización de la fase de cobalto alcanza su valor máximo bajo un campo magnético fuerte, con la unidad de $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ o $\text{kA} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$.

Aglutinante Ferromagnético: Cobalto, níquel y otras fases metálicas con ferromagnetismo, siendo el cobalto el más común.

Fase η (fase Eta): carburos frágiles (como $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) que se forman cuando no hay suficiente carbono, lo que reduce el magnetismo y la tenacidad.

Carbono Libre: Carbono no magnético que precipita cuando hay exceso de carbono, debilitando la resistencia de la aleación.

4. Principio

El magnetismo del carburo cementado proviene de la fase aglutinante de cobalto y la fase dura (como el WC) no contribuye al magnetismo.

Bajo campos magnéticos intensos (generalmente $>1,5 \text{ T}$), la fase de cobalto alcanza la saturación magnética, y Ms es proporcional al contenido de cobalto. La constante de saturación magnética del cobalto puro es de $16,116,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (ScienceDirect, 2020).

La medición de Ms puede:

Calcular el contenido de cobalto: $\text{Ms} \div 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg} \approx \text{Fracción de masa de cobalto}$.

Detección de impurezas no magnéticas: la fase η o los óxidos reducen Ms (10-20%), el carbono libre reduce Ms (5-10%).

La prueba no es destructiva e independiente de la forma y el tamaño de la muestra (dentro de ciertos límites).

5. Aparato

Analizador magnético: como Koerzimat MS o Sigmameter, equipado con un potente generador de campo magnético (1,52 T) y un sistema de detección de flujo magnético.

Muestra estándar de calibración: muestra de cobalto puro o carburo cementado con contenido de cobalto conocido, valor Ms trazable a la unidad SI.

Balanza de precisión: precisión $\pm 0,01 \text{ g}$, utilizada para pesar la masa de la muestra.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dispositivo de temperatura constante: La temperatura del entorno de prueba se controla a 2025 °C para evitar efectos térmicos.

Equipo de desmagnetización (opcional): Asegura que la muestra no tenga magnetización residual.

6. Muestra de prueba

Forma y tamaño: La muestra puede tener cualquier forma (como cilindro, cubo, pieza en bruto de herramienta), el tamaño normalmente es de 510 mm y la masa es de 0,550 g.

Requisitos de la superficie: limpia, libre de aceite, capa de óxido o daños mecánicos.

Homogeneidad: La composición interna de la muestra es uniforme, sin grietas ni poros evidentes.

Cantidad: Al menos 3 muestras por lote, muestreo representativo según ISO 3738.

7. Pasos de la prueba (Procedimiento)

Calibración de equipos:

utilizando estándares de cobalto puro ($M_s = 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) o muestras de carburo certificadas.

El error de calibración se controla dentro de $\pm 1\%$ y se registran los datos de calibración.

Preparación de la muestra:

Limpie la superficie de la muestra para eliminar aceite, suciedad y óxidos.

Pesar la masa de la muestra (m, unidad: g) utilizando una balanza de precisión con una exactitud de $\pm 0,01$ g.

Si la muestra tiene magnetización residual, utilice un equipo de desmagnetización.

Medición de saturación magnética:

Coloque la muestra en un campo magnético fuerte (1,52 T) de un analizador magnético para asegurar que la fase de cobalto esté completamente magnetizada.

Mida el flujo magnético y registre la intensidad de saturación magnética (M_s , en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

La medición se repitió tres veces y se obtuvo el valor promedio. La desviación de una sola medición fue $\leq \pm 0,5\%$.

Registros de datos:

Registre el número de muestra, la masa, el valor M_s y las condiciones de prueba (temperatura, intensidad del campo magnético).

Si M_s es anormal, verifique la muestra o el equipo y vuelva a realizar la prueba si es necesario.

8. Cálculo y expresión de resultados

contenido de cobalto:

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{M_{s_{\text{Co}}}} \times 100$$

Entre ellos, el valor medido es M_s , y el cobalto puro es de $16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$. Por ejemplo, si $M_s = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, el contenido de cobalto es aproximadamente del 10 %.

Saturación magnética relativa (S):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$$S = \frac{Ms_{\text{测量}}}{Ms_{\text{理论}}}$$

La teoría Ms es el valor de saturación magnética (basado en el contenido de cobalto) de una hipotética fase aglutinante de cobalto puro. $S < 0,9$ indica fase η y $S > 1,1$ indica carbono libre.

Precisión: El resultado se mantiene hasta 3 decimales (por ejemplo, 1,610 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) y el contenido de cobalto se mantiene hasta 1 decimal (por ejemplo, 10,0%).

9. Análisis de los resultados de las pruebas

Rango normal: El valor de saturación magnética del cobalto después de la sinterización suele ser del 85-95% del valor teórico (porque parte del cobalto se disuelve en WC o forma una fase no magnética).

Situación anormal:

Ms es bajo (<90%): puede existir fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), óxido o contenido insuficiente de cobalto.

Ms es demasiado alto (>110%): puede haber un contenido excesivo de carbono libre o cobalto.

Verificación complementaria: los resultados anormales deben combinarse con un análisis metalográfico (observación al microscopio de la fase η , carbono libre) o un análisis químico (medición ICP del contenido de cobalto).

10. Informe de prueba

El informe debe incluir lo siguiente:

Referencia estándar: ISO 3326:2013.

Información de la muestra: número, forma, calidad, lote.

Condiciones de prueba: modelo del dispositivo, intensidad del campo magnético (T), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

Resultados: Valor Ms ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), contenido de cobalto calculado (%), saturación magnética relativa (S).

Información de calibración: Valor Ms de la muestra estándar, fecha de calibración.

Descripción de la excepción: si hay una desviación, describa la posible causa (como la fase η).

Probador: Nombre, fecha, firma.

Información del laboratorio: nombre, dirección, calificaciones de certificación.

11. Precauciones

Calibración del equipo: Calibración regular, error $\leq \pm 1\%$, utilizando muestras estándar trazables.

Uniformidad de la muestra: Evite grietas, poros o composición desigual que afecten la precisión de Ms.

Control ambiental: El entorno de prueba no tiene interferencias de campo magnético fuerte y la temperatura es de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Seguridad: Cumplir con los procedimientos de operación del equipo para evitar el impacto de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

campos magnéticos fuertes en el personal o en el equipo electrónico.

Verificación de datos: Los valores anormales de Ms deben probarse repetidamente y confirmarse en combinación con análisis metalográficos o de XRD.

12. Anexos

Apéndice A (informativo): Relación entre la saturación magnética del cobalto y el contenido de carbono.

Se proporciona una gama de aleaciones WCCo típicas (por ejemplo, YG6: $M_s \approx 0,97 \mu Tm^3/kg$, YG8: $M_s \approx 1,29 \mu Tm^3/kg$).

El gráfico muestra el efecto de la fase η y el carbono libre en Ms (la fase η disminuye en un 1020%, el carbono libre disminuye en un 510%).

Apéndice B (informativo): Guía de calibración de equipos.

Frecuencia de calibración recomendada (mensual o cada 1000 pruebas), requisitos de muestra estándar.

Apéndice C (informativo): Análisis de fuentes de error.

Inhomogeneidad de la muestra, equipo no calibrado, interferencia del campo magnético ambiental, etc.

13. Enlaces a normas relacionadas

ASTM B886: Método similar para determinar la saturación magnética del carburo cementado, enfatizando la no destructividad y la evaluación indirecta del contenido de carbono (ASTM B886, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

Método de prueba de saturación magnética de carburo cementado: ASTM B88624

1. Introducción

El carburo cementado (como la aleación de carburo de tungsteno y cobalto, WCCo) se usa ampliamente en campos industriales como herramientas de corte, moldes y brocas debido a su alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad. La **resistencia a la saturación magnética (Ms)** es un indicador clave para evaluar el contenido y la calidad de las fases de enlace ferromagnéticas (como el cobalto y el níquel) en el carburo cementado. La norma ASTM B88624 especifica el método para determinar la Ms de polvos de carburo cementado y productos sinterizados utilizando un comprobador de saturación magnética, que es adecuado para el control de calidad no destructivo, la evaluación indirecta del contenido de carbono y la aceptación del producto. Este artículo presenta el contenido de la norma ASTM B88624 en detalle, incluidos el alcance, los principios, los equipos, los procedimientos, los cálculos y los requisitos de informes, para proporcionar una referencia para los profesionales.

2. Alcance estándar

Esta norma describe un método de ensayo no destructivo para determinar la intensidad de saturación magnética (Ms) en polvos de carburo cementado y productos sinterizados, con el fin de evaluar la fracción magnética de las fases de enlace ferromagnético (como cobalto, níquel y hierro). Los objetos aplicables incluyen:

Polvo de carburo cementado antes de la sinterización.

Productos sinterizados como cuchillos, moldes, brocas.

Propósito de la prueba:

Evaluación indirecta del contenido de carbono, detección de la fase η (Co₃W₃C) o carbono libre.

Verifique el contenido de la fase aglutinante para garantizar que se cumplan las especificaciones.

Evaluar la calidad del producto en polvo y sinterizado para la aceptación del producto.

El estándar se basa en unidades SI ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) y se complementa con unidades pulgada-libra.

3. Términos y definiciones

Carburo cementado : Material compuesto formado por una fase dura (como carburo de tungsteno WC, carburo de titanio TiC) y una fase de enlace ferromagnético (como cobalto, níquel).

Intensidad de saturación magnética (Ms) : Intensidad a la cual la magnetización de la fase enlazante alcanza su valor máximo bajo un campo magnético fuerte, con la unidad de $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, reflejando el contenido de cobalto o níquel.

Fase aglutinante ferromagnética : cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe), proporciona magnetismo y tenacidad, siendo el cobalto el más común.

Fase η : carburo no magnético (como Co₃W₃C) que se forma cuando el carbono es insuficiente, lo que reduce Ms y la tenacidad.

Carbono libre : carbono no magnético que se precipita cuando el carbono es excesivo, lo que reduce

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

Ms y la resistencia.

Constante de saturación magnética : el cobalto puro Ms es $16,116,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, el níquel es $5,4 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$.

4. Importancia y uso

No destructivo : no es necesario destruir la muestra, adecuado para productos en polvo y sinterizados.

Evaluación del contenido de carbono : Ms refleja el balance de carbono, la fase η o el carbono libre disminuye Ms.

Control de calidad : verificación del contenido de cobalto/níquel, detección de defectos de sinterización (por ejemplo, óxidos).

Aceptación del producto : asegúrese de que el producto cumpla con las especificaciones de grado (como YG6, YG8).

Limitaciones : Sólo aplicable a carburos cementados que contienen fase aglutinante ferromagnética, no aplicable a aleaciones no magnéticas.

5. Principio de prueba

El magnetismo del carburo cementado proviene de la fase aglutinante ferromagnética (como el cobalto), y la fase dura (como el WC) no contribuye al magnetismo. Bajo un campo magnético intenso (1,52 T), la fase aglutinante alcanza la saturación magnética, y Ms es proporcional al contenido de la fase aglutinante. La fórmula para calcular el contenido de cobalto es $\text{Ms} \div 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg} \approx \text{Fracción másica de cobalto}$. Por ejemplo, $\text{Ms} = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ significa que el contenido de cobalto es de aproximadamente el 10%. Las impurezas no magnéticas (como la fase η , el carbono libre y los óxidos) reducen Ms, y los valores anormales indican problemas de calidad.

6. Equipo de prueba

Probador de saturación magnética : como Koerzimat MS, Sigmameter, equipado con un fuerte generador de campo magnético (1,52 T) y un sistema de detección de flujo magnético (precisión $\pm 0,5\%$).

Balanza de precisión : precisión $\pm 0,01 \text{ g}$, mide la masa de la muestra.

Muestra estándar de calibración : cobalto puro ($\text{Ms} = 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) o carburo cementado con Ms conocido.

Dispositivo de temperatura constante : temperatura ambiente de prueba 2025°C .

Equipo de desmagnetización (opcional): eliminar la magnetización residual de las muestras.

7. Requisitos de la muestra

Tipo : Polvo antes de sinterizar o producto sinterizado (como herramientas, moldes).

Forma y tamaño : Cualquier forma (como cilindro, cubo), tamaño 510 mm, masa 0,550 g.

Superficie : Limpia, libre de aceite, capa de óxido o daños mecánicos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Uniformidad : La composición interna es uniforme, sin grietas ni poros.

Muestreo : Al menos 3 muestras representativas por lote.

8. Pasos de prueba

Calibración de equipos :

Calibrado utilizando muestras de cobalto puro o carburo certificado, error $M_s \leq \pm 1\%$.

Registrar datos de calibración (muestra estándar M_s , fecha).

Preparación de la muestra :

Limpie la muestra para eliminar aceite, suciedad y óxidos.

Pesar la masa (en g, $\pm 0,01$ g).

Si hay magnetización residual, utilice un equipo de desmagnetización.

Medición de saturación magnética :

La muestra se colocó en un campo magnético fuerte (1,52 T) para garantizar que la fase de cobalto estuviera completamente magnetizada.

Mida el flujo magnético y registre M_s ($\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$).

La medición se repitió tres veces y se obtuvo el valor promedio. La desviación única fue $\leq \pm 0,5\%$.

Registros de datos :

Registre el número de muestra, la masa, el valor M_s y las condiciones de prueba (intensidad del campo magnético, temperatura).

Si M_s es anormal, verifique la muestra o el equipo y vuelva a realizar la prueba si es necesario.

9. Cálculo y expresión

Intensidad de saturación magnética :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

La unidad es $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, con 3 decimales (por ejemplo, 1,610 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

Contenido de cobalto :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Mantenga 1 decimal (por ejemplo, 10,0%).

Saturación magnética relativa (S) :

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

La teoría de M_s se basa en el contenido de cobalto, $S < 0,9$ indica fase η y $S > 1,1$ indica carbono libre.

Precisión : Error de repetibilidad $\leq \pm 1\%$, desviación de lote a lote $\leq \pm 2\%$.

10. Análisis de resultados

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rango normal : El Ms de la aleación sinterizada es del 85-95% del valor teórico (porque parte del cobalto se disuelve en WC o forma una fase no magnética).

Situación anormal :

Ms es bajo (<90%): contenido insuficiente de fase η , óxido y cobalto.

Ms es demasiado alto (>110%): el contenido de carbono libre y cobalto excede el estándar.

Verificación complementaria : Los valores anormales de Ms deben combinarse con un análisis metalográfico (observación al microscopio de la fase η , carbono libre), difracción de rayos X o análisis químico (medición ICP del contenido de cobalto).

11. Informe de prueba

El informe incluye:

Referencia estándar: ASTM B88624.

Información de la muestra: número, tipo (polvo/sinterizado), forma, masa, lote.

Condiciones de prueba: modelo del dispositivo, intensidad del campo magnético, temperatura.

Resultados: Valor Ms, contenido de cobalto, saturación magnética relativa.

Información de calibración: Valor Ms de la muestra estándar, fecha de calibración.

Descripción de la excepción: Motivo de la desviación (p. ej. fase η , carbono libre).

Probador: Nombre, fecha, firma.

Información del laboratorio: nombre, dirección, calificaciones de certificación.

12. Precisión y sesgo

Repetibilidad : Con el mismo equipo y operador, la desviación de 3 mediciones es $\leq \pm 0,5\%$.

Reproducibilidad : La desviación de lote a lote es $\leq \pm 2\%$ en diferentes laboratorios y equipos.

Desviación : Sin desviación sistemática, valores de Ms trazables a unidades SI.

Factores influyentes : muestras desiguales, equipos no calibrados e interferencias del campo magnético ambiental.

13. Notas

Calibración del Equipo : Mensual o cada 1000 pruebas, utilizando cobalto puro o muestras certificadas.

Homogeneidad de la muestra : evitar grietas, poros o composición desigual.

Control ambiental : sin interferencias de campo magnético fuerte, temperatura 2025 °C.

Seguridad : Siga los procedimientos de operación del equipo y evite la influencia de campos magnéticos fuertes.

Verificación de datos : Repetición de pruebas de resultados anormales, combinadas con análisis metalográficos o químico.

14. Apéndice

Apéndice A : Relación entre la saturación magnética y el contenido de carbono.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aleaciones típicas: YG6 (6% cobalto, $M_s \approx 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), YG8 (8% cobalto, $M_s \approx 1,29 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).
Reducción de fase η M_s 1020%, carbono libre reducido en 510%.

Apéndice B : Guía de calibración de equipos.

Frecuencia de calibración, requisitos de muestra estándar, control de errores.

Apéndice C : Fuentes de error y controles.

Preparación de muestras, estabilidad del equipo, interferencia ambiental.

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

GB/T 38492015 Determinación del valor de saturación magnética del cobalto en carburo cementado

Fecha de emisión : 10 de diciembre de 2015

Fecha de implementación : 1 de julio de 2016

Estado : Válido actualmente.

Ámbito de aplicación : Esta norma especifica el método para determinar la saturación magnética del cobalto en carburo cementado. Es aplicable al carburo cementado que contiene un aglutinante ferromagnético (principalmente cobalto, fracción másica $\geq 3\%$) y se utiliza para el control de calidad, la verificación del contenido de cobalto y la evaluación del balance de carbono.

1. Alcance

Esta norma describe un método no destructivo para determinar **el valor de saturación magnética** (M_s) del cobalto en carburos cementados con el fin de evaluar el contenido de cobalto, el equilibrio de carbono y la calidad de la aleación.

Aplicable a:

Productos de carburo sinterizado (como herramientas, moldes, brocas).

Polvo de carburo cementado antes de la sinterización (dependiendo de las capacidades del equipo).

Propósito de la prueba:

Verifique que el contenido de cobalto cumpla con las especificaciones (por ejemplo, YG6, YG8).

Evaluación indirecta del contenido de carbono, detección de la fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) o carbono libre.

Evaluar la calidad del proceso de sinterización e identificar impurezas no magnéticas como óxidos.

Unidad: Se utilizan unidades del SI. El valor de saturación magnética se expresa en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ o

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

kA·m²/kg.

2. Referencias normativas

GB/T 3848 : Método de análisis químico para carburo cementado (utilizado para complementar la verificación del contenido de cobalto).

GB/T 4198 : Métodos de muestreo y preparación de muestras para carburo cementado.

ISO 3326:2013 : Método para la determinación de la saturación magnética del cobalto en carburo cementado (Esta norma es consistente con la ISO 3326 en contenido técnico y la traducción es equivalente).

ASTM B886 : Método para la determinación de la saturación magnética del carburo cementado (norma de referencia, método similar).

3. Términos y definiciones

Carburo cementado : Material compuesto formado por una fase dura (como carburo de tungsteno WC, carburo de titanio TiC) y una fase de enlace ferromagnético (como cobalto, níquel).

Saturación magnética de cobalto (Ms) : El valor de la intensidad máxima de magnetización de la fase aglutinante de cobalto bajo un campo magnético fuerte, unidad: $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, que refleja el contenido y la pureza del cobalto.

Fase de enlace ferromagnético : metales ferromagnéticos como el cobalto (Co) y el níquel (Ni), siendo el cobalto el principal agente de enlace.

Fase η (fase Eta) : carburos no magnéticos (como $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) que se forman cuando el carbono es insuficiente, lo que reduce el magnetismo y la tenacidad.

Carbono Libre : Carbono no magnético que precipita cuando hay exceso de carbono, debilitando la resistencia.

Constante de saturación magnética : cobalto puro Ms es $16,116,3 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (ScienceDirect, 2020).

4. Principio

El magnetismo del carburo cementado proviene de la fase aglutinante de cobalto y la fase dura (como el WC) no contribuye al magnetismo.

Bajo campos magnéticos intensos (típicamente de 1,52 T), la fase de cobalto alcanza la saturación magnética y Ms es proporcional al contenido de cobalto. La constante Ms del cobalto puro es de $16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ (valor típico).

Contenido de cobalto: $\text{Ms} \div 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg} \approx \text{Fracción másica de cobalto}$. Por ejemplo, $\text{Ms} = 1,61 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$ significa que el contenido de cobalto es de aproximadamente el 10 %.

Influencia de impurezas no magnéticas:

La fase η o los óxidos reducen Ms 1020%, lo que indica una cantidad insuficiente de carbono.

Reducción de carbono libre Ms 510%, lo que indica exceso de carbono.

La prueba no es destructiva e independiente de la forma y el tamaño de la muestra (dentro de los límites del equipo).

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. Aparato

Analizador magnético : como Koerzimat MS, Sigmameter o equipos domésticos (como un comprobador de saturación magnética de una fábrica de instrumentos china), equipados con:
Generador de campo magnético fuerte (1,52 T, para asegurar la saturación de la fase de cobalto).
Sistema de detección de flujo magnético (precisión $\pm 0,5\%$).

Balanza de precisión : precisión $\pm 0,01$ g, mide la masa de la muestra.

Estándar de calibración : cobalto puro ($M_s = 16,1 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) o muestras de carburo cementado con M_s conocido, trazables a unidades SI.

Dispositivo de temperatura constante : La temperatura del entorno de prueba se controla a 2025°C para evitar efectos térmicos.

Equipo de desmagnetización (opcional): eliminar la magnetización residual de las muestras.

6. Muestra de prueba

Tipo : Productos de carburo sinterizado (preferidos) o polvo antes de la sinterización (dependiendo de las capacidades del equipo).

Forma y tamaño : Cualquier forma (como cilindro, cubo, pieza en bruto de herramienta), tamaño 510 mm, masa 0,550 g.

Requisitos de la superficie : limpia, libre de aceite, capa de óxido o daños mecánicos.

Homogeneidad : La composición interna es uniforme, sin grietas ni poros evidentes.

Muestreo : Según GB/T 4198, al menos 3 muestras representativas por lote.

7. Pasos de la prueba (Procedimiento)

Calibración de equipos :

El instrumento se calibra utilizando muestras de cobalto puro o carburo certificado, y el error M_s se controla dentro de $\pm 1\%$.

Registre los datos de calibración (valor M_s de la muestra estándar, fecha de calibración).

Preparación de la muestra :

Limpie la superficie de la muestra para eliminar aceite, suciedad y óxidos.

Pesar la masa de la muestra utilizando una balanza de precisión (m, unidad: g, precisión: $\pm 0,01$ g).

Si la muestra tiene magnetización residual, utilice un equipo de desmagnetización.

Medición de saturación magnética :

Coloque la muestra en un campo magnético fuerte (1,52 T) de un analizador magnético para asegurar que la fase de cobalto esté completamente magnetizada.

Mida el flujo magnético y registre M_s (en $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

La medición se repitió tres veces y se obtuvo el valor promedio. La desviación de una sola medición fue $< \pm 0,5\%$.

Registros de datos :

Registre el número de muestra, la masa, el valor M_s y las condiciones de prueba (temperatura, intensidad del campo magnético).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Si Ms es anormal, verifique la muestra o el equipo y vuelva a realizar la prueba si es necesario.

8. Cálculo y expresión de resultados

Valor de saturación magnética :

$$M_s = \frac{\text{磁通量}}{\text{样品质量}}$$

La unidad es $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$, con 3 decimales (por ejemplo, 1,610 $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

Contenido de cobalto :

$$\text{钴质量分数 (\%)} = \frac{M_s}{16.1} \times 100$$

Mantenga 1 decimal (por ejemplo, 10,0%).

Saturación magnética relativa (S) :

$$S = \frac{M_{s\text{测量}}}{M_{s\text{理论}}}$$

La teoría de Ms se basa en el contenido de cobalto, $S < 0,9$ indica fase η y $S > 1,1$ indica carbono libre.

Precisión : Precisión del resultado $\pm 1\%$, variación de lote a lote $< \pm 2\%$.

9. Análisis de resultados

Rango normal : El Ms de la aleación sinterizada suele ser del 85-95% del valor teórico (porque parte del cobalto se disuelve en WC o forma una fase no magnética).

Situación anormal :

Ms es bajo ($< 90\%$): puede existir fase η , óxido o contenido insuficiente de cobalto.

Ms es demasiado alto ($> 110\%$): puede haber un contenido excesivo de carbono libre o cobalto.

Verificación complementaria : los resultados anormales deben combinarse con un análisis metalográfico (observación al microscopio de la fase η , carbono libre), difracción de rayos X (DRX) o análisis químico (medición del contenido de cobalto según GB/T 3848).

10. Informe de prueba

El informe debe incluir:

Referencia estándar: GB/T 38492015.

Información de la muestra: número, tipo (polvo/sinterizado), forma, masa, lote.

Condiciones de prueba: modelo del dispositivo, intensidad del campo magnético (T), temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$).

Resultados: Valor de Ms ($\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), contenido de cobalto (%), saturación magnética relativa (S).

Información de calibración: Valor Ms de la muestra estándar, fecha de calibración.

Descripción de excepciones: Si hay desviaciones, describa las posibles causas (por ejemplo, fase η , carbono libre).

Probador: Nombre, fecha, firma.

Información del laboratorio: nombre, dirección, acreditación (si aplica).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11. Precisión y sesgo

Repetibilidad : Con el mismo equipo y operador, la desviación de 3 mediciones es $< \pm 0,5\%$.

Reproducibilidad : La desviación de lote a lote es $< \pm 2\%$ en diferentes laboratorios y equipos.

Sesgo : Sin sesgo sistemático, los valores de Ms son rastreables a unidades SI, la calibración garantiza la precisión.

Factores influyentes : muestras desiguales, equipos no calibrados e interferencias del campo magnético ambiental.

12. Precauciones

Calibración del Equipo : Mensual o cada 1000 pruebas, utilizando cobalto puro o muestras certificadas.

Uniformidad de la muestra : Evite grietas, poros o composición desigual que afecten la precisión de la muestra.

Control ambiental : El entorno de prueba no tiene interferencias de campo magnético fuerte y la temperatura es de $20 \pm 25^\circ\text{C}$.

Seguridad : Cumplir con los procedimientos de operación del equipo para evitar el impacto de campos magnéticos fuertes en el personal o en el equipo electrónico.

Verificación de datos : Ms anormal. El valor debe repetirse y confirmarse mediante análisis metalográfico o químico.

13. Anexos

Apéndice A (informativo) : Relación entre la saturación magnética del cobalto y el contenido de carbono.

Rango típico de aleación Ms: YG6 (6 % cobalto, $M_s \approx 0,97 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$), YG8 (8 % cobalto, $M_s \approx 1,29 \mu\text{Tm}^3/\text{kg}$).

Reducción de fase η Ms 1020%, carbono libre reducido en 510%.

Apéndice B (informativo) : Guía de calibración de equipos.

Frecuencia de calibración (mensual o cada 1000 pruebas), requisitos de muestra estándar.

Apéndice C (sólo información) : Análisis de fuentes de error.

Inhomogeneidad de la muestra, equipo no calibrado, interferencia del campo magnético ambiental, etc.

14. Enlaces a normas relacionadas

ISO 3326:2013 : Determinación de la saturación magnética del cobalto en carburo cementado. La norma GB/T 3849 es equivalente y tiene el mismo contenido técnico.

ASTM B88624 : Método para la determinación de la saturación magnética del carburo cementado, enfoque similar, cubre tanto los polvos como los productos sinterizados.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 3848 : Métodos de análisis químico para carburo cementado, verificación complementaria del contenido de cobalto.

GB/T 3850 : El método para la determinación de la coercitividad del carburo cementado, combinado con la prueba magnética de cobalto, puede evaluar de manera integral la microestructura.

GB/T 3850 : Método de determinación de la coercitividad del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la coercitividad (H_c) de materiales y productos de carburo cementado. Este método es aplicable a carburos cementados a base de carburo de tungsteno (como las aleaciones WC-Co; los grados típicos incluyen YG6, YG8, etc.) con cobalto (Co) como fase aglutinante. Mediante la medición de la coercitividad, se caracterizan indirectamente el tamaño de grano, la distribución del contenido de cobalto y la integridad microestructural del carburo cementado. Este método puede utilizarse para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación de productos y los ensayos no destructivos en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a los carburos cementados no basados en cobalto (como los carburos cementados basados en níquel o hierro) ni a los materiales no magnéticos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

GB/T 3849 Método de prueba para las propiedades magnéticas del carburo cementado

GB/T 223.1 Métodos de análisis químico para acero y aleaciones

GB/T 230.1 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo

ISO 3326:2013 Método para la determinación de la coercitividad del carburo cementado

Norma ASTM B887 para la determinación de la coercitividad del carburo cementado

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Fuerza coercitiva (H_c)

En el carburo cementado, la intensidad del campo magnético inverso requerida para reducir la intensidad de magnetización de la fase aglutinante de cobalto desde el estado de saturación a cero, la unidad es kA/m (kiloamperio/metro).

3.2 Saturación Magnética (M_s)

Bajo la acción de un campo magnético externo (generalmente $>1,5$ T), la fase de cobalto alcanza el estado de máxima intensidad de magnetización, con la unidad de $\mu Tm^3 / kg$ (momento magnético por kilogramo de material).

3.3 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

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 fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.4 Tamaño del grano El tamaño promedio de

las partículas de carburo de tungsteno en el carburo cementado, expresado en micrómetros (μm), afecta el valor de la fuerza coercitiva.

3.5 η (fase Eta)

es una fase frágil que se forma en el carburo cementado debido a un contenido insuficiente de carbono. Su fórmula química es $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, lo que reduce las propiedades magnéticas y la tenacidad.

3.6 Carbono libre:

Carbono precipitado debido al contenido excesivo de carbono en el carburo cementado, lo que afecta las propiedades magnéticas y la dureza.

4 Principio

La coercitividad del carburo cementado proviene del ferromagnetismo de la fase aglutinante de cobalto (la temperatura de Curie es de aproximadamente 1145°C , la intensidad de magnetización es de $1,7\text{-}1,75\text{ }\mu\text{B}/\text{átomo}$), mientras que la fase dura (como el WC) es un material no magnético y no contribuye al magnetismo. El principio básico de la prueba de coercitividad es el siguiente: primero, la fase de cobalto se magnetiza completamente hasta la saturación bajo la acción de un fuerte campo magnético externo ($1,5\text{-}2\text{ T}$), y luego se aplica un campo magnético inverso que aumenta gradualmente para medir la intensidad del campo magnético que hace que la intensidad de magnetización caiga a cero, es decir, la coercitividad (H_c). La coercitividad es inversamente proporcional al tamaño de grano de la fase de cobalto. La H_c del carburo cementado de grano fino (granos de $0,2\text{-}0,5\text{ }\mu\text{m}$) suele estar entre 25 y 40 kA/m , y la del carburo cementado de grano grueso (granos $>5\text{ }\mu\text{m}$) entre 5 y 10 kA/m . Además, la coercitividad también se ve afectada por el contenido de cobalto, la uniformidad microestructural y los defectos (como la fase η o los poros), lo cual permite evaluar la microestructura y la calidad del proceso del carburo cementado.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Medidor de coercitividad

El medidor de coercitividad de imán permanente o electromagnético puede proporcionar un campo magnético fuerte de $1,5$ a 2 T , con una precisión de medición de $\pm 1\text{ kA/m}$ y una repetibilidad de $<2\%$.

5.2 Un analizador magnético

como Koerzimat 1.097 o Sigmameter 2.068 puede medir la coercitividad y la intensidad de saturación magnética simultáneamente con una precisión de $\pm 0,5\%$.

5.3 El magnetómetro de muestra vibratoria (VSM)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se utiliza para mediciones de alta precisión con un error de $\pm 0,1$ kA/m y es adecuado para investigaciones de laboratorio.

5.4 Balanza

con una precisión de $\pm 0,01$ g, utilizada para pesar la masa de la muestra.

5.5 Las herramientas de limpieza

incluyen etanol y pinzas no magnéticas para limpiar la superficie de la muestra.

5.6 La temperatura del entorno de prueba se controla en una caja de temperatura constante a 20-25 °C y la humedad es <60 %.

5.7 Se utiliza un microscopio metalográfico

con un aumento de 200x a 500x para verificar el tamaño del grano y la microestructura.

5.8 El difractómetro de rayos X (XRD)

se utiliza para detectar la fase η ($2\theta \approx 40^\circ$) o carbono libre ($2\theta \approx 26^\circ$).

6. Muestras

6.1 Requisitos de la muestra

Forma: La muestra es cilíndrica o cúbica, con un tamaño de 5-10 mm (diámetro o longitud del lado).

Estado de la superficie: La superficie debe ser plana, libre de grietas (longitud <5 μ m), poros (porosidad <0,05%) o capa de óxido, y limpiada con etanol si es necesario.

Homogeneidad: desviación de composición <0,1 % en peso, fluctuación del tamaño de grano <5 %, evitando defectos internos que afecten la medición.

Cantidad: Cada lote deberá tener no menos de 3 muestras, y las muestras deberán provenir del mismo proceso de sinterización.

6.2 Preparación de la muestra

Corte las muestras a partir de piezas en bruto de carburo o productos terminados (por ejemplo, herramientas, matrices) para evitar la introducción de tensión durante el corte (tensión < 100 MPa).

Si hay una capa de óxido o aceite en la superficie de la muestra, límpiela con etanol y séquela.

Pese la muestra (precisión $\pm 0,01$ g) y registre el número de muestra.

7 Métodos de prueba

7.1 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 20-25°C, fluctuación de temperatura $\leq \pm 2^\circ\text{C}$, para evitar afectar las propiedades magnéticas de la fase de cobalto.

Humedad ambiente: <60%, para evitar que la humedad provoque microcorrosión de la fase de cobalto (la intensidad de magnetización disminuye en <2%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Interferencia del campo magnético: No hay interferencia fuerte del campo magnético en el área de prueba ($<0,1$ mT).

7.2 Calibración del instrumento

utilizando muestras estándar (por ejemplo, cobalto puro, $H_c = 5$ kA/m, $M_s = 16,2$ $\mu\text{Tm}^3/\text{kg}$) con un error de $<\pm 1\%$.

Ciclo de calibración: una vez al mes, o antes de cada prueba.

Compruebe la intensidad del campo magnético (1,5-2 T) para asegurarse de que la fase de cobalto sea totalmente magnetizable.

7.3 Pasos de prueba

Coloque la muestra en el área de prueba del medidor de coercitividad y fíjela con una abrazadera no magnética para asegurar que la muestra no se mueva.

Aplicar un campo magnético fuerte (1,5-2 T) para magnetizar completamente la fase de cobalto hasta la saturación y mantenerlo durante 5-10 segundos.

Aplique gradualmente un campo magnético inverso y registre la intensidad del campo magnético cuando la intensidad de magnetización cae a cero, es decir, la fuerza coercitiva (H_c), en kA/m.

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de $<2\%$.

Registre el número de muestra, la masa, el valor de H_c y las condiciones de prueba (temperatura, humedad, modelo del instrumento).

7.4 Procesamiento de datos

El promedio de los tres valores medidos para cada muestra se calculó como el valor final de H_c .

Si el valor de H_c del mismo lote de muestras fluctúa en $>10\%$ (por ejemplo, YG8 cambia de 15 kA/m a 25 kA/m), esto indica una sinterización desigual y se requieren más pruebas.

Basado en la fórmula empírica $H_c \approx k/d$ (k es una constante, d es el tamaño de grano). Por ejemplo, $H_c = 30$ kA/m corresponde a un tamaño de grano de aproximadamente $0,2-0,5$ μm .

8 Resultados Expresión

El valor de la fuerza coercitiva se expresa en kA/m, con un decimal (por ejemplo, 15,2 kA/m).

El informe de prueba debe incluir:

a) número de muestra; b) valor de coercitividad (H_c); c) condiciones de prueba (temperatura, humedad); d) modelo del instrumento y estado de calibración; e) si el valor de H_c se desvía del valor objetivo en $>\pm 5\%$ (por ejemplo, objetivo YG6 18 kA/m, medido $<17,1$ o $>18,9$ kA/m), se deben explicar las posibles razones (por ejemplo, anomalías de fase η o grano).

9 Precisión y sesgo

9.1 Precisión

El valor de H_c de la medición repetida de la misma muestra por el mismo operador y el mismo equipo dentro de un corto período de tiempo es inferior al 2%.

Reproducibilidad: La desviación de los valores de H_c medidos por diferentes laboratorios, diferentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

operadores y diferentes equipos es <5%.

9.2 Sesgo

Error de calibración del instrumento: ± 1 kA/m.

Inhomogeneidad de la muestra: La falta de homogeneidad en la composición o el tamaño del grano hace que el Hc fluctúe entre un 5 y un 10 %.

Interferencia ambiental: Los campos magnéticos fuertes ($>0,1$ mT) provocan desviaciones de Hc $>2\%$.

10 factores influyentes

10.1 Tamaño de grano.

Cuanto menor sea el tamaño de grano, mayor será la coercitividad. El carburo cementado de grano fino (tamaño de grano de $0,2 \mu\text{m}$) tiene una Hc de 30 a 40 kA/m, y el carburo cementado de grano grueso (tamaño de grano de $5 \mu\text{m}$) tiene una Hc de 5 a 10 kA/m.

10.2 Contenido de cobalto

El aumento del contenido de cobalto (del 6% al 15%) hace que la magnetización de la fase de cobalto sea más fácil de invertir y Hc disminuye ligeramente (10-15%).

10.3 La formación de la fase η de equilibrio de carbono

($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) hace que Hc disminuya en un 5-10% (por ejemplo, YG8 disminuye de 15 kA/m a 13 kA/m), y la influencia del carbono libre (C) es $<2\%$.

10.4 Proceso de sinterización

Las altas temperaturas (>1500 °C) provocan un engrosamiento de los granos y una disminución de Hc de 20 kA/m a 8 kA/m.

El prensado isostático en caliente (HIP, 150 MPa, 1350 °C) mejora la homogeneidad microestructural y el Hc aumenta entre un 5 y un 10 %.

10.5 Una porosidad defectuosa

$> 0,1$ % o una tensión residual (> 100 MPa) provocan que Hc fluctúe entre un 10 y un 15 %, y es necesario optimizar la densidad ($> 99,5$ %).

10.6 Factores ambientales

La temperatura alta (800 °C) reduce el Hc en un 5-8 % (por ejemplo, el YG10 cae de 18 kA/m a 16 kA/m).

El calor húmedo (40°C, 90% de humedad) afecta a $<2\%$.

11 Aplicación de los resultados de las pruebas

11.1 Clasificación del rendimiento

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

Hc >25 kA/m: adecuado para herramientas de alta dureza (como brocas para PCB, HRA >92, vida útil >4 horas).

Hc <10 kA/m: adecuado para moldes de alta tenacidad (como brocas para minería, KIC >15 MPa·m^{1/2}, vida útil >200 horas).

11.2 Optimización del proceso. Un Hc anormal

(fluctuación > 10%) indica granos gruesos o sinterización irregular. Se puede ajustar la temperatura de sinterización (1350-1450 °C) o añadir inhibidores de grano (como VC 0,2-0,5 % en peso).

11.3 Detección de defectos Una disminución del 5-10 %

en Hc (por ejemplo, YG8 de 15 kA/m a 13 kA/m) puede deberse a la fase η y es necesario ajustar el contenido de carbono (objetivo 6,0 ± 0,2 % en peso).

11.4 Ejemplos de aplicación

En el corte de acero de aviación (velocidad de corte 250 m/min), una herramienta que contenía 10% de Co pasó la prueba Hc (18 kA/m), asegurando una dureza HRA 90 y resistencia al impacto, y la vida útil de la herramienta alcanzó las 3,5 horas.

12 notas

12.1 Calibración del instrumento

Antes de realizar la prueba, calibre el instrumento con un error de <±1 % para evitar desviaciones sistemáticas.

12.2 Homogeneidad de la muestra

Las muestras deberán estar libres de grietas (<5 μm), poros (<0,05 %), desviación de la composición <0,1 % en peso y fluctuación del tamaño de grano <5 %.

12.3 Control ambiental

El área de prueba no tiene un campo magnético fuerte (<0,1 mT), la temperatura es de 20-25 °C y la humedad es <60 %.

12.4 Verificación integral

Si el valor de Hc es anormal (desviación > 5%), observe los límites de grano con un microscopio metalográfico (aumento de 500x) o utilice ICP para medir el contenido de cobalto (precisión ± 0,05 % en peso).

13 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Número estándar: GB/T 3850;

Descripción de la muestra: marca, lote, tamaño;

Condiciones de prueba: temperatura, humedad, interferencia del campo magnético;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Información del instrumento: modelo, estado de calibración;
Resultados de la prueba: valor de coercitividad (H_c , kA/m), análisis de desviación;
Descripción anormal: Si la desviación del valor de H_c es $>5\%$, explique la posible causa;
Fecha de prueba: por ejemplo, 21 de mayo de 2025;
Probador: Firma.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos de coercitividad

Tabla A.1 Valores de coercitividad de grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Fuerza coercitiva (kA/m)
YG6	6	1-2	15-20
YG8	8	2-3	10-15
YG10	10	2-4	8-12
Nanoaleación	8	0,05-0,2	50-60

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

± 1 kA/m.

B.2 Inhomogeneidad de la muestra

La composición o el tamaño de grano no homogéneos hacen que el H_c fluctúe entre un 5 y un 10 %.

B.3 Interferencia ambiental

Un campo magnético fuerte ($>0,1$ mT) provoca una desviación de $H_c >2\%$.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar un magnetómetro de muestra vibratoria (VSM) de alta precisión con un error de $\pm 0,1$ kA/m.

C.2 Utilizar inteligencia artificial (IA) para analizar datos de H_c y predecir el tamaño del grano y los defectos con una precisión superior al 90 %. C.3 Introducir un equipo de prueba de coercitividad de alta temperatura (compatible con pruebas de 800-1000 °C) para evaluar el rendimiento a alta temperatura. C.4 Combinar la espectroscopia infrarroja para monitorizar la atmósfera de sinterización, ajustar dinámicamente los parámetros de sinterización y reducir las fluctuaciones de H_c ($<2\%$).

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de la prueba de coercitividad del carburo cementado YG8

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

Muestra N°	Masa (g)	Valor de medición de Hc (kA/m)	Hc promedio (kA/m)	desviación(%)
YG8-001	5.02	14.8, 15.0, 14.9	14.9	1.3
YG8-002	5.05	15.1, 15.3, 15.0	15.1	1.9
YG8-003	4.98	14.7, 14.9, 14.8	14.8	1.3

Apéndice E Datos de impacto ambiental

Cambios en el valor de Hc en diferentes condiciones ambientales

Condiciones ambientales	Hc (kA/m)	cambiar(%)
Estándar (25 °C, 50 % de humedad)	15.0	-
Alta temperatura (800°C)	13.8	-8.0
Calor húmedo (40°C, 90% de humedad)	14.7	-2.0

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar el contenido de cobalto (Co) en el carburo cementado. Este método es aplicable a materiales y productos de carburo cementado (como los grados YG6, YG8, etc.) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto como fase aglutinante. El porcentaje en peso (% en peso) de cobalto se determina mediante análisis químico o instrumental. Este método puede utilizarse para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación de productos y el análisis de componentes en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a los carburos cementados que no sean a base de cobalto (como los carburos cementados a base de níquel o de hierro) ni a los materiales que contengan otros elementos interferentes significativos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3849 Método de prueba para las propiedades magnéticas del carburo cementado

GB/T 223.1 Métodos de análisis químico para acero y aleaciones

GB/T 6682 Especificaciones y métodos de prueba para el agua utilizada en laboratorios analíticos

ISO 3909:1976 Determinación del contenido de cobalto en carburos cementados - Método potenciométrico

Método de prueba estándar ASTM E1019: Análisis de la composición química de aleaciones

3 Términos y definiciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Contenido de cobalto:

El porcentaje de peso (wt %) de cobalto en el carburo cementado, basado en la masa total, refleja la proporción de la fase aglutinante.

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

La fase 3.3 η (fase eta)

es una fase frágil que se forma en el carburo cementado debido a un contenido insuficiente de carbono. Su fórmula química es $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, lo que puede interferir con la determinación del contenido de cobalto.

3.4 Carbono libre El

carbono precipitado del carburo cementado debido al contenido excesivo de carbono puede afectar los resultados del análisis.

3.5 La titulación potenciométrica es

un método de titulación que utiliza electrodos para medir el cambio en el potencial de la solución para determinar el punto final.

4 Principio

El principio para determinar el contenido de cobalto en el carburo cementado se basa en la descomposición química y el análisis cuantitativo. La muestra se descompone con ácido o material fundido para convertir el cobalto en un compuesto soluble (como el cloruro de cobalto), y luego su contenido se determina mediante un método gravimétrico, titulación potenciométrica o análisis espectroscópico. El método de titulación potenciométrica utiliza el complejo estable formado por el cobalto y el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) para determinar el punto final mediante el cambio de potencial; el método de análisis espectroscópico (como la espectroscopia de absorción atómica o la espectroscopia de emisión de plasma acoplado inductivamente) se basa en el espectro característico de absorción o emisión del cobalto para su cuantificación. La fase η o el carbono libre pueden interferir con la determinación y deben eliminarse mediante pretratamiento.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Balanza analítica

con precisión de $\pm 0,0001$ g, utilizada para pesar muestras y reactivos.

5.2 Titulador potenciométrico

equipado con electrodo de vidrio y electrodo de referencia, con precisión de $\pm 0,1$ mV, adecuado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para titulación potenciométrica.

Para la determinación del contenido de cobalto se utilizó **un espectrómetro de absorción atómica (AAS) con una longitud de onda de 240,7 nm y un límite de detección de 0,01 µg/mL.**

5.4 El límite de detección del espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

es de 0,001 µg/mL, lo que es adecuado para el análisis de múltiples elementos.

5.5 El rango de control de temperatura del baño de agua de temperatura constante es de 20 a 100 °C, con una precisión de ±1 °C.

5.6 Para la descomposición de la muestra se utiliza una placa calefactora o un horno eléctrico con un rango de temperatura de 100 a 600 °C.

5.7 Las unidades de destilación ácida

se utilizan para eliminar elementos interferentes (como arsénico y antimonio).

5.8 Las capacidades de las pipetas y matraces volumétricos

son 5 mL, 10 mL, 25 mL y 100 mL, con una precisión de ±0,1 mL.

6 reactivos

6.1 Ácido nítrico (HNO₃) de

alta pureza, concentración 65%-68%.

6.2 Ácido clorhídrico (HCl)

de alta pureza, concentración 36%-38%.

6.3 El ácido sulfúrico (H₂SO₄) es

de alta pureza, con una concentración del 95%-98 %.

6.4

La concentración de la solución estándar de EDTA es 0,01 mol/L, utilizar después de la calibración.

6.5 Solución tampón

pH 5,0-6,0, que contiene acetato de amonio y amoníaco.

6.6 Se utilizan indicadores

como el naranja de xilenol para determinar el punto final de la titulación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.7 El agua desionizada

cumple con el estándar de agua GB/T 6682 Grado 1.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Forma: La muestra es polvo, gránulos o trozos pequeños con una masa de 0,2-0,5 g.

Homogeneidad: desviación de la composición <0,1 % en peso, fluctuación del tamaño del grano <5 %.

Estado de la superficie: Sin capa de aceite ni óxido, limpiar con etanol si es necesario.

7.2 Preparación de la muestra

Tome una muestra representativa del producto terminado o en bruto de carburo cementado y tritúrela hasta obtener un tamaño de partícula de <0,1 mm.

Después de mantenerse en un desecador a temperatura constante (105°C, 1 h), la muestra se enfrió a temperatura ambiente y se pesó ($\pm 0,0001$ g).

Tome de 3 a 5 muestras paralelas de cada lote para garantizar resultados representativos.

8 Métodos de prueba

8.1 Titulación potenciométrica

8.1.1 Descomposición de la muestra

Pesar 0,2 g de muestra y colocarla en un vaso de precipitados de 250 mL.

Agregue 10 ml de ácido nítrico y 5 ml de ácido sulfúrico, caliente hasta que esté casi seco y enfríe.

Añadir 20 mL de ácido clorhídrico, calentar para disolver el residuo y luego enfriar y diluir a 100 mL.

8.1.2 Pasos de titulación

Tomar 10 mL de la solución, agregar solución tampón (pH 5,5) y el indicador de luteolina.

Titular con solución estándar de EDTA 0,01 mol/L y registrar el cambio de potencial hasta el punto final.

Fórmula de cálculo:

$$\text{钴含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times M \times 58.93 \times 100}{m \times 1000}$$

8.1.3 Prueba en blanco

Realice una prueba en blanco siguiendo los mismos pasos y deduzca el valor en blanco.

8.2 Espectroscopia de Absorción Atómica (AAS)

8.2.1 Descomposición de la muestra

Pesar 0,1 g de muestra, añadir 5 mL de ácido nítrico y 2 mL de ácido clorhídrico y calentar hasta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

dissolver.

Después de enfriar, el volumen se ajustó a 50 mL y se filtró a través de una membrana de filtro de 0,45 µm.

8.2.2 Pasos de medición

Ajuste la longitud de onda del instrumento a 240,7 nm y comience la operación.

La concentración de cobalto se determinó utilizando un método de serie estándar en el rango de 0,1 a 10 µg/mL.

Fórmula de cálculo:

$$\text{钠含量 (wt\%)} = \frac{C \times V \times 100}{m \times 1000}$$

8.2.3 Eliminación de interferencias

Si hay interferencia de hierro o níquel, agregue un agente antiinterferente (como sal de lantano).

8.3 Espectroscopia de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

8.3.1 Descomposición de la muestra

Pesar 0,1 g de muestra, añadir 5 mL de ácido nítrico y 1 mL de peróxido de hidrógeno y digerir en microondas.

Después de enfriar, diluir a 50 ml y filtrar para su uso posterior.

8.3.2 Pasos de medición

Establezca la longitud de onda en 228,616 nm y calibre el instrumento.

La concentración de cobalto se determinó mediante el método de curva estándar con un límite de detección de 0,001 µg/mL.

La fórmula de cálculo es la misma que la del apartado 8.2.2.

8.3.3 Eliminación de interferencias

Si hay interferencia de tungsteno, ajuste los parámetros de corrección de fondo.

9 Resultados Expresión

El contenido de cobalto se expresa en % en peso con 2 decimales (por ejemplo, 6,25 %).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 3848; b) Descripción de la muestra: marca, lote, calidad; c) Método de prueba: titulación potenciométrica, AAS o ICP-OES; d) Resultado: contenido de cobalto y desviación; e) Condiciones de prueba: temperatura, humedad; f) Modelo del instrumento y estado de calibración; g) Fecha de prueba: como por ejemplo 21 de mayo de 2025; h) Probador: firma.

10 Precisión y sesgo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación del contenido de cobalto medida por el mismo operador, el mismo equipo y en un corto período de tiempo es $<0,2\%$.

Reproducibilidad: La desviación del contenido de cobalto medida por diferentes laboratorios y diferentes operadores es $<0,5\%$.

10.2 Sesgo

Error del instrumento: AAS $\pm 0,01 \mu\text{g/mL}$, ICP-OES $\pm 0,001 \mu\text{g/mL}$.

Inhomogeneidad de la muestra: una desviación de la composición $>0,1 \%$ en peso produce una fluctuación del resultado del $0,3-0,5 \%$.

Elementos interferentes: El sesgo puede alcanzar $1-2\%$ cuando no se elimina la fase η o el carbono libre.

11 Factores influyentes

11.1 La descomposición incompleta de la muestra (por ejemplo, residuo de tungsteno) puede dar lugar a una subestimación del contenido de cobalto de entre el $0,5$ y el 1% .

11.2 Elementos interferentes

El hierro ($>5\%$) y el níquel ($>2\%$) pueden interferir con la determinación de AAS y requieren una separación previa.

11.3 Concentración de ácido

demasiado alta Una acidez ($\text{pH} < 2$) hace que el punto final de la titulación de EDTA se desplace entre un $0,1$ y un $0,3 \%$.

11.4 Condiciones ambientales

La temperatura alta ($>40^\circ\text{C}$) o la humedad ($>70\%$) provocan la evaporación de la solución, con una desviación de $<0,2\%$.

12 Aplicación de los resultados de las pruebas

12.1 Control de calidad

Verifique que el contenido de cobalto cumpla con los requisitos de diseño, como el objetivo YG6 de $6 \pm 0,2\%$.

12.2 Optimización del proceso

Un contenido bajo de cobalto indica ingredientes insuficientes, mientras que un contenido alto de cobalto indica un exceso de fase aglutinante.

12.3 Predicción de propiedades

Un contenido de cobalto de $6-10\%$ corresponde a una dureza alta (HRA 90-92), $10-15\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corresponde a una tenacidad alta (KIC 12-15 MPa·m^{1/2}).

12.4 Ejemplo

En la producción de herramientas de corte, YG8 con un contenido de cobalto del 8,1% garantiza una dureza de HRA 91 y una vida útil de >3 horas.

13 Notas

13.1 El instrumento deberá calibrarse

utilizando una muestra estándar de cobalto con un error de <±0,1%.

13.2 Homogeneidad de la muestra

Asegúrese de que las muestras estén libres de grietas, poros y tengan una composición uniforme.

13.3 La temperatura de la sala de prueba se controla entre 20 y 25 °C y la humedad es <60 %.

13.4 Protección de seguridad

Use gafas protectoras durante el funcionamiento para evitar salpicaduras de ácido.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos del contenido de cobalto

Tabla A.1 Contenido de cobalto de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Dureza (HRA)	Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})
YG6	6,0 ± 0,2	90-91	10-12
YG8	8,0 ± 0,2	89-90	12-14
YG10	10,0 ± 0,3	88-89	14-16

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento:

AAS ±0,01 µg/mL, ICP-OES ±0,001 µg/mL.

B.2 Error operacional

La desviación del criterio de valoración del punto final de la titulación es del 0,1 al 0,2 %.

B.3 Influencia ambiental

Una humedad > 70% provoca una desviación del 0,2% en el resultado.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar la digestión por microondas para mejorar la eficiencia de descomposición y reducir los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residuos de tungsteno.

C.2 Utilizar ICP-MS para mejorar la sensibilidad de detección, con un límite de detección de <0,0001 µg/mL. C.3 Introducir un sistema de titulación automatizado para reducir los errores humanos.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba del contenido de cobalto en carburo cementado YG8

Muestra N°	Masa(g)	Contenido de cobalto (% en peso)	Valor promedio (% en peso)	desviación(%)
YG8-001	0.201	8.05, 8.10	8.08	0.37
YG8-002	0.203	8.00, 8.03	8.02	0,25
YG8-003	0.202	8.12, 8.09	8.11	0.37

Apéndice E Impacto de los elementos de interferencia

Tabla E.1 Efectos de diferentes elementos interferentes en la determinación del contenido de cobalto

干扰元素	含量 (wt%)	偏差 (wt%)	消除方法
铁	5	0.5	加入铜盐
镍	2	0.3	预分离
铝	10	1.0	微波消解

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

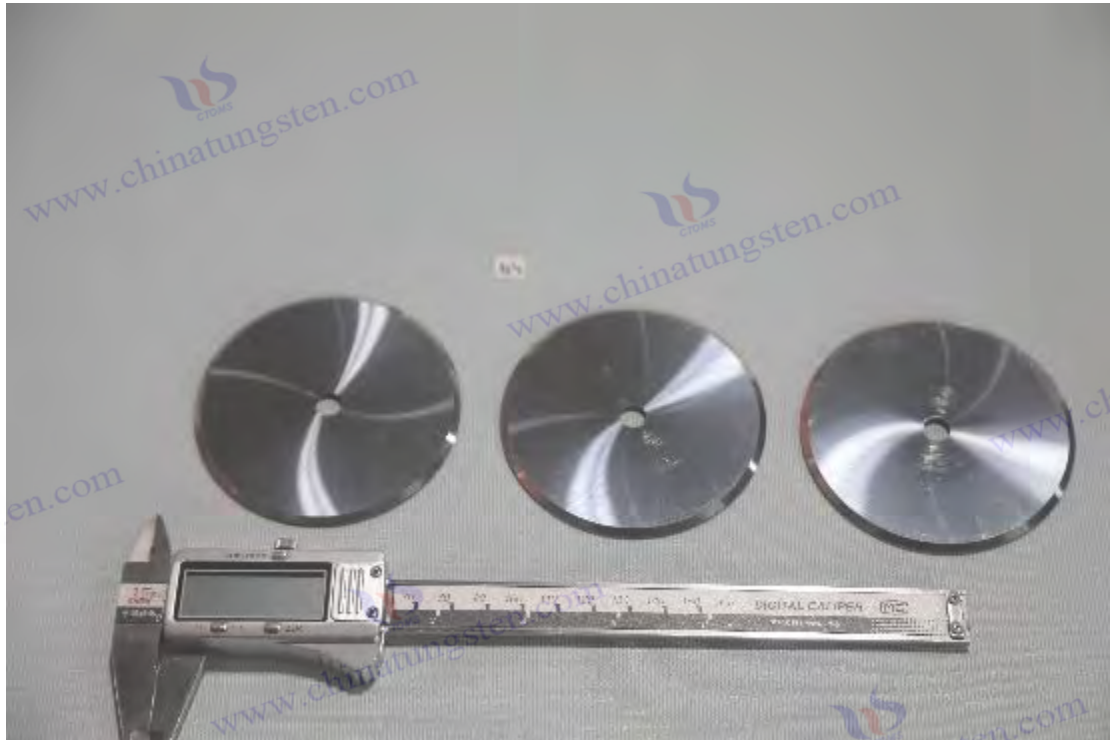
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



ISO 3909:1976

Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado: método potenciométrico

1 Alcance

Esta norma internacional especifica un método para determinar el contenido de cobalto (Co) en carburo cementado mediante un método potenciométrico. Este método es aplicable a mezclas de carburo y polvos metálicos de unión sin lubricante, carburo cementado presinterizado o sinterizado de todos los grados, con un contenido de cobalto superior al 1 % (fracción másica, m/m). Este método puede utilizarse para el control de calidad en la producción de carburo cementado, la aceptación del producto y el análisis de la composición en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a carburos cementados con un contenido de cobalto inferior al 1%, ni a materiales que contengan elementos interferentes significativos (como alto contenido de hierro y níquel).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

ISO 5725 Métodos de prueba de precisión (exactitud y exactitud) y evaluación de resultados

ISO 11873 Carburo cementado - Terminología

3 Términos y definiciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Contenido de cobalto:

El porcentaje de peso de cobalto en el carburo cementado (m/m), basado en la masa total, refleja la proporción de la fase de unión.

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 η (fase eta)

es una fase frágil que se forma en el carburo cementado debido a un contenido insuficiente de carbono. Su fórmula química es $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, lo que puede interferir con la determinación del contenido de cobalto.

3.4 Carbono libre:

El carbono precipitado del carburo cementado debido al contenido excesivo de carbono puede afectar los resultados del análisis.

3.5 La titulación potenciométrica es

un método para determinar el punto final de la titulación midiendo el cambio en el potencial de la solución.

4 Principio

Este método disuelve el cobalto en la muestra de carburo cementado en un compuesto soluble (como cloruro de cobalto) por descomposición ácida, y luego determina el contenido de cobalto por titulación potenciométrica. Después de que la muestra se descompone por ácido, los iones de cobalto (Co^{2+}) en la solución forman un complejo estable con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA), y el punto final se determina por titulación potenciométrica. La titulación potenciométrica utiliza electrodos (generalmente electrodos de vidrio y electrodos de referencia) para monitorear el salto repentino en el potencial de la solución para determinar el punto final. La fase η o el carbono libre pueden interferir con la determinación y deben eliminarse mediante un pretratamiento (como destilación ácida o filtración).

5 elementos de interferencia

5.1 Hierro (Fe)

Cuando el contenido de hierro es $>5\%$ (m/m), puede formar un complejo con EDTA, lo que interfiere con la titulación del cobalto y debe eliminarse mediante una separación previa (como el intercambio iónico).

5.2 Níquel (Ni)

Cuando el contenido de níquel es $>2\%$ (m/m), puede afectar el punto final de la titulación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

potenciométrica y debe eliminarse mediante una separación previa o la adición de un agente enmascarador (como agua amoniacal).

5.3 Tungsteno (W)

El tungsteno puede formar precipitados (como el ácido túngstico) que interfieren con la clarificación de la solución y deben eliminarse mediante disolución y filtración completas.

5.4 La fase η y

la fase η de carbono libre pueden llevar a una subestimación del contenido de cobalto, y el carbono libre puede adsorber iones de cobalto y necesitar tratamiento mediante presinterización o destilación ácida.

6 reactivos

6.1 Ácido nítrico (HNO_3)

grado analítico, concentración 65%-68%.

6.2 Ácido clorhídrico (HCl)

de grado analítico, concentración 36%-38%.

6.3 Ácido sulfúrico (H_2SO_4) de

grado analítico, concentración 95%-98%.

6.4 La concentración de la solución estándar de EDTA

es de 0,01 mol/L y debe calibrarse con una solución estándar de zinc antes de su uso.

6.5 Solución tampón

pH 5,0-6,0, que contiene acetato de amonio y amoníaco.

6.6 Indicador (auxiliar)

Naranja de xilenol, utilizado para observar el punto final de la titulación (opcional).

6.7 Resistividad del agua desionizada $\geq 18 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$.

7 Instrumentos y equipos

7.1 Se utiliza una **balanza analítica con una precisión de $\pm 0,0001 \text{ g}$ para pesar muestras y reactivos.**

7.2 El titulador potenciométrico

está equipado con un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia (como un electrodo Ag/AgCl)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

con una precisión de $\pm 0,1$ mV.

7.3 Para la descomposición de la muestra se utiliza **una placa calefactora o un horno eléctrico** con un rango de temperatura de 100 a 600 °C.

7.4 El rango de control de temperatura del **baño de agua de temperatura constante** es de 20 a 100 °C, con una precisión de ± 1 °C.

7.5 El aparato de destilación ácida

se utiliza para eliminar elementos interferentes (como arsénico y antimonio).

7.6 Las capacidades de **las pipetas y matraces volumétricos** son 5 mL, 10 mL, 25 mL y 100 mL, con una precisión de $\pm 0,1$ mL.

7.7 Dispositivo de filtrado

con membrana filtrante de 0,45 μ m para filtración de soluciones.

8. Muestras

8.1 Requisitos de la muestra

Forma: La muestra es polvo, gránulos o trozos pequeños con una masa de 0,2-0,5 g.

Homogeneidad: desviación de la composición $< 0,1\%$ (m/m), fluctuación del tamaño de grano $< 5\%$.

Estado de la superficie: Sin capa de aceite ni óxido, limpiar con etanol si es necesario.

8.2 Preparación de la muestra

Tome una muestra representativa del producto terminado o en bruto de carburo cementado y tritúrela hasta obtener un tamaño de partícula de $< 0,1$ mm.

Secar a 105°C durante 1 h, enfriar a temperatura ambiente y pesar ($\pm 0,0001$ g).

Tome de 3 a 5 muestras paralelas de cada lote para garantizar resultados representativos.

9 pasos de prueba

9.1 Descomposición de la muestra

Pesar 0,2 g de muestra ($\pm 0,0001$ g) y colocarlo en un vaso de precipitados de 250 mL.

Añadir 10 mL de ácido nítrico y 5 mL de ácido sulfúrico, calentar en una placa calefactora (200-250 °C) hasta que esté casi seco y enfriar.

Añadir 20 mL de ácido clorhídrico y continuar calentando (150°C) hasta que el residuo se disuelva completamente, luego enfriar.

Diluir con agua desionizada hasta 100 mL, filtrar (membrana filtrante de 0,45 μ m) y reservar.

9.2 Titulación potenciométrica

Tome 10 mL de la solución de prueba, colóquela en un vaso de titulación de 100 mL y agregue la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

solución tampón (pH 5,5).

Agregue 2-3 gotas de indicador de luteolina (opcional) y observe el cambio de color.

Monitoree el potencial con un titulador potenciométrico, agregue 0,01 mol/L de solución estándar de EDTA y registre el punto de salto de potencial (punto final).

Cada muestra se midió 3 veces y se calculó el valor promedio.

9.3 Prueba en blanco

Realice una prueba en blanco siguiendo el mismo procedimiento y deduzca el valor en blanco (generalmente <0,05 % de contenido de cobalto).

9.4 Cálculo

El contenido de cobalto se calcula de la siguiente manera:

$$\text{钴含量 (\%)} = \frac{C \times V \times M \times 100}{m \times 1000}$$

en:

- C: EDTA 标准溶液浓度 (mol/L);
- V: 消耗 EDTA 体积 (mL);
- M: 钴摩尔质量 (58,93 g/mol);
- m: 试样质量 (g)。

10. Expresión del resultado

El contenido de cobalto se expresa como fracción de masa (%), con 2 decimales (por ejemplo, 6,25%).

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: ISO 3909:1976; b) Descripción de la muestra: marca, lote, calidad; c) Condiciones de prueba: temperatura, humedad; d) Modelo del instrumento y estado de calibración; e) Resultados: contenido de cobalto y desviación; f) Fecha de prueba: como por ejemplo 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

11 Precisión y sesgo

11.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación del contenido de cobalto medida por el mismo operador, el mismo equipo y en un corto período de tiempo es <0,2%.

Reproducibilidad: La desviación del contenido de cobalto medida por diferentes laboratorios y diferentes operadores es <0,5%.

11.2 Sesgo

Error del instrumento: titulador potenciométrico ±0,1 mV.

Inhomogeneidad de la muestra: una desviación de la composición > 0,1 % (m/m) produce una fluctuación del resultado del 0,3-0,5 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Elementos interferentes: El sesgo puede alcanzar 1-2% cuando no se elimina la fase η o el carbono libre.

12 Factores influyentes

12.1 La descomposición incompleta de la muestra (por ejemplo, residuo de tungsteno) puede dar lugar a una subestimación del contenido de cobalto de entre el 0,5 y el 1 %.

12.2 Los elementos interferentes como el hierro (>5%) y el níquel (>2%) pueden interferir con la titulación y requerir una separación previa.

12.3 Concentración de ácido

Una acidez demasiado alta ($\text{pH} < 2$) hace que el punto final de la titulación de EDTA se desplace entre un 0,1 y un 0,3 %.

12.4 Condiciones ambientales

La temperatura alta (>40°C) o la humedad (>70%) provocan que la solución se evapore, con una desviación de <0,2%.

13 Aplicación de los resultados de las pruebas

13.1 El control de calidad

verifica si el contenido de cobalto cumple con los requisitos de diseño, como el objetivo YG6 de $6 \pm 0,2$ %.

13.2 Optimización del proceso

Un contenido bajo de cobalto indica ingredientes insuficientes, mientras que un contenido alto de cobalto indica un exceso de fase aglutinante.

13.3 Predicción de propiedades

Un contenido de cobalto de 6-10% corresponde a una dureza alta (HRA 90-92), 10-15% corresponde a una tenacidad alta ($\text{KIC } 12\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

13.4 Ejemplo

En la producción de brocas para minería, YG8 con un contenido de cobalto del 8,05% garantiza una dureza de HRA 90 y una vida útil de >200 horas.

14 Notas

14.1 El instrumento deberá calibrarse

utilizando una solución estándar de cobalto con un error de $\leq \pm 0,1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14.2 Homogeneidad de la muestra

Asegúrese de que las muestras estén libres de grietas, poros y tengan una composición uniforme.

14.3 La temperatura de la sala de prueba se controla entre 20 y 25 °C y la humedad es <60 %.

14.4 Protección de seguridad

Use gafas protectoras durante el funcionamiento para evitar salpicaduras de ácido.

15 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos del contenido de cobalto

Tabla A.1 Contenido de cobalto de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% m/m)	Dureza (HRA)	Tenacidad (KIC, MPa·m ^{1/2})
YG6	6,0 ± 0,2	90-91	10-12
YG8	8,0 ± 0,2	89-90	12-14
YG10	10,0 ± 0,3	88-89	14-16

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

Titulador potenciométrico ±0,1 mV.

B.2 Error operacional

La desviación del criterio de valoración del punto final de la titulación es del 0,1 al 0,2 %.

B.3 Impacto ambiental

Una humedad > 70% provoca una desviación del 0,2% en los resultados.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar la digestión por microondas para mejorar la eficiencia de descomposición y reducir los residuos de tungsteno.

C.2 Introducir un sistema de titulación automatizado para reducir el error humano. C.3 Utilizar ICP-MS en lugar del método potenciométrico, con un límite de detección de <0,0001 µg/mL.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba del contenido de cobalto en carburo cementado YG8

Muestra N°	Masa(g)	Contenido de cobalto (% m/m)	Valor medio (% m/m)	desviación(%)
YG8-001	0.201	8.05, 8.10	8.08	0.37
YG8-002	0.203	8.00, 8.03	8.02	0,25

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Muestra N°	Masa(g)	Contenido de cobalto (% m/m)	Valor medio (% m/m)	desviación(%)
YG8-003	0.202	8.12, 8.09	8.11	0.37

Apéndice E Impacto de los elementos de interferencia

Tabla E.1 Efectos de diferentes elementos interferentes en la determinación del contenido de cobalto

Elementos interferencia	de Contenido m/m)	(% Desviación m/m)	(% Método de eliminación
hierro	5	0.5	Añadir sal de lantano
níquel	2	0.3	Pre-separación
Tungsteno	10	1.0	digestión por microondas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

Métodos de expresión de la dureza del carburo cementado y su relación de conversión

El metal duro o carburo cementado se utiliza ampliamente en sectores industriales como herramientas de corte y moldes, gracias a su alta dureza y resistencia al desgaste. Su dureza es un indicador clave de rendimiento. El método de expresión de la dureza del carburo cementado incluye principalmente diversas normas y unidades de ensayo, entre las que se encuentran la dureza Vickers (HV), la dureza Rockwell (HRA, HRC) y la dureza Knoop (HK). La elección específica depende de las condiciones de ensayo y las prácticas de la industria. Este artículo presenta en detalle el método de expresión de la dureza, el principio de ensayo, los escenarios de aplicación y la relación de conversión del carburo cementado, combinando datos y normas (como ISO, ASTM y GB/T) para garantizar la precisión y la exhaustividad.

Método para expresar la dureza del carburo cementado

La prueba de dureza del carburo cementado generalmente se lleva a cabo mediante los siguientes métodos, debido a su alta dureza y las características del material compuesto (como el carburo de tungsteno WC y la fase aglutinante de cobalto Co):

1. Dureza Vickers (HV)

Definición: Se aplica una carga específica (por ejemplo, 10 kgf, 30 kgf) a la superficie del material a través de un penetrador de pirámide cuadrangular de diamante (ángulo diagonal de 136°) para medir la longitud diagonal de la sangría y calcular el valor de dureza.

fórmula :

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

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

Unidad : HV (por ejemplo, HV10 significa carga de 10 kgf).

Escenarios aplicables :

Prueba estándar para carburo cementado, ampliamente utilizada en ISO 3878, GB/T 7997 (prueba de dureza Vickers de carburo cementado).

Adecuado para materiales de alta dureza (rango de dureza de carburo 1400-2200 HV) y alta precisión.

Se pueden aplicar diferentes tamaños de grano (como granos ultrafinos <0,5 μm, granos medianos 12 μm).

Valores típicos :

YG6 (6% cobalto): ~15001600 HV30.

YG8 (8% cobalto): ~14001500 HV30.

Carburo cementado de grano ultrafino: ~18002200 HV30 (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventaja :

Aplicable a un amplio rango de dureza (503000 HV).

Pequeña sangría, adecuada para muestras delgadas y pequeñas, alta precisión.

Desventajas : largo tiempo de prueba (se requiere microscopio para medir la indentación) y altos requisitos de acabado de la superficie.

2. Dureza Rockwell (HRA)

Definición : Utilice un penetrador de cono de diamante (ángulo de vértice 120°, radio de la punta 0,2 mm), aplique una carga total de 60 kgf (precarga 10 kgf, carga principal 50 kgf), mida la diferencia de profundidad de sangría y calcule la dureza.

Fórmula :

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Donde h es la profundidad de penetración (mm).

Unidad : HRA.

Escenarios aplicables :

Pruebas rápidas de herramientas y matrices de carburo de acuerdo con ISO 3738 y GB/T 230.1.

Adecuado para carburo cementado con mayor dureza (HRA 8092), comúnmente utilizado en sitios industriales.

Valores típicos :

YG6: ~8990 HRA.

YG8: ~8889 HRA.

Carburo cementado de grano ultrafino: ~9092 HRA (Sandvik, 2023).

Ventaja :

La prueba es rápida y la lectura es directa, adecuada para pruebas por lotes.

Tiene bajos requisitos en la superficie y es fácil de operar.

Defecto :

Menos preciso que la dureza Vickers y solo adecuado para rangos de dureza más altos (HRA > 70).

No apto para muestras ultrafinas o diminutas.

3. Dureza Rockwell (HRC, uso secundario)

Definición : Utilice un penetrador de cono de diamante (igual que HRA) con una carga total de 150 kgf para medir la profundidad de penetración.

Escenarios aplicables :

Se utiliza para grados más blandos de carburo cementado (por ejemplo, alto contenido de cobalto >

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15 %) o en comparación con acero de alta velocidad.

Se utiliza menos en carburo cementado porque el rango HRC (2070) no cubre completamente la alta dureza del carburo cementado (ScienceDirect, 2020).

Valores típicos :

YG15 (15% cobalto): ~6567 HRC.

Ventajas : Se utiliza comúnmente cuando se compara con la dureza del acero para herramientas y del acero para matrices.

Desventajas : alta carga, gran sangría, no adecuado para pruebas convencionales de carburo cementado.

4. Dureza Knoop (HK)

Definición : Utilice un penetrador de diamante en forma de rombo (relación de eje mayor-corto 7:1, ángulos 172,5° y 130°), aplique una carga liviana (como 0,51 kgf) y mida la longitud diagonal larga de la sangría.

fórmula :

$$HK = \frac{14.229 \cdot F}{d^2}$$

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

Unidad : HK.

Escenarios aplicables :

Ensayo de capas delgadas, recubrimientos o estructuras de grano ultrafino de carburo cementado de acuerdo con ASTM E384.

Adecuado para análisis de dureza de superficies o áreas pequeñas (como recubrimiento de carburo).

Valores típicos :

YG6:~16001700 HK0.5.

Carburo cementado de grano ultrafino: ~20002300 HK0.5.

ventaja :

Sangría poco profunda, adecuada para muestras delgadas o recubrimientos.

Alta resolución, adecuado para pruebas de microdureza.

deficiencia :

La prueba es compleja y requiere un microscopio de alta precisión.

Baja carga, susceptible a defectos superficiales.

5. Otros métodos de representación (menos utilizados)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureza Brinell (HB) : utilice un penetrador de bola de carburo con una carga de 3000 kgf, adecuado para carburo de baja dureza (poco frecuente, porque la sangría es demasiado grande).

Dureza Shore (HS) : prueba de dureza de impacto, rara vez se utiliza para carburo cementado debido a su baja precisión.

Dureza de Mohs : el carburo cementado es de aproximadamente 8,59 (cercano al corindón), lo que solo se utiliza para comparaciones científicas y no es preciso.

Soporte de datos :

Rango de dureza de carburo: 14002200 HV, 8092 HRA (ISO 3878, GB/T 7997).

Grados típicos: YG8 (1400-1500 HV, 8889 HRA), grano ultrafino (1800-2200 HV, 9092 HRA) (Sandvik, 2023).

Relación de conversión de unidades de dureza

La prueba de dureza del carburo cementado utiliza diferentes unidades (HV, HRA, HRC, HK), que deben convertirse según la tabla de conversión estándar o una fórmula empírica. A continuación, se presentan las relaciones de conversión y las precauciones a tener en cuenta:

1. Tablas de conversión comunes

La siguiente es una conversión aproximada de valores de dureza comunes de carburo cementado, basada en ASTM E140 (tabla de conversión de dureza), GB/T 1172 (especificación de conversión de dureza) y datos de la industria:

Alto voltaje	HRA	CDH	Hong Kong	Observación
1200	85.0	~60	~1250	Carburo cementado con bajo contenido de cobalto (como YG15)
1400	87.0	~63	~1450	Carburo cementado general (como YG8)
1500	88.0	~65	~1550	Carburo cementado general (como YG6)
1600	89.0	~66	~1650	Carburo cementado de grano medio fino
1800	90.5	~68	~1850	Carburo cementado de grano ultrafino
2000	91.5	~70	~2050	Carburo cementado de alta dureza
2200	92.0	~72	~2250	Carburo de dureza extrema

Fuente de datos :

ASTM E14012b(2023): Tabla de conversión de dureza.

GB/T 11721999: Estándar chino de conversión de dureza.

Práctica industrial: datos de dureza de carburo de Sandvik, Kennametal (Sandvik, 2023).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Fórmula de conversión (fórmula empírica)

Una conversión precisa requiere considerar las propiedades del material. No existe una fórmula unificada para el carburo cementado debido a su estructura compuesta (WC+Co). La siguiente es una fórmula empírica de referencia comúnmente utilizada:

HV y HRA :

$$HRA \approx 100 - \frac{4000}{HV}$$

Ejemplo: HV=1500, HRA $\approx 100 - 4000/1500 \approx 87,3$.

HV y HRC (rango de alta dureza de carburo cementado):

$$HRC \approx 0.035 \cdot HV + 12$$

Ejemplo: HV=1500, HRC $\approx 0,035 \times 1500 + 12 \approx 64,5$.

HV y HK :

$$HK \approx HV \cdot (1.05 \text{ a } 1.10)$$

Ejemplo: HV=1500, HK $\approx 1500 \times 1,07 \approx 1605$.

Aviso :

La fórmula de conversión es aproximada, con un error de $\pm 25\%$ debido a los diferentes tamaños de grano de carburo cementado y al contenido de cobalto.

En el rango de alta dureza (HV > 1500), el error de conversión de HRC es grande, por lo que se recomienda medir HRA o HV directamente.

3. Consideraciones sobre la conversión

Diferencia material

La dureza del carburo cementado se ve afectada por el contenido de cobalto (5-15 %) y el tamaño de grano (0,52 μm). La conversión debe referirse al grado específico (como YG6 o YG8).

Condiciones de prueba :

HV: La carga (1030 kgf) afecta el resultado y debe indicarse (por ejemplo, HV30).

HRA: Adecuado para carburo cementado, HRC está limitado a grados de baja dureza.

HK: Carga baja (0,5 kgf), adecuada para micropruebas.

Referencia estándar : utilice la tabla de conversión ASTM E140 o GB/T 1172 para evitar errores de fórmula empírica.

Se prefiere la medición real : la conversión es solo para referencia, la prueba directa de la unidad de dureza objetivo es más precisa.

Soporte de datos :

YG8: HV30 ≈ 1400 , HRA ≈ 88 , HRC ≈ 63 (GB/T 7997).

Carburo cementado de grano ultrafino: HV30 ≈ 2000 , HRA $\approx 91,5$ (Sandvik, 2023).

Aplicación de la prueba de dureza de carburo cementado

Control de calidad : Las pruebas de dureza verifican el rendimiento de los grados de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cementado, como YG6 (1500 HV, 89 HRA) para mecanizado en bruto y grano ultrafino (2000 HV, 91 HRA) para acabado.

Optimización del proceso : La dureza refleja el efecto de sinterización. Los granos grandes ($>2\ \mu\text{m}$) reducen la dureza, y la fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) reduce la tenacidad (ISO 3326:2013).

Selección de herramientas :

Alta dureza (HV 18002200): adecuado para corte a alta velocidad de materiales duros (acero inoxidable, aleación de titanio).

Dureza media (HV 14001600): adecuada para el procesamiento general (fundición, acero).

En comparación con materiales superduros :

Carburo cementado: 1400-2200 HV, inferior al diamante (8000-10000 HV) y CBN (4500 HV).

El carburo cementado tiene mayor tenacidad que los materiales superduros y es adecuado para cargas de impacto (Wikipedia, 2024).

En conclusión

La dureza del carburo cementado incluye principalmente:

Dureza Vickers (HV) : 1400-2200 HV, alta precisión, adecuada para pruebas estándar (ISO 3878).

Dureza Rockwell (HRA) : 8092 HRA, rápida, comúnmente utilizada en la industria (GB/T 230.1).

Dureza Rockwell (HRC) : 6570 HRC, limitada a grados de dureza baja.

Dureza Knoop (HK) : 1500-2300 HK, adecuada para pruebas de capa fina y micro (ASTM E384).

Relación de conversión :

HV y HRA: $\text{HRA} \approx 100\ 4000/\text{HV}$.

HV y HRC: $\text{HRC} \approx 0,035 \times \text{HV} + 12$ (una dureza elevada produce un gran error).

HV y HK: $\text{HK} \approx \text{HV} \times 1.051.10$.

Se recomienda utilizar las tablas de conversión ASTM E140 y GB/T 1172, y se prefiere la prueba directa de la unidad de destino.

La prueba de dureza del carburo es clave para el control de calidad y la selección de herramientas. Se debe seleccionar el método adecuado según el grado (YG6, YG8), el tamaño del grano y los requisitos de procesamiento. La conversión debe ser cuidadosa y combinarse con la medición real para garantizar la precisión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Un apéndice:

Características, factores influyentes, métodos de prueba, casos de aplicación y medidas de optimización de diversas propiedades del carburo cementado.

Actuación	Características	Factores influyentes	Método de prueba	Casos de aplicación	Medidas de optimización
Dureza	Alta dureza (1400-2200 HV, 8092 HRA), alta resistencia al desgaste, superada solo por materiales superduros (como el diamante 8000 HV). Valores típicos: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), YG8 (1400 HV30, 88 HRA), grano ultrafino (2000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023). Tendencia: La dureza aumenta exponencialmente al disminuir el tamaño del grano.	Tamaño de grano: Grano ultrafino (<0,5 μm), dureza: 1800-2200 HV; grano medio (12 μm), dureza: 1400-1600 HV. Contenido de cobalto: Con un 6 % de cobalto, la dureza se reduce en un 10-15 %; con un 15 % de cobalto, la dureza se reduce en un 10-15 %. Impurezas: La fase η reduce la dureza en un 5-10 %, el carbono libre se reduce en un 35 %. Temperatura de sinterización: >1450 °C; con granos gruesos, la dureza se reduce en un 10 %.	Dureza Vickers (HV30, ISO 3878): Carga de 30 kgf, indentador de pirámide cuadrada de diamante, medición diagonal de la indentación. Dureza Rockwell (HRA, GB/T 230.1): Carga de 60 kgf, indentador de cono de diamante, medición de la profundidad de la indentación. Error: ±2 % (ASTM E18).	La herramienta YG6 (1500 HV) procesa hierro fundido a una velocidad de 150 m/min y tiene una vida útil de 2 horas. La herramienta de grano ultrafino (2000 HV) procesa acero inoxidable a una velocidad de 300 m/min y tiene una vida útil de 3 horas.	Utilizando polvo ultrafino (<0,5 μm), la dureza se incrementa a 2000 HV y la resistencia al desgaste se mejora en un 20 %. Al controlar el contenido de cobalto al 68 %, la dureza se incrementa en un 510 %. La temperatura de sinterización es de 1350-1400 °C, lo que reduce la fase η (GB/T 3849). La adición de TaC (0,51 %) inhibe el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5 %.
Tenacidad	Tenacidad media y resistencia al impacto superior a la de los materiales superduros, inferior a la del acero de alta velocidad, lo que lo hace adecuado para cortes a velocidad media y alta. Valores típicos: YG6 (KIC 8 MPa·m ^{1/2}), YG8 (10 MPa·m ^{1/2}), YG15 (12 MPa·m ^{1/2}) (ScienceDirect, 2020). Tendencia: La tenacidad aumenta linealmente con el contenido de cobalto.	Contenido de cobalto: 6 % de cobalto KIC ~8 MPa·m ^{1/2} , 15 % de cobalto KIC ~12 MPa·m ^{1/2} . Tamaño de grano: 12 μm presenta alta tenacidad, <0,5 μm presenta una disminución del 20 % en la tenacidad. Defectos: Una porosidad > 0,1 % presenta una disminución del 15 % en la tenacidad, y una disminución del 10 % en la fase η. Fase aglutinante: La fase de cobalto irregular reduce la resistencia al impacto en un 10 %.	Tenacidad a la fractura (KIC, ASTM E399): Probeta de viga con entalla de un solo borde (SENB), ensayo de flexión de 3 puntos, medición de la extensión de la grieta. Tenacidad al impacto (GB/T 229): Ensayo de impacto Charpy, cálculo de la absorción de energía. Error: ±5 %.	La matriz YG15 (KIC 12 MPa·m ^{1/2}) estampa placas de acero con una resistencia al impacto de 100.000 impactos. La herramienta YG8 (KIC 10 MPa·m ^{1/2}) procesa acero con mayor resistencia al impacto que la YG6.	Al aumentar el contenido de cobalto al 15 % (como en el caso del YG15), el KIC aumenta a 12 MPa·m ^{1/2} y la resistencia al impacto aumenta un 30 %. Con granos medianos (12 μm), la tenacidad aumenta un 15 %. Mediante sinterización al vacío + HIP, la porosidad se reduce a <0,01 % y la tenacidad aumenta al un 10 %. La adición de Cr ₃ C ₂ (0,5 %) mejora la uniformidad de la fase de cobalto y aumenta la tenacidad un 5 %.
Resistencia a la compresión	Alta resistencia a la compresión (46 GPa), adecuada para cargas de alta presión, superior a la del acero rápido (~2 GPa). Valores típicos: YG6 (5 GPa), YG8 (4,8 GPa), grano ultrafino (6 GPa) (ASTM B406). Tendencia: La resistencia a la compresión aumenta ligeramente al disminuir el tamaño del grano.	Contenido de cobalto: Un 6 % de cobalto presenta una alta resistencia, mientras que un >15 % de cobalto presenta una reducción del 10 % en la resistencia. Tamaño de grano: El grano ultrafino (<0,5 μm) presenta una resistencia de 6 GPa, el grano medio (12 μm) presenta una resistencia de 4,8 GPa. Defectos:	Resistencia a la compresión (GB/T 3851): Probeta cilíndrica, compresión uniaxial, medición de carga máxima. Condiciones de ensayo: temperatura ambiente, velocidad de carga 0,5 mm/min. Error: ±3 %.	La broca minera YG6 (5 GPa) resiste el impacto de rocas a alta presión y tiene una vida útil de 100 horas. La matriz de grano ultrafino (6 GPa) se utiliza para estampado de alta carga y es resistente a la deformación.	Controlar el contenido de cobalto al 68 % y mantener la resistencia a 56 GPa. Utilizar granos ultrafinos (<0,5 μm) para aumentar la resistencia a 6 GPa. Utilizar HIP para reducir la porosidad a <0,01 % y aumentar la resistencia en un 10 %. Controlar el contenido de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Actuación	Características	Factores influyentes	Método de prueba	Casos de aplicación	Medidas de optimización
		Una porosidad >0,1 % presenta una reducción del 15 % en la resistencia, y el carbono libre presenta una reducción del 5 %. Calidad de sinterización: La subcocción (<1350 °C) presenta una adhesión deficiente y una reducción del 10 % en la resistencia.			carbono (±0,1 %) para evitar la formación de carbono libre (GB/T 3849).
Resistencia a la flexión	Resistencia media a la flexión (1,5-2,5 GPa), adecuada para herramientas y moldes que soportan cargas de flexión. Valores típicos: YG6 (2 GPa), YG8 (2,2 GPa), YG15 (2,5 GPa) (ASTM B406). Tendencia: La resistencia a la flexión aumenta con el contenido de cobalto.	Contenido de cobalto: 6 % de cobalto ~2 GPa, 15 % de cobalto ~2,5 GPa. Tamaño de grano: 12 μm presenta alta resistencia, <0,5 μm presenta una ligera reducción de la resistencia en un 5 %. Defectos: La porosidad y la fase η reducen la resistencia en un 10-15 %. Calidad de sinterización: La estructura irregular reduce la resistencia en un 10 %.	Resistencia a la flexión (ASTM B406): Probeta de flexión en 3 puntos, luz de 20 mm, velocidad de carga de 0,5 mm/min. Condiciones de ensayo: temperatura ambiente. Error: ±4 %.	La herramienta YG8 (2,2 GPa) procesa acero con buena resistencia a la flexión y a la fractura. La matriz YG15 (2,5 GPa) estampa piezas de automoción con una vida útil de 120.000 ciclos.	Aumentar el contenido de cobalto al 15 % (como YG15) aumenta la resistencia a 2,5 GPa. Con granos medianos (12 μm), la resistencia aumenta un 10 %. El uso de HIP para reducir la porosidad aumenta la resistencia un 15 %. Añadir Cr ₃ C ₂ (0,51 %) para reforzar la fase de unión aumenta la resistencia un 5 %.
Resistencia a la tracción	La resistencia a la tracción es baja (0,5-1,0 GPa) y el carburo cementado no soporta bien las cargas de tracción. Valores típicos: YG6 (0,7 GPa), YG8 (0,8 GPa), YG15 (1,0 GPa) (ScienceDirect, 2020). Tendencia: La resistencia a la tracción aumenta ligeramente con el contenido de cobalto.	Contenido de cobalto: 6 % de cobalto ~ 0,7 GPa, 15 % de cobalto ~ 1,0 GPa. Tamaño de grano: 12 μm presenta mayor resistencia, <0,5 μm la reduce ligeramente en un 5 %. Defectos: Las grietas y los poros reducen la resistencia en un 20 %. Fase aglutinante: La fase de cobalto irregular reduce la resistencia en un 10 %.	Resistencia a la tracción (GB/T 228.1): Probeta de tracción, tensión axial, medición de la carga de rotura. Condiciones de ensayo: temperatura ambiente, velocidad de 1 mm/min. Error: ±5 %.	La matriz de trefilado YG15 (1,0 GPa) soporta la tensión de tracción y tiene una vida útil de 50.000 ciclos. La herramienta YG8 (0,8 GPa) ofrece mayor resistencia a la fractura por tracción que la YG6 durante el procesamiento.	Aumentar el contenido de cobalto al 15 % aumenta la resistencia a 1,0 GPa. Utilizando granos medianos (12 μm), la resistencia aumenta un 10 %. Optimizando la sinterización al vacío, la tasa de agrietamiento se reduce a <0,1 % y la resistencia aumenta un 15 %. Añadir Ni (35 %) o Cr ₃ C ₂ mejora la tenacidad y aumenta la resistencia un 5 %.
Resistencia al desgaste	Excelente resistencia al desgaste, vida útil 510 veces mayor que la del acero rápido, ideal para corte a alta velocidad. Valores típicos: YG6 (índice de desgaste <0,01 mm ³ /N·m), grano ultrafino (<0,005 mm ³ /N·m) (Sandvik, 2023). Tendencia: La resistencia al desgaste aumenta con el índice de	Dureza: 2000 HV. Resistencia al desgaste superior a 1400 HV (vida útil duplicada). Grano ultrafino (<0,5 μm). Tasa de desgaste reducida a la mitad. Condiciones de funcionamiento: >800 °C o velocidad >500 m/min. Mayor recubrimiento: Sin recubrimiento, la tasa de desgaste es	Prueba de desgaste (ASTM G65): La muela abrasiva desgasta la muestra y mide la pérdida de volumen. Condiciones de prueba: arena seca, carga de 130 N. Error: ±5 %.	Herramienta YG6 (0,01 mm ³ /N·m) para mecanizado de fundición, vida útil de 2 horas. Herramienta de grano ultrafino con recubrimiento de TiN (0,005 mm ³ /N·m) para mecanizado de acero	Utilizando granos ultrafinos (HV 2000+), la tasa de desgaste se reduce a <0,005 mm ³ /N·m. La aplicación de un recubrimiento de TiN/Al ₂ O ₃ (510 μm, CVD/PVD) aumenta la vida útil 23 veces. La optimización de la velocidad de corte (100-300 m/min) reduce el desgaste. La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Actuación	Características	Factores influyentes	Método de prueba	Casos de aplicación	Medidas de optimización
	dureza.	tres veces mayor.		inoxidable, vida útil de 4 horas.	adición de TaC (0,51 %) aumenta la resistencia al desgaste abrasivo en un 10 %.
Resistencia al calor	Buena resistencia térmica (800-1000 °C), superior a la del acero de alta velocidad (500-600 °C), apto para corte a alta temperatura. Valores típicos: YG6 (900 °C), a base de TiC (1000 °C) (ScienceDirect, 2020). Tendencia: La resistencia térmica aumenta con la proporción de TiC.	Contenido de cobalto: >15 %. El cobalto se ablanda a altas temperaturas y la dureza al rojo disminuye un 20 %. Fase dura: El TiC y el TaC presentan una mejor resistencia al calor que el WC (aumenta en 100 °C). Recubrimiento: La resistencia al calor disminuye un 30 % sin recubrimiento. Microestructura: La estructura irregular presenta poca estabilidad a altas temperaturas.	Prueba de dureza roja (GB/T 4340): Calentar la muestra a 800-1000 °C y medir la tasa de retención de dureza. Prueba de choque térmico: Calentar y enfriar ciclicamente para evaluar la presencia de grietas. Error: ±5 %.	Herramienta YG6 (900 °C) para el mecanizado de acero, resistente al desgaste por altas temperaturas. Herramienta con base de TiC y recubrimiento de Al ₂ O ₃ (1000 °C) para el mecanizado de aleaciones de titanio, con una vida útil de 3 horas.	Reducir el contenido de cobalto (<8%) aumenta la dureza en rojo en un 10%. Añadir TiC/TaC (510%) aumenta la resistencia térmica hasta 1000 °C. Aplicar un recubrimiento de Al ₂ O ₃ (58 μm) aumenta el aislamiento térmico en un 20%. Usar una estructura de gradiente (cobalto superficial <5%) aumenta el rendimiento a altas temperaturas en un 15%.
Resistencia a la corrosión	Buena resistencia a la corrosión, a ácidos y álcalis, apto para procesamiento húmedo o entornos químicos. Valores típicos: YG6 (velocidad de corrosión <0,01 mm/año, solución neutra), a base de níquel (<0,005 mm/año) (Wikipedia, 2024). Tendencia: La resistencia a la corrosión aumenta con la proporción de níquel.	Fase de cobalto: La velocidad de corrosión del cobalto se quintuplica en soluciones con pH <4, y el níquel es más resistente a los ácidos. Entorno: La corrosión en soluciones ácidas se intensifica. Microestructura: Una porosidad >0,1 % o la presencia de carbono libre incrementan la corrosión en un 10 %. Recubrimiento: La velocidad de corrosión es dos veces mayor sin recubrimiento.	Prueba de corrosión (ASTM G31): La muestra se sumerge en una solución neutra/ácida (pH 47) y se mide la pérdida de masa. Condiciones de prueba: 25 °C, 30 días. Error: ±3 %.	Herramienta YG6 (0,01 mm/año), refrigerante de corte húmedo, vida útil de 1000 horas. Molde con recubrimiento de níquel y CrN (0,005 mm/año) para entornos ácidos, vida útil de 1 año.	Utilizando un aglutinante a base de níquel (Ni 510%), la velocidad de corrosión se reduce a <0,005 mm/año. Al aplicar un recubrimiento de TiN/CrN (510 μm), la resistencia a la corrosión se duplica. Optimizando la HIP, la porosidad <0,01% y los puntos de corrosión se reducen en un 15%. Controle el contenido de carbono y evite el carbono libre (GB/T 3849).

Notas adicionales

1. Soporte de datos

Dureza: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), grano ultrafino (2000 HV30, 91 HRA) (ISO 3878, GB/T 7997).

Tenacidad: YG6 (8 MPa·m^{1/2}), YG15 (12 MPa·m^{1/2}) (ScienceDirect, 2020).

Resistencia: compresión 46 GPa, flexión 1,5-2,5 GPa (ASTM B406), tracción 0,5-1,0 GPa (ScienceDirect, 2020).

Resistencia al desgaste: la vida útil de la herramienta recubierta aumenta 23 veces (Sandvik, 2023).

Resistencia al calor: Resistencia al calor basada en TiC 1000 °C (ScienceDirect, 2020).

Resistencia a la corrosión: tasa de corrosión a base de níquel <0,005 mm/año (Wikipedia, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Interacción de factores influyentes

Grano y cobalto: Los granos ultrafinos ($<0,5\ \mu\text{m}$) mejoran la dureza y la resistencia a la compresión, el alto contenido de cobalto (1015%) mejora la tenacidad y la resistencia a la flexión/tracción.

Proceso de sinterización: La sinterización al vacío ($1350\text{--}1400\ ^\circ\text{C}$) + HIP reduce la porosidad ($<0,01\ \%$) y mejora todas las propiedades (ISO 3326:2013).

Aditivos: TaC (0,51%) mejora la dureza y la resistencia al desgaste, Cr₃C₂ (0,5%) mejora la tenacidad y la resistencia a la flexión, TiC (510%) mejora la resistencia al calor.

Recubrimiento: TiN/Al₂O₃ ($510\ \mu\text{m}$) mejora la resistencia al desgaste y al calor, CrN mejora la resistencia a la corrosión.

3. Referencia estándar

Dureza: ISO 3878 (HV), GB/T 230.1 (HRA), ASTM E18.

Tenacidad: ASTM E399 (KIC), GB/T 229 (impacto).

Resistencia: GB/T 3851 (compresión), ASTM B406 (flexión), GB/T 228.1 (tracción).

Resistencia a la abrasión: ASTM G65.

Resistencia al calor: GB/T 4340.

Resistencia a la corrosión: ASTM G31.

Imanes de cobalto: GB/T 3849, verificación del contenido de cobalto y el equilibrio de carbono.

En conclusión

Las propiedades del carburo cementado (dureza, tenacidad, resistencia a la compresión, flexión y tracción, resistencia al desgaste, resistencia al calor, resistencia a la corrosión) están determinadas por el tamaño del grano, el contenido de cobalto, los aditivos, el proceso de sinterización y el recubrimiento:

Dureza: Grano ultrafino + bajo contenido de cobalto (6%) hasta 2000 HV, resistencia al desgaste aumentada en un 20%.

Tenacidad: Alto contenido de cobalto (15%) + grano medio, KIC hasta $12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, resistencia al impacto aumentada en un 30%.

Resistencia a la compresión: El grano ultrafino + HIP alcanza los 6 GPa, un aumento del 10%.

Resistencia a la flexión: El alto contenido de cobalto + HIP alcanza los 2,5 GPa, un aumento del 25%.

Resistencia a la tracción: El alto contenido de cobalto + Ni alcanza 1,0 GPa, un aumento del 30%.

Resistencia al desgaste: Grano ultrafino + recubrimiento de TiN, tasa de desgaste $<0,005\ \text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$, vida útil aumentada 23 veces.

Resistencia al calor: TiC / TaC + bajo cobalto, resistencia al calor 1000°C , aumento del 20%.

Resistencia a la corrosión: Recubrimiento a base de níquel + CrN, tasa de corrosión $<0,005\ \text{mm/año}$, aumentada 2 veces.

Al controlar con precisión el tamaño del grano, el contenido de cobalto, los parámetros de sinterización y el recubrimiento, combinado con pruebas estándar (como GB/T 3849), se puede optimizar el rendimiento del carburo cementado para cumplir con los requisitos de aplicación de herramientas, moldes, minería, etc.

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


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Un apéndice:

Relación entre dureza y resistencia del carburo cementado

El metal duro o carburo cementado se utiliza ampliamente en herramientas de corte, moldes y otros campos debido a su alta dureza y resistencia adecuada. La dureza y la resistencia son dos propiedades clave del carburo cementado, pero existe una interacción compleja entre ambas, afectada por la microestructura (como el tamaño del grano y el contenido de cobalto), la composición y el proceso de fabricación. Este artículo analiza en detalle la relación entre la dureza y la resistencia del carburo cementado, incluyendo su definición, factores influyentes, tendencias de la relación, datos cuantitativos, métodos de ensayo y aplicaciones prácticas, en combinación con normas (como ISO, ASTM, GB/T) y datos del sector para garantizar un contenido preciso y completo.

1. Definición de dureza y resistencia

Definición de dureza del carburo cementado

La dureza del carburo cementado indica su capacidad para resistir la deformación plástica local o los rayones, y generalmente refleja su resistencia al desgaste y al desgaste abrasivo.

Método de medición:

Dureza Vickers (HV): ISO 3878, carga de 30 kgf, penetrador de pirámide cuadrada de diamante, medición diagonal de sangría (unidad: HV30).

Dureza Rockwell (HRA): GB/T 230.1, carga de 60 kgf, penetrador de cono de diamante, medición de la profundidad de indentación (unidad: HRA).

Valores típicos: YG6 (1500 HV30, 89 HRA), YG8 (1400 HV30, 88 HRA), grano ultrafino (2000 HV30, 91 HRA) (Sandvik, 2023).

Definición de resistencia del carburo cementado

La resistencia del carburo cementado se refiere a su capacidad para resistir daños causados por fuerzas externas, incluida la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y la resistencia a la tracción.

Método de medición:

Resistencia a la compresión: GB/T 3851, compresión uniaxial de probetas cilíndricas, medición de la carga máxima (unidad: GPa).

Resistencia a la flexión: ASTM B406, probeta de flexión de 3 puntos, medición de la carga de rotura (unidad: GPa).

Resistencia a la tracción: GB/T 228.1, probeta de ensayo de tracción axial, medición de carga de rotura (unidad: GPa).

Valores típicos:

Resistencia a la compresión: YG6 (5 GPa), YG8 (4,8 GPa), grano ultrafino (6 GPa) (ASTM B406).

Resistencia a la flexión: YG6 (2 GPa), YG8 (2,2 GPa), YG15 (2,5 GPa) (ASTM B406).

Resistencia a la tracción: YG6 (0,7 GPa), YG8 (0,8 GPa), YG15 (1,0 GPa) (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

2. Relación entre dureza y resistencia

La dureza y la resistencia del carburo cementado no son una simple relación lineal, sino un equilibrio complejo, que se manifiesta principalmente en:

Dureza y resistencia a la compresión: Generalmente existe una correlación positiva. Los carburos cementados de alta dureza (como los de grano ultrafino) también presentan una alta resistencia a la compresión debido a la alta proporción de fase dura (WC) y a la finura de los granos.

Dureza y resistencia a la flexión/tracción: Suelen tener una correlación negativa o débil. Una dureza elevada (como un bajo contenido de cobalto o granos ultrafinos) suele ir acompañada de una tenacidad reducida, lo que resulta en una menor resistencia a la flexión y a la tracción.

Factores clave de influencia: El tamaño del grano, el contenido de cobalto y la microestructura (poros, fase η) regulan conjuntamente el equilibrio entre dureza y resistencia.

Cuantificación de las tendencias en las relaciones

Mayor dureza (por ejemplo, de 1400 HV a 2000 HV):

Resistencia a la compresión: aumentada en un 1020% (por ejemplo, de 4,8 GPa a 6 GPa).

Resistencia a la flexión: Puede disminuir entre un 5 y un 15 % (por ejemplo, de 2,2 GPa a 1,8 GPa).

Resistencia a la tracción: disminución del 1020% (por ejemplo, de 0,8 GPa a 0,6 GPa).

Razón: Los carburos cementados con alta dureza (como granos ultrafinos $<0,5 \mu\text{m}$, bajo contenido de cobalto 6%) tienen una alta proporción de fase dura, una fuerte unión entre los granos y una resistencia a la compresión mejorada; pero el bajo contenido de cobalto y los granos finos reducen la tenacidad y debilitan la resistencia a la flexión/tracción.

Datos que respaldan la relación entre dureza y resistencia del carburo cementado

Marca	Dureza (HV30)	Resistencia a la compresión (GPa)	Resistencia a la flexión (GPa)	Resistencia a la tracción (GPa)
YG6	1500	5.0	2.0	0.7
YG8	1400	4.8	2.2	0.8
YG15	1300	4.5	2.5	1.0
Grano ultrafino	2000	6.0	1.8	0.6

Fuente: Sandvik (2023), ScienceDirect (2020), ASTM B406.

3. Principales factores que afectan la relación entre dureza y resistencia

Tamaño del grano

Influencia:

Granos ultrafinos ($<0,5 \mu\text{m}$): alta dureza (1800-2200 HV), alta resistencia a la compresión (6 GPa), pero baja resistencia a la flexión/tracción (1,8 GPa/0,6 GPa), debido a una tenacidad reducida.

Cristal medio ($12 \mu\text{m}$): dureza media (1400-1600 HV), alta resistencia a la flexión/tracción (2,2-2,5 GPa / 0,8-1,0 GPa) y buena tenacidad.

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: El tamaño del grano disminuye, la dureza y la resistencia a la compresión aumentan, la resistencia a la flexión/tracción disminuye.

Cuantificación: El tamaño del grano se reduce de 2 μm a 0,5 μm , la dureza aumenta un 2030%, la resistencia a la compresión aumenta un 10% y la resistencia a la flexión disminuye un 10%.

Contenido de cobalto

Influencia:

Bajo contenido de cobalto (6%): alta dureza (1500-2000 HV), alta resistencia a la compresión (56 GPa), pero baja resistencia a la flexión/tracción (2 GPa/0,7 GPa) debido a la pequeña cantidad de fase de cobalto y poca tenacidad.

Alto contenido de cobalto (15%): baja dureza (1300 HV), alta resistencia a la flexión/tracción (2,5 GPa/1,0 GPa), debido a que la fase de cobalto mejora la tenacidad.

Tendencia: A medida que aumenta el contenido de cobalto, la dureza y la resistencia a la compresión disminuyen, mientras que la resistencia a la flexión/tracción aumenta.

Cuantificación: Cuando el cobalto aumenta del 6% al 15%, la dureza disminuye en un 1015%, la resistencia a la compresión disminuye en un 10% y la resistencia a la flexión aumenta en un 20%.

Microestructura

Porosidad: Una porosidad $> 0,1\%$ reduce la resistencia a la compresión en un 15% y la resistencia a la flexión/tracción en un 20%, con un pequeño efecto en la dureza ($<5\%$).

Fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$): formada por una cantidad insuficiente de carbono, lo que reduce la dureza en un 510%, la resistencia a la compresión en un 10% y la resistencia a la flexión/tracción en un 15%.

Carbono libre: la precipitación excesiva de carbono reduce la dureza en un 35%, la resistencia a la compresión en un 5% y la resistencia a la flexión/tracción en un 10%.

Cuantificación: Eliminación de porosidad (prensado isostático en caliente HIP), resistencia a la flexión aumentada en un 15%, resistencia a la tracción aumentada en un 20%.

Proceso de sinterización

Influencia:

Sobrecalentamiento a alta temperatura ($>1450\text{ }^\circ\text{C}$): granos gruesos, dureza reducida en un 10 %, resistencia a la compresión reducida en un 5 %, resistencia a la flexión/tracción reducida en un 10 %.

Cocido insuficientemente ($<1350\text{ }^\circ\text{C}$): mala adhesión, dureza reducida en un 5 %, resistencia a la compresión/flexión/tracción reducida en un 1015 %.

HIP: Elimina la porosidad, aumenta la resistencia a la compresión en un 10% y aumenta la resistencia a la flexión/tracción en un 15%.

Tendencia: Optimizar la temperatura de sinterización (1350-1400 $^\circ\text{C}$) y el HIP mejora la resistencia con menor impacto en la dureza.

Aditivo

TaC, TiC: aumenta la dureza en un 510%, la resistencia a la compresión en un 5%, pero disminuye ligeramente la resistencia a la flexión/tracción en un 5% (debido a la tenacidad reducida).

Cr₃C₂: Mejora la fuerza de unión del cobalto, aumenta la resistencia a la flexión/tracción en un 510%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y tiene poco efecto en la dureza.

Cuantificación: Agregar 0,5% de TaC aumenta la dureza en un 5%, la resistencia a la compresión en un 5% y la resistencia a la flexión en un 3%.

Soporte de datos: ISO 3326:2013 (prueba magnética de cobalto, detección de la fase η), ASTM B406 (resistencia a la flexión), ScienceDirect (2020).

4. Métodos y normas de prueba

Prueba de dureza:

Dureza Vickers (HV30): ISO 3878, carga de 30 kgf, error ± 2 %. Apto para todo el rango de dureza del carburo cementado (1400-2200 HV).

Dureza Rockwell (HRA): GB/T 230.1, carga de 60 kgf, error ± 1 %. Apto para pruebas rápidas (HRA 8092).

Prueba de fuerza:

Resistencia a la compresión: GB/T 3851, probeta cilíndrica (5 mm de diámetro), error ± 3 %. Mide la capacidad de carga a alta presión.

Resistencia a la flexión: ASTM B406, flexión en 3 puntos (muestra de $5 \times 5 \times 25$ mm), error ± 4 %. Evaluación de la resistencia a la fractura por flexión.

Resistencia a la tracción: GB/T 228.1, probeta de ensayo de tracción (5 mm de diámetro), error ± 5 %. Medición de la capacidad de rotura por tracción.

Análisis de microestructura: ISO 4499, microscopio metalográfico para detectar tamaño de grano, poros, fase η y ayudar en la evaluación de dureza y resistencia.

5. Aplicación práctica de la relación entre dureza y resistencia.

cuchillos

Alta dureza, baja resistencia: el carburo cementado de grano ultrafino (2000 HV, resistencia a la flexión de 1,8 GPa) se utiliza para el corte a alta velocidad de acero inoxidable (velocidad 300 m/min), con una fuerte resistencia al desgaste, pero fácil de astillar.

Dureza media, alta resistencia: YG8 (1400 HV, resistencia a la flexión de 2,2 GPa) se utiliza para mecanizar acero, tiene una fuerte resistencia a la flexión, es adecuado para cortes de velocidad media (150 m/min) y tiene una vida útil de 23 horas.

Caso: Las herramientas de corte de grano ultrafino tienen alta dureza y pueden procesar acero de 50 HRC, lo que aumenta su vida útil en un 20 %. Sin embargo, su resistencia a la flexión es baja, por lo que es necesario optimizar el ángulo de corte.

Moho

Alta dureza y alta resistencia a la compresión: Los moldes de grano ultrafino (2000 HV, resistencia a la compresión de 6 GPa) se utilizan para estampación de alta carga y son resistentes a la deformación, pero tienen baja resistencia a la tracción (0,6 GPa) y no son adecuados para moldes de estiramiento.

Alta resistencia, dureza media: YG15 (1300 HV, resistencia a la flexión de 2,5 GPa) se utiliza para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estampar piezas de automóviles, es resistente a la fractura por impacto y tiene una vida útil de 120.000 veces.

Caso: El molde YG15 tiene una alta resistencia a la flexión, la placa de acero de estampado no tiene grietas, la dureza es moderada y la resistencia al desgaste cumple con los requisitos.

Herramientas de minería

Dureza y resistencia equilibradas: YG6 (1500 HV, resistencia a la compresión de 5 GPa, resistencia a la flexión de 2 GPa) se utiliza en brocas para soportar el impacto de rocas a alta presión y tiene una vida útil de 100 horas.

Caso: La dureza de la broca de grano ultrafino aumentó a 2000 HV y la resistencia a la compresión fue de 6 GPa, pero la resistencia a la flexión cayó a 1,8 GPa y se requirió optimización para reducir la tensión de flexión.

6. Medidas para optimizar la relación entre dureza y resistencia

Optimización del tamaño de grano:

Grano ultrafino ($<0,5 \mu\text{m}$): dureza aumentada a 2000 HV, resistencia a la compresión aumentada a 6 GPa, adecuado para herramientas con alta resistencia al desgaste.

Cristal medio ($12 \mu\text{m}$): la resistencia a la flexión/tracción aumenta a 2,5 GPa/1,0 GPa, adecuado para moldes.

Implementación: Seleccione polvo WC de alta pureza y controle el tiempo de molienda de bolas (20-30 horas).

Regulación del contenido de cobalto:

Bajo contenido de cobalto (6%): dureza 1500-2000 HV, resistencia a la compresión 56 GPa, adecuado para corte a alta velocidad.

Alto contenido de cobalto (15%): resistencia a la flexión/tracción 2,5 GPa / 1,0 GPa, adecuado para matrices de estampación.

Implementación: Mezcle con precisión el polvo de cobalto ($\pm 0,1 \%$) y verifique con la prueba magnética de cobalto (GB/T 3849).

Mejora del proceso de sinterización:

Sinterización al vacío ($1350-1400^\circ\text{C}$): controla el crecimiento del grano y aumenta la dureza en un 5%.

Prensado isostático en caliente (HIP, 1350°C , 100 MPa): porosidad reducida a $<0,01 \%$, resistencia a la flexión/tracción aumentada en un 15 %.

Implementación: Se utiliza un equipo HIP con un tiempo de sinterización de 12 horas.

Optimización aditiva:

TaC (0,51%): dureza aumentada en un 5%, resistencia a la compresión aumentada en un 5%, adecuado para herramientas resistentes al desgaste.

Cr3C2 (0,5%): Resistencia a la flexión/tracción aumentada en un 510%, adecuado para moldes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Implementación: El aditivo se dispersa uniformemente y el tamaño de partícula se controla a $<1\ \mu\text{m}$.

Tecnología de recubrimiento:

Recubrimiento de TiN/Al₂O₃ (510 μm , CVD/PVD): la dureza aumentó un 10%, la resistencia al desgaste aumentó 23 veces y la resistencia se vio ligeramente afectada.

Implementación: Controlar el espesor del recubrimiento ($\pm 1\ \mu\text{m}$) para evitar su desprendimiento.

Efecto:

Grano ultrafino + bajo contenido de cobalto + HIP: dureza 2000 HV, resistencia a la compresión 6 GPa, vida útil de la herramienta aumentada en un 20%.

Cristal medio + alto contenido de cobalto + Cr₃C₂: resistencia a la flexión 2,5 GPa, resistencia a la tracción 1,0 GPa, vida útil del molde aumentada en un 30%.

En conclusión

La relación entre la dureza y la resistencia del carburo cementado es compleja:

Correlación positiva: la dureza y la resistencia a la compresión suelen estar correlacionadas positivamente, y los carburos cementados de grano ultrafino y con bajo contenido de cobalto tienen una dureza elevada (2000 HV) y una resistencia a la compresión (6 GPa).

Correlación negativa: la dureza está correlacionada negativamente con la resistencia a la flexión/tracción, y una dureza alta (2000 HV) está acompañada de una disminución en la resistencia a la flexión/tracción (1,8 GPa/0,6 GPa).

Factores clave: tamaño de grano (0,52 μm), contenido de cobalto (615%), microestructura y proceso de sinterización determinan el equilibrio.

Estrategia de optimización: A través de granos ultrafinos, control del contenido de cobalto, HIP, aditivos y recubrimientos, se puede encontrar el mejor equilibrio entre alta dureza (2000 HV) y alta resistencia (resistencia a la flexión 2,5 GPa) para satisfacer las necesidades de herramientas de corte, moldes y herramientas de minería.

Soporte de datos:

Dureza: 1500-2000 HV (ISO 3878, GB/T 7997).

Resistencia: Compresión 46 GPa, flexión 1,5-2,5 GPa, tracción 0,5-1,0 GPa (ASTM B406, ScienceDirect, 2020).

Normas: ISO 3326:2013, GB/T 3849 (prueba magnética de cobalto), ISO 4499 (microestructura).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

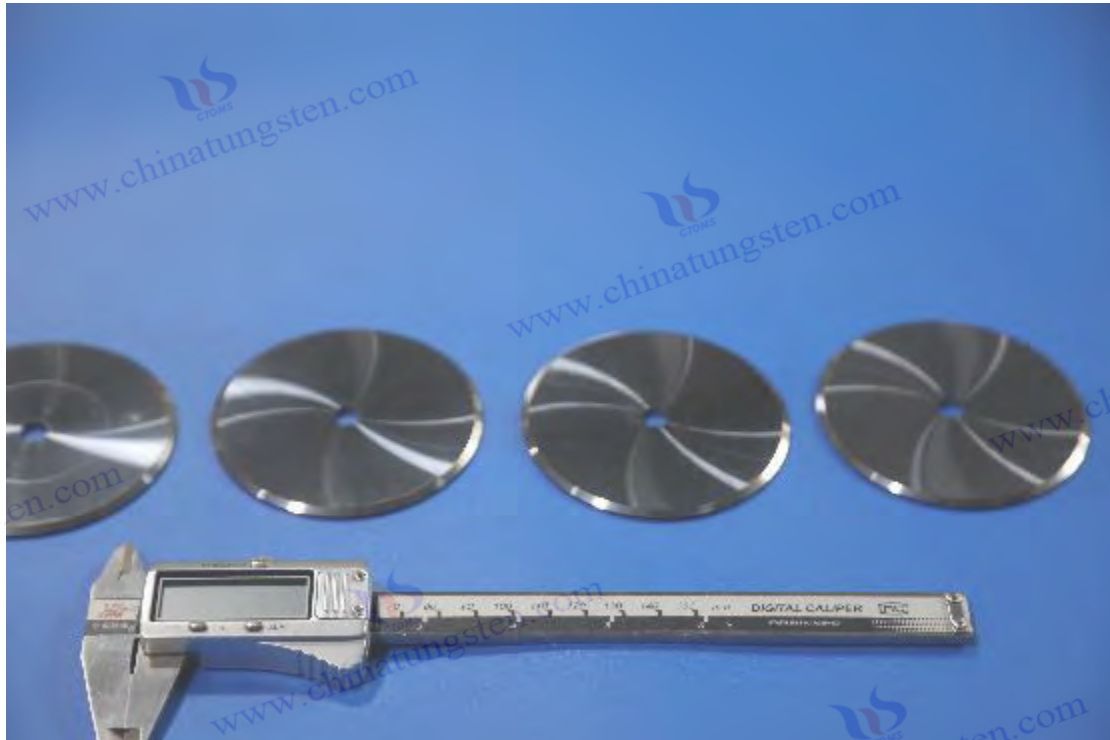
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

¿Cómo se prueban las diferentes propiedades del carburo cementado?

¿Qué pruebas de rendimiento requieren el uso de varillas de prueba?

El metal duro o carburo cementado se usa ampliamente en herramientas de corte, moldes y herramientas de minería por su alta dureza (1400-2200 HV), resistencia al desgaste y resistencia a la flexión (1,5-2,5 GPa). Para garantizar que su rendimiento satisfaga las necesidades industriales, se requieren diversas pruebas, que incluyen dureza, densidad, resistencia a la flexión, tenacidad, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión, microestructura y composición química. Estas pruebas generalmente siguen estándares internacionales o nacionales (como GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406), y algunas pruebas requieren el uso de barras de prueba estándar (barras de prueba) para garantizar la consistencia y la comparabilidad de los resultados. Este artículo detallará los métodos para probar varias propiedades del carburo cementado, el equipo requerido, si se requieren barras de prueba y los requisitos específicos para las barras de prueba, combinados con las últimas investigaciones (como Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020; Wikipedia, 2024), todo en chino, para garantizar que el contenido sea preciso, completo y fascinante.

1. Descripción general

El objetivo de las pruebas de rendimiento del carburo cementado es cuantificar sus propiedades mecánicas, físicas y químicas para garantizar que el material cumpla con los requisitos específicos de la aplicación (como una vida útil de corte de la herramienta superior a 2 horas y un número de golpes de matriz superior a 100 000). Los elementos de prueba incluyen:

Propiedades mecánicas : dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura.

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 físicas : densidad, propiedades magnéticas.

Propiedades químicas : resistencia a la corrosión, composición química.

Microestructura : tamaño de grano, defectos (como fase η , carbono libre).

Rendimiento en uso : resistencia al desgaste, adhesión del revestimiento.

Algunas pruebas (como la resistencia a la flexión y la tenacidad a la fractura) requieren el uso de barras de prueba estándar, ya que sus dimensiones geométricas y las condiciones de la superficie afectan directamente la precisión de la prueba. Las barras de prueba deben cumplir estrictos requisitos de tamaño, rugosidad superficial y preparación para eliminar la interferencia de variables. A continuación, se detallan los métodos de prueba, las barras de prueba requeridas y sus requisitos.

2. Método de prueba de rendimiento del carburo cementado

A continuación se detallan los métodos, equipos y estándares y si se requieren varillas de prueba para pruebas de rendimiento comunes de carburo cementado.

2.1 Prueba de dureza

Definición : Una medida de la resistencia a la indentación del carburo cementado, generalmente expresada en dureza Vickers (HV), que varía de 1400 a 2200 HV.

Método de prueba :

Dureza Vickers (HV) :

Utilice un probador de dureza Vickers y aplique una carga de 1030 kgf (como HV30).

El penetrador es una pirámide cuadrangular de diamante con un ángulo en el vértice de 136° .

Después de la sangría, mida la longitud diagonal (μm) y conviértala en valor de dureza (GB/T 7997).

Paso :

La superficie de la muestra se pulió ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) para eliminar la capa de óxido.

Aplicar una carga de 1030 kgf y mantener durante 1015 segundos.

La diagonal de sangría se midió con un microscopio y se calculó el HV (error $< \pm 50$ HV).

Equipamiento : Probador de dureza Vickers (tipo Wilson VH3100), precisión $\pm 0,5\%$.

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

La prueba de dureza se puede realizar en productos terminados (como herramientas, moldes) o en cualquier muestra pulida con requisitos de tamaño pequeño ($> 5 \times 5 \text{ mm}$).

Resultados de ejemplo :

YG6: HV30 ~1500 HV.

Carburo cementado de grano ultrafino: HV30 ~2000 HV (Sandvik, 2023).

Norma : GB/T 7997 (dureza Vickers), ISO 6507, ASTM E92.

2.2 Prueba de densidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Definición : Mide la relación masa-volumen del carburo cementado, reflejando la porosidad y la uniformidad de la composición, variando de 14,0 a 15,0 g/cm³.

Método de prueba :

Método de Arquímedes :

Utilice una balanza electrónica de alta precisión (precisión $\pm 0,001$ g) y agua desionizada.

Mida el peso seco de la muestra (m1) y el peso en agua (m2), y calcule la densidad $\rho = m1 / (m1 - m2) \times \text{agua}$.

Paso :

Las muestras fueron lavadas (etanol) y secadas (80°C, 30 min).

Se midió el peso seco y el peso en agua 3 veces y se tomó el valor promedio.

Corregido por efectos de temperatura del agua (agua $\sim 1,0$ g/cm³ a 20°C).

Equipamiento : Balanza de precisión (tipo Mettler Toledo XS205), accesorios para pruebas de densidad.

¿Se requiere una varilla de prueba ? : No.

Las pruebas de densidad no exigen ninguna forma de muestra. Se aceptan bloques, láminas o productos terminados (masa > 1 g).

Resultados de ejemplo :

YG6 (6% Co): 14,9 g/cm³.

YG15 (15 % Co): 14,0 g/cm³ (ScienceDirect, 2020).

Norma : GB/T 3850 (densidad), ISO 3369, ASTM B311.

2.3 Resistencia a la flexión (resistencia a la rotura transversal, TRS)

Definición : Mide la resistencia a la flexión del carburo cementado, que varía de 1,5 a 2,5 GPa, reflejando tenacidad y defectos.

Método de prueba :

Prueba de flexión de tres puntos :

Utilizando una máquina de prueba universal, aplique carga hasta que la muestra se rompa.

Fórmula: $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F es la carga de rotura (N), L es la distancia de apoyo (mm), b y h son el ancho y la altura de la barra de prueba (mm).

Paso :

Prepare barras de prueba estándar (ver a continuación) y pule la superficie ($Ra < 0,4 \mu m$).

La distancia de apoyo es de 30 mm y la velocidad de carga es de 0,51 mm/min.

Registre la carga de rotura y calcule la resistencia a la flexión (error $\leq \pm 5\%$).

Equipo : Máquina de ensayos universal (como Instron 5982), precisión $\pm 0,1$ kN.

¿Es necesaria una tira de prueba ? : Sí.

Las pruebas de resistencia a la flexión requieren barras de prueba estándar para garantizar la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

consistencia geométrica y eliminar la concentración de tensión.

Resultados de ejemplo :

YG6: ~2,0 GPa .

YG15: ~2,5 GPa (Sandvik, 2023).

Norma : GB/T 3851 (resistencia a la flexión), ISO 3327, ASTM B406.

2.4 Tenacidad a la fractura (KIC)

Definición : Medida de la resistencia del carburo cementado al crecimiento de grietas, en el rango de $812 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Método de prueba :

Método de viga con entalla de un solo borde (SENB) :

Se realizó una entalladura (profundidad 0,2-0,3 mm) en la barra de prueba y se aplicó una carga de flexión de tres puntos.

Fórmula: $KIC = (F\sqrt{a}) / (BW^{3/2}) \times Y$, F es la carga de fractura, a es la profundidad de la entalla, B y W son el ancho y la altura de la barra de prueba, e Y es el factor geométrico.

Paso :

Prepare barras de prueba estándar con muescas cortadas con láser o EDM.

La distancia de apoyo es de 30 mm y la velocidad de carga es de 0,10,5 mm/min.

Se midieron la carga de fractura y la profundidad de la entalla y se calculó el KIC (error $< \pm 10\%$).

Equipamiento : máquina de ensayos universal, microscopio (medición de muescas, precisión $\pm 0,01$ mm).

¿Es necesaria una tira de prueba ? : Sí .

La prueba de tenacidad a la fractura requiere una barra de prueba estándar para garantizar la consistencia de la entalla y una distribución uniforme de la tensión.

Resultados de ejemplo :

YG6: KIC ~8 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

YG15: KIC ~12 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (ScienceDirect, 2020).

Normas : ISO 28079 (tenacidad a la fractura), ASTM E399.

2.5 Prueba de resistencia al desgaste

Definición : Mide la resistencia al desgaste del carburo cementado y refleja su vida útil.

Método de prueba :

Prueba de abrasión (ASTM B611) :

con una muela abrasiva (Al_2O_3 , tamaño de partícula 60100 μm) y se registró la pérdida de masa (mg).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones: carga 1020 N, velocidad 200300 rpm, tiempo 3060 min.

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

La muestra (pin) se frota contra un disco giratorio (acero o cerámica) y se mide el volumen de desgaste (mm^3).

Paso :

Las muestras fueron pulidas ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) y limpiadas (etanol).

Establezca la carga, la velocidad y el tiempo y registre la pérdida de masa/volumen.

Calcular la tasa de desgaste (error $< \pm 5\%$).

Equipo : Máquina de prueba de abrasión (como Taber Abraser), probador de desgaste de pasador sobre disco.

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

La prueba de resistencia a la abrasión se puede realizar utilizando bloques o muestras terminadas ($> 10 \times 10 \text{ mm}$), pero la condición de la superficie debe ser uniforme.

Resultados de ejemplo :

YG6: Tasa de desgaste $\sim 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

YN10 (a base de níquel): tasa de desgaste $\sim 0,008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ (Wikipedia, 2024).

Normas : ASTM B611 (abrasión), ASTM G99 (pasador sobre disco), GB/T 12444.

2.6 Prueba de resistencia a la corrosión

Definición : Medida de la resistencia del carburo cementado a la corrosión química, con una tasa de corrosión de $< 0,01 \text{ mm/año}$.

Método de prueba :

Prueba de inmersión (ASTM G31) :

Las muestras se sumergieron en un medio corrosivo (por ejemplo, 5% HCl, pH 47) a 60°C durante 168 horas.

Se midió la pérdida de masa (mg) y se calculó la tasa de corrosión (mm/año).

Pruebas electroquímicas :

Utilizando una estación de trabajo electroquímica, se midieron el potencial de corrosión (V) y la densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

Paso :

Las muestras fueron pulidas ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$) y limpiadas (agua desionizada).

Pruebas de inmersión o electroquímicas, registro de pérdida de masa o parámetros electroquímicos.

Calcular la tasa de corrosión (error $< \pm 10\%$).

Equipamiento : Caja de temperatura constante, estación de trabajo electroquímica (como Gamry Interface 1010).

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

La prueba de resistencia a la corrosión se puede realizar en muestras de cualquier forma ($> 10 \times 10$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm) y la superficie debe estar pulida.

Resultados de ejemplo :

YG6 (a base de cobalto): tasa de corrosión ~0,01 mm/año.

YN10 (a base de níquel): tasa de corrosión <0,005 mm/año (Wikipedia, 2024).

Normas : ASTM G31 (inmersión), ASTM G59 (electroquímica), GB/T 4334.

2.7 Análisis de microestructura

Definición : Verificar el tamaño de grano (0,52 μm), la composición de las fases (WC, Co, fase η , carbono libre) y los defectos.

Método de prueba :

Microscopio óptico/SEM :

Las muestras fueron pulidas ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$) y grabadas químicamente (reactivo de Murakami, 510 s).

Observe el tamaño del grano, la distribución de fases y los defectos (poros, fase η).

Difracción de rayos X (DRX) :

Detecta la composición de la fase (como WC, Co, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) con una sensibilidad del 0,1 %.

TEM :

Analizar la estructura de la interfaz (energía de enlace $\text{WCCo} \sim 2 \text{ J/m}^2$) con una resolución de <1 nm.

Paso :

Pulido, grabado y limpieza de muestras.

La observación al microscopio o el escaneo XRD se pueden utilizar para analizar cuantitativamente el tamaño del grano y los defectos.

Interfaz de análisis TEM (opcional).

Equipo : SEM (como Zeiss Sigma 500), XRD (como Bruker D8), TEM (como FEI Talos F200X).

¿Se requiere una varilla de prueba ? : No.

El análisis microestructural se puede realizar utilizando muestras pequeñas ($>5 \times 5 \text{ mm}$), que requieren pulido y grabado.

Resultados de ejemplo :

YG6: tamaño de grano $\sim 1 \mu\text{m}$, fase $\eta < 1\%$.

Grano ultrafino: tamaño de grano $< 0,5 \mu\text{m}$, uniformidad $> 95\%$ (ScienceDirect, 2020).

Normas : ISO 4499 (microestructura), ASTM E112 (tamaño de grano).

2.8 Análisis de la composición química

Definición : Detecta contenido de carbono ($\sim 6,13 \%$ en peso), contenido de cobalto (615 %) y otros elementos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método de prueba :

Analizador de carbono y azufre: quema muestras, mide el contenido de CO₂ y detecta el carbono total (precisión $\pm 0,01\%$).

ICPMS : Disuelve la muestra y detecta elementos como W, Co, Cr (precisión $\pm 0,001\%$).

Prueba magnética de cobalto (GB/T 3849) :

Se mide la intensidad de magnetización de la fase de cobalto y se infiere indirectamente el contenido de carbono (error $\pm 0,05\%$).

paso :

Las muestras fueron trituradas ($<100\ \mu\text{m}$) y limpiadas.

Análisis de carbono y azufre o detección ICPMS, registra el contenido del elemento.

La prueba magnética de cobalto verifica el equilibrio de carbono.

Equipo : Analizador de carbono y azufre (como LECO CS844), ICPMS (como Agilent 7900).

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

Análisis de composición química utilizando polvo o pequeños trozos de muestras ($>0,1\ \text{g}$).

Resultados de ejemplo :

YG6: Carbono $\sim 6,13\%$ en peso, cobalto 6% en peso.

YN10: Níquel 10% en peso, carbono $\sim 6,1\%$ en peso (Sandvik, 2023).

Norma : GB/T 3849 (imán de cobalto), ISO 11876 (composición química), ASTM E1479.

2.9 Prueba de adhesión del recubrimiento

Definición : Mide la resistencia de unión entre un recubrimiento (como TiN, CrN) y un sustrato de carburo cementado, $>50\ \text{N}$.

Método de prueba :

Prueba de rayado (ASTM C1624) :

Utilizando un comprobador de rayaduras, se rayó un penetrador de diamante (radio $200\ \mu\text{m}$) a lo largo de la superficie del recubrimiento.

Se registró la carga crítica (L_c, N), donde $L_c > 50\ \text{N}$ indica una buena adhesión.

paso :

Las muestras fueron pulidas ($R_a < 0,2\ \mu\text{m}$) y limpiadas.

Se aplicó una carga creciente ($0100\ \text{N}$) y la longitud de rayado fue de $5\ \text{mm}$.

Observe las rayaduras bajo un microscopio y determine L_c (error $< \pm 5\ \text{N}$).

Equipamiento : comprobador de rayaduras (p. ej. Anton Paar RST³).

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

La prueba de adhesión del recubrimiento utiliza una muestra de recubrimiento ($>10 \times 10\ \text{mm}$) con una superficie plana.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados de ejemplo :

YG6+TiN: Lc ~60 N.

YN10+CrN: Lc ~70 N (Sandvik, 2023).

Normas : ASTM C1624 (rayado), ISO 20502.

2.10 Prueba de propiedades magnéticas

Definición : Mide la magnetización de la fase de cobalto, estimando indirectamente el contenido de carbono y la composición de la fase.

Método de prueba :

Prueba magnética de cobalto (GB/T 3849) :

La magnetización de la muestra (emu/g) se midió utilizando un magnetómetro.

Una magnetización baja indica la fase η y una magnetización alta indica carbono libre.

paso :

Las muestras fueron lavadas (etanol) y secadas.

La medición del magnetómetro se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio.

Compárese con la curva estándar e infiera el contenido de carbono (error $\pm 0,05\%$).

Equipo : Magnetómetro (como Lakeshore 7404).

¿Se requiere una varilla de prueba ?: No.

Las propiedades magnéticas se probaron utilizando muestras pequeñas ($>5 \times 5$ mm).

Resultados de ejemplo :

YG6: magnetización ~150 emu/g, carbono equilibrado.

Muestra descarburada: intensidad de magnetización ~120 emu/g (ScienceDirect, 2020).

Norma : GB/T 3849 (imán de cobalto), ISO 3326.

3. Pruebas que requieren una tira reactiva

Las siguientes pruebas requieren el uso de barras de prueba estándar porque tienen requisitos estrictos sobre la geometría de la muestra y el estado de la superficie:

Resistencia a la flexión (TRS) :

Se requieren barras de prueba para garantizar una distribución uniforme de la tensión y eliminar las desviaciones dimensionales.

Dimensiones de la barra de prueba: normalmente $5,0 \times 5,0 \times 35,0$ mm (ISO 3327).

Tenacidad a la fractura (KIC) :

Es necesario realizar una entalladura previa en la varilla de prueba para garantizar que la propagación de grietas sea controlable.

Dimensiones de la barra de prueba: típicamente $4,0 \times 8,0 \times 32,0$ mm, profundidad de muesca 0,20,3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm (ISO 28079).

Otras pruebas (dureza, densidad, resistencia al desgaste, etc.) no requieren barras de prueba y pueden utilizar productos terminados o muestras de cualquier forma, lo que reduce los costos de preparación.

4. Requisitos para las varillas de prueba de carburo

La preparación de la varilla de prueba afecta directamente la precisión de la prueba y debe cumplir con estrictos requisitos de tamaño, superficie y preparación. A continuación, se detallan las especificaciones:

4.1 Requisitos de tamaño

Barra de prueba de resistencia a la flexión (ISO 3327, GB/T 3851) :

Dimensiones : $5,0 \pm 0,1$ mm (ancho) $\times$ $5,0 \pm 0,1$ mm (alto) $\times$ $35,0 \pm 0,5$ mm (largo).

Tolerancia : ancho y alto $\pm 0,1$ mm, largo $\pm 0,5$ mm, paralelismo $< 0,05$ mm.

Bordes : Chaflán de 0,20,3 mm (45°) para evitar concentración de tensiones.

Barra de prueba de tenacidad a la fractura (ISO 28079) :

Dimensiones : $4,0 \pm 0,1$ mm (ancho) $\times$ $8,0 \pm 0,1$ mm (alto) $\times$ $32,0 \pm 0,5$ mm (largo).

Muesca : profundidad 0,20,3 mm, ancho $< 0,1$ mm (EDM o corte láser).

Tolerancia : ancho y alto $\pm 0,1$ mm, profundidad de muesca $\pm 0,02$ mm.

Otros requisitos :

No hay grietas, poros ni inclusiones en la superficie de la varilla de prueba, y los defectos visibles a simple vista son inferiores a 0,1 mm.

Consistencia dimensional: desviación del lote $< 0,05$ mm.

4.2 Requisitos de la superficie

Rugosidad de la superficie :

Ra $< 0,4$ μ m (resistencia a la flexión), Ra $< 0,2$ μ m (tenacidad a la fractura).

Aplicación : Rectificado con muela de diamante (grano de 510 μ m), pulido (pasta de diamante, 13 μ m).

Tratamiento de superficie :

Eliminar la capa de tensión de procesamiento (< 10 μ m) y evitar microfisuras.

Lavar (sonicación con etanol, 5 min) y secar (80°C , 30 min).

examinar :

La observación al microscopio (aumento 50x) no mostró arañazos, quemaduras ni tensiones residuales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3 Requisitos de preparación

Materias primas y sinterización :

Utilice la misma fórmula que el producto terminado (por ejemplo, YG6, YG15) para garantizar un rendimiento constante.

Sinterización al vacío (1350-1450 °C, $<10^{-3}$ Pa) o HIP (1350 °C, 100 MPa), porosidad $<0,01$ % (ISO 3326:2013).

El contenido de carbono se controla a $\pm 0,1\%$ para evitar la fase η o el carbono libre (GB/T 3849).

Procesando :

Corte por alambre o rectificado de precisión, error $\leq \pm 0,05$ mm.

Preparación de entalla (tenacidad a la fractura): EDM (corriente < 1 A) o láser (potencia < 10 W).

Control de lotes :

Se inspeccionan aleatoriamente el 10 % (>5 piezas) de las barras de prueba de cada lote, y la desviación de tamaño es $<0,05$ mm y la desviación de rendimiento es <5 %.

Registrar los parámetros de sinterización (temperatura ± 5 °C, atmósfera $<0,01$ % de oxígeno).

4.4 Verificación de calidad

Detección de dimensión :

Utilice un micrómetro digital o un medidor de distancia láser con una precisión de $\pm 0,01$ mm.

Verificar paralelismo y rectitud ($<0,05$ mm).

Microestructura :

Examen SEM de poros, fase η , carbono libre, proporción $<1\%$ (ISO 4499).

Uniformidad del tamaño de grano $>95\%$, típico $0,52 \mu\text{m}$.

Verificación del rendimiento :

Dureza (HV30): Error $\leq \pm 50$ HV.

Densidad: Error $\leq \pm 0,01$ g/ cm^3 .

Prueba magnética de cobalto: error de contenido de carbono $\leq \pm 0,05\%$.

4.5 Almacenamiento y transporte

almacenamiento :

Humedad $<40\%$, temperatura 20 ± 5 °C, evitar oxidación o absorción de humedad.

Embalaje a prueba de polvo (caja de plástico) para evitar rayones en la superficie.

transporte :

Embalaje a prueba de golpes (almohadillas de espuma) para evitar daños en los bordes.

Viene con informe de prueba (dimensiones, dureza, microestructura).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Soporte de datos :

Tolerancia de dimensión de la barra de prueba: $\leq \pm 0,1$ mm (ISO 3327).

Rugosidad superficial: $R_a < 0,4$ μm , desviación de rendimiento < 5 % (Sandvik, 2023).

HIP: porosidad $< 0,01\%$, resistencia aumentada en un 15% (ScienceDirect, 2020).

5. Casos prácticos de aplicación

Prueba de la herramienta YG6 :

Ensayos : dureza (HV30, 1500 HV), resistencia a la flexión (2,0 GPa), resistencia al desgaste ($0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

Barra de prueba : barra de prueba de resistencia a la flexión ($5 \times 5 \times 35$ mm), $R_a < 0,4$ μm .

Resultado : La vida útil del corte en hierro fundido es de 2 horas y el rendimiento es aceptable.

Prueba de molde YG15 :

Ensayos : tenacidad a la fractura ($\text{KIC } 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), densidad ($14,0 \text{ g/cm}^3$), resistencia a la corrosión ($0,01 \text{ mm/año}$).

Barra de prueba : barra de prueba de tenacidad a la fractura ($4 \times 8 \times 32$ mm, muesca de $0,25$ mm).

Resultado : La vida útil del estampado es de 120.000 veces, lo que cumple con el estándar.

Prueba de moho YN10 :

Pruebas : Resistencia a la corrosión ($< 0,005 \text{ mm/año}$), adhesión del recubrimiento ($L_c 70 \text{ N}$), microestructura (granos ~ 1 μm).

Varilla de prueba : Ninguna, la prueba se realizó utilizando una muestra pulida (10×10 mm).

Resultado : La vida útil en ambiente ácido es de 1 año y el rendimiento es excelente.

Prueba de herramientas de grano ultrafino :

Pruebas : dureza (2000 HV), resistencia a la flexión (2,2 GPa), tamaño de grano ($< 0,5$ μm).

Barra de ensayo : barra de ensayo de resistencia a la flexión ($5 \times 5 \times 35$ mm).

Resultado : la vida útil de corte del acero inoxidable es de 4 horas y la ventaja del grano ultrafino es obvia.

Soporte de datos :

YG6: dureza 1500 HV, resistencia a la flexión 2,0 GPa (Sandvik, 2023).

YN10: Tasa de corrosión $< 0,005 \text{ mm/año}$ (Wikipedia, 2024).

Granos ultrafinos: granos $< 0,5$ μm , $\text{KIC} \sim 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (ScienceDirect, 2020).

6. Conclusión

Las pruebas de rendimiento del carburo incluyen dureza (durómetro Vickers HV30), densidad (método de Arquímedes), resistencia a la flexión (flexión en tres puntos), tenacidad a la fractura (SENB), resistencia al desgaste (desgaste/pin-on-disc), resistencia a la corrosión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(inmersión/electroquímica), microestructura (SEM/DRX/TEM), composición química (análisis carbono-azufre/ICPMS), adhesión del recubrimiento (rayado) y propiedades magnéticas (ensayo magnético de cobalto). Entre ellas, **la resistencia a la flexión y la tenacidad a la fractura** requieren barras de ensayo estándar, mientras que otras pruebas pueden utilizar productos terminados o muestras pulidas.

Requisitos de la varilla de prueba :

Dimensiones : resistencia a la flexión (5×5×35 mm, tolerancia ±0,1 mm), tenacidad a la fractura (4×8×32 mm, entalladura 0,20,3 mm).

Superficie : Ra <0,4 μm (resistencia a la flexión), Ra <0,2 μm (tenacidad), sin grietas/poros.

Preparación : sinterización al vacío/HIP, porosidad <0,01%, contenido de carbono ±0,1%.

Verificación : desviación dimensional <0,05 mm, desviación de rendimiento <5%.

La prueba cumple con las normas GB/T 3849, ISO 4499, ASTM B406 y otras para garantizar la precisión y la consistencia. Optimizar la preparación de las barras de prueba (como HIP, rectificado de precisión) y los procesos de prueba (como la monitorización en línea) puede mejorar la fiabilidad de los resultados, con un error <5 %. En el futuro, las pruebas automatizadas y el análisis inteligente mejorarán aún más la eficiencia y la precisión.

estándar :

GB/T 7997: Dureza Vickers.

GB/T 3851: Resistencia a la flexión.

GB/T 3849: Prueba magnética de cobalto.

ISO 3327: Barras de ensayo de resistencia a la flexión.

ISO 28079: Tenacidad a la fractura.

ISO 4499: Microestructura.

ASTM B406: Resistencia a la flexión.

ASTM G31: Resistencia a la corrosión.

ASTM C1624: Adhesión de recubrimientos.

ISO 3326:2013: Porosidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

Especificaciones, requisitos de rendimiento y preparación de barras de prueba de carburo cementado

Las barras de prueba de carburo son muestras clave para probar propiedades como la resistencia transversal (TRS) y la tenacidad a la fractura (KIC), y su proceso de preparación debe cumplir con estrictas especificaciones y requisitos de rendimiento. Para **las barras de prueba nanométricas** (tamaño de grano $<0,5\ \mu\text{m}$), **la optimización de grado específico** (como YG6, YG15, grados de grano ultrafino) y las **barras de prueba no estándar** (tamaño o forma personalizados), el proceso debe refinarse aún más para abordar las características de los nanopulvos, los requisitos de rendimiento específicos del grado y los desafíos del procesamiento de geometría no estándar. Este artículo profundizará en los detalles del proceso de preparación de barras de prueba nanométricas, la optimización de grado específico y las barras de prueba no estándar, combinando mecanismos microscópicos, las últimas investigaciones (como Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020; Wikipedia, 2024) y estándares de la industria (como GB/T 3851, ISO 3327, ISO 28079), todo en chino, para garantizar que el contenido sea preciso, detallado y fascinante.

1. Descripción general

Las barras de prueba de carburo se utilizan para pruebas de resistencia a la flexión (1,5-2,5 GPa) y tenacidad a la fractura ($812\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), con tamaños estándar de $5\times5\times35\ \text{mm}$ (flexión) o $4\times8\times32\ \text{mm}$ (tenacidad, entalla de 0,2-0,3 mm). **Las barras de prueba nanométricas** son para carburo cementado de grano ultrafino (granos $<0,5\ \mu\text{m}$), y es necesario controlar el crecimiento del grano y los defectos (como la fase η y el carbono libre); **la optimización de grados específicos** debe coincidir con los requisitos de rendimiento de YG6 (herramienta general), YG15 (molde de alta tenacidad) o grados de grano ultrafino (como YG8N); **las barras de prueba no estándar** deben personalizarse en tamaño o forma para adaptarse a pruebas especiales o escenarios de aplicación. El proceso de preparación incluye la dosificación, la mezcla, el prensado, la sinterización, el procesamiento y la verificación, los cuales deben controlarse con precisión para garantizar la consistencia del rendimiento de la barra de prueba (desviación $<5\%$). A continuación, se dividirá en tres partes para un refinamiento a fondo.

2. Preparación de nanobarras

Las nanobarras de prueba están hechas de carburo cementado de grano ultrafino (tamaño de grano $<0,5\ \mu\text{m}$, dureza 1800-2200 HV), ampliamente utilizadas en herramientas de alta precisión (como el mecanizado aeronáutico) y sustratos de recubrimiento resistentes al desgaste. La preparación de nanopulvos requiere resolver los problemas de alta actividad, fácil aglomeración y crecimiento de grano.

2.1 Ingredientes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

materia prima :

Polvo WC : tamaño de grano 0,10,4 μm (pureza >99,95%), contenido de carbono 6,13 $\pm$ 0,05 % en peso, contenido de oxígeno <0,03 %.

Polvo de cobalto : tamaño de partícula 0,51 μm (pureza > 99,9 %), contenido 610 % en peso (como YG8N).

Inhibidores de grano : Cr₃C₂ (0,51 % en peso), VC (0,20,5 % en peso), que inhiben el crecimiento del grano en un 2030 %.

Negro de carbón : <0,05 % en peso, balance de carbono ajustado con precisión (error <0,01 %).

Relación :

Pesaje preciso ($\pm$ 0,0005 g), error <0,005%.

Control del contenido de carbono: $\pm$ 0,03%, evitando la fase η (Co₃W₃C) o carbono libre.

Equipamiento : balanza de alta precisión (Mettler Toledo XPR6), caja de guantes en atmósfera inerte (O₂ < 0,01%).

Ejemplo : YG8N (8 % Co): WC 91,5 % en peso, Co 8 % en peso, Cr₃C₂ 0,4 % en peso, VC 0,1 % en peso (Sandvik, 2023).

2.2 Mezcla

Proceso :

Molienda húmeda : molino de bolas planetario de alta energía (1620 h, 0,2 μm), el medio es etanol anhidro (contenido sólido 6570%).

Aglutinante : PEG modificado (11,5%, carbono residual <0,03%) o nanoaglutinante a base de agua (0,51%) para evitar la aglomeración.

Dispersante : Ácido esteárico (0,10,3%), mejora la uniformidad de las partículas en un 15%.

Parámetros : relación bola-material 10:1, velocidad de agitación 800-1200 rpm, temperatura <30°C (evitar la oxidación).

Objetivo :

Uniformidad de partículas >98%, D₅₀ 30100 μm , tasa de aglomeración <1%.

Viscosidad de la suspensión 150-250 mPa·s, fluidez <20 s/50 g (GB/T 1482).

Equipo : molino de bolas de alta energía (Retsch PM400), dispersor ultrasónico (potencia 500 W).

Ejemplo : YG8N: 1 % PEG, molido en molino de bolas durante 18 horas, D₅₀ ~50 μm , homogeneidad >98 % (ScienceDirect, 2020).

2.3 Supresión

Proceso :

Secado por atomización : Preparación de partículas esféricas (esfericidad >0,95), D₅₀ 30100 μm , fluidez <20 s/50 g.

Prensado isostático en frío (CIP) : presión 250-350 MPa, densidad de la pieza >55% densidad teórica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Molde : Molde de acero de tungsteno de alta precisión, tolerancia dimensional $\pm 0,02$ mm, teniendo en cuenta la contracción por sinterización (2225%).

Dimensiones : barra de prueba de flexión en blanco $\sim 6,3 \times 6,3 \times 44$ mm, barra de prueba de tenacidad $\sim 5,0 \times 10,0 \times 40$ mm.

Objetivo :

Resistencia en verde > 6 MPa, sin grietas/delaminación.

La uniformidad del blanco es $> 95\%$ y la desviación de densidad es $< 1\%$.

Equipamiento : torre de secado por atomización (GEA Niro), prensa isostática en frío (EPSI CIP400).

Ejemplo : YG8N: CIP 300 MPa, resistencia verde ~ 7 MPa, contracción 23%.

2.4 Sinterización

Proceso :

Sinterización al vacío :

Temperatura: 1320 1380°C ($\pm 3^{\circ}\text{C}$), inferior a lo normal (1350 1450°C), reduciendo el crecimiento del grano en un 20%.

Grado de vacío: $< 5 \times 10^{-4}$ Pa, oxígeno $< 0,005\%$, evitar la descarburación.

Calentamiento por etapas: 250 350°C (eliminación de aglutinante, carbono residual $< 0,03\%$), 1320°C (sinterización en fase líquida, tiempo de mantenimiento 45-60 minutos).

Prensado isostático en caliente (HIP) :

1320°C , 120 150 MPa, 30 min.

Eliminar la porosidad, porosidad $< 0,005\%$ (ISO 4505).

Control de atmósfera : $\text{CO}/\text{CO}_2 < 0,05\%$, caudal de H_2 0,30,5 L/min (cuando sea necesario).

Objetivo :

Tamaño de grano: $< 0,5 \mu\text{m}$, uniformidad $> 98\%$.

Densidad: $14,515,0 \text{ g/cm}^3$, dureza 1800 2200 HV , fase η /carbono libre $< 0,5\%$.

Equipo : Horno de sinterización al vacío (ALD Vacuum Technologies), equipo HIP (Quintus QIH122).

Ejemplo : YG8N: sinterización al vacío a 1350°C + HIP, tamaño de grano $\sim 0,4 \mu\text{m}$, dureza 2000 HV (Sandvik, 2023).

2.5 Procesamiento

Proceso :

Mecanizado basto : corte con hilo (error $\leq \pm 0,05$ mm), eliminación de piel sinterizada ($0,10,3$ mm).

Acabado : Rectificado de diamante de ultraprecisión (tamaño de grano $35 \mu\text{m}$), error $\leq \pm 0,02$ mm.

Pulido : Pasta de nanodiamante ($0,51 \mu\text{m}$), $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ (resistencia a la flexión), $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ (tenacidad).

Muesca (barra de prueba de tenacidad) :

Corte por láser de femtosegundo: potencia $< 5 \text{ W}$, profundidad $0,20,3 \text{ mm}$ ($\pm 0,01 \text{ mm}$), ancho $< 0,05$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm.

Evite la zona afectada por el calor ($<1\text{ }\mu\text{m}$) y no se encontraron microgrietas mediante inspección SEM.

Chafilán : Pulido, $0,20,3\text{ mm}$ ($45^\circ \pm 3^\circ$).

Objetivo :

La tolerancia dimensional es de $\pm 0,05\text{ mm}$ y no hay capa de tensión en la superficie ($<5\text{ }\mu\text{m}$).

Precisión de muesca $\pm 0,01\text{ mm}$, desviación de extensión de grieta $<3\%$.

Equipamiento : Amoladora de ultraprecisión (Moore Nanotech 350FG), láser femtosegundo (Coherent Monaco), SEM (Zeiss Gemini 500).

Ejemplo : YG8N: $R_a < 0,2\text{ }\mu\text{m}$, muesca $0,25 \pm 0,005\text{ mm}$, sin daño térmico.

2.6 Verificación de calidad

Dimensiones : Medidor de distancia láser (precisión $\pm 0,005\text{ mm}$), tolerancia $\pm 0,05\text{ mm}$, paralelismo $< 0,03\text{ mm}$.

Superficie : interferometría de luz blanca ($R_a < 0,2\text{ }\mu\text{m}$), SEM (profundidad de muesca $\pm 0,01\text{ mm}$, sin grietas).

Microestructura :

TEM (tamaño de grano $0,30,5\text{ }\mu\text{m}$, homogeneidad $>98\%$).

XRD (fase η /carbono libre $<0,5\%$, sensibilidad $0,05\%$).

Porosidad: $<0,005\%$ (ISO 4499).

actuación :

Dureza: 18002200 HV ($\pm 30\text{ HV}$, GB/T 7997).

Densidad: $14,515,0\text{ g/cm}^3$ ($\pm 0,005\text{ g/cm}^3$, GB/T 3850).

Resistencia a la flexión: $2,02,5\text{ GPa}$ ($\pm 3\%$, GB/T 3851).

Tenacidad a la fractura: $810\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ($\pm 5\%$, ISO 28079).

Prueba magnética de cobalto: contenido de carbono $\pm 0,03\%$ (GB/T 3849).

Inspección aleatoria : $>15\%$ (>10 piezas) por lote, desviación de rendimiento $<3\%$.

Equipamiento : TEM (FEI Talos F200X), interferómetro de luz blanca (Zygo NewView 9000), durómetro Vickers (Wilson VH3300).

Ejemplo : YG8N: dureza $2000 \pm 20\text{ HV}$, tamaño de grano $0,4\text{ }\mu\text{m}$, fase $\eta < 0,3\%$ (ScienceDirect, 2020).

2.7 Desafíos y optimización

desafío :

Los nanopolvos son fáciles de aglomerar y la desviación de uniformidad es $>5\%$.

Una alta actividad conduce a la oxidación (aumento de oxígeno del $0,02\%$) y un aumento del 10% en el riesgo de decarbonización.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los granos sinterizados crecen más ($>0,5\ \mu\text{m}$) y la dureza disminuye entre un 5 y un 10%.

optimización :

Dispersión ultrasónica : 500 W, 10 min, la tasa de aglomeración se redujo a $<0,5\%$.

Protección inerte: atmósfera de Ar ($\text{O}_2 < 0,005\%$) durante todo el proceso de mezcla/lote.

Sinterización a baja temperatura + inhibidor : 1320°C , Cr₃C₂+VC, control de grano $<0,5\ \mu\text{m}$.

Monitorización en línea : medición de temperatura por infrarrojos ($\pm 1^\circ\text{C}$), espectrómetro de masas ($\text{CO}/\text{CO}_2 < 0,01\%$).

Efecto :

Uniformidad aumentada en un 20%, desviación de grano $<5\%$.

La fase η /carbono libre produce un aumento del 5% en la dureza (Sandvik, 2023).

3. Optimización de grado específico

Los diferentes grados de carburo cementado (como YG6, YG15 y YG8N de grano ultrafino) presentan diferentes contenidos de cobalto, tamaños de grano y escenarios de aplicación, por lo que es necesario optimizar el proceso de preparación de las varillas de prueba para cumplir con los requisitos de rendimiento. A continuación, se presentan las soluciones de optimización para tres grados típicos.

3.1 YG6 (herramienta de uso general, 6 % Co)

Objetivos de rendimiento :

Dureza: $1500 \pm 50\ \text{HV}$.

Resistencia a la flexión: $2,0 \pm 0,1\ \text{GPa}$.

Tenacidad a la fractura: $8 \pm 0,5\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Grano: $11,5\ \mu\text{m}$, fase η /carbono libre $<1\%$.

Densidad: $14,9 \pm 0,01\ \text{g}/\text{cm}^3$.

Ingredientes :

WC: 94 % en peso ($12\ \mu\text{m}$), Co: 6 % en peso, Cr₃C₂: 0,3 % en peso (opcional).

Contenido de carbono: $6,13 \pm 0,05\%$ en peso, error $<0,01\%$.

Mezclando :

Molienda húmeda: 1214 h, PEG 1,5%, D50 80150 μm .

Medio etanol, contenido sólido 70%, fluidez $<25\ \text{s}/50\ \text{g}$.

suprimir :

CIP: 200250 MPa, intensidad verde $>5\ \text{MPa}$.

En blanco: $6,2 \times 6,2 \times 43\ \text{mm}$ (resistencia a la flexión), tasa de contracción del 20%.

sinterización :

Sinterización al vacío: 1400°C ($\pm 5^\circ\text{C}$), mantener durante 1 hora, $<10^{-3}\ \text{Pa}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HIP: 1400°C, 100 MPa, porosidad <0,01%.

Procesando :

Rectificado: Muela de diamante (510 μm), Ra <0,4 μm .

Muesca: Chispa eléctrica (0,25 $\pm$ 0,02 mm), Ra <0,2 μm .

verificar :

Dimensiones: $\pm$ 0,05 mm, dureza 1500 $\pm$ 30 HV.

SEM: tamaño de grano $\sim$ 1,2 μm , fase η <1%.

Imán de cobalto: contenido de carbono $\pm$ 0,05%.

Ejemplo : barra de prueba YG6: resistencia a la flexión 2,0 GPa, dureza 1500 HV, vida útil de corte 2 horas (Sandvik, 2023).

3.2 YG15 (molde de alta tenacidad, 15 % Co)

Objetivos de rendimiento :

Dureza: 1400 $\pm$ 50 HV.

Resistencia a la flexión: 2,5 $\pm$ 0,1 GPa.

Tenacidad a la fractura: 12 $\pm$ 0,5 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$.

Grano: 1,52 μm , fase η /carbono libre <1%.

Densidad: 14,0 $\pm$ 0,01 g/cm³.

Ingredientes :

WC: 85 % en peso (1,52,5 μm), Co: 15 % en peso, Cr₃C₂: 0,5 % en peso.

Contenido de carbono: 6,13 $\pm$ 0,05 % en peso, negro de carbono <0,1 % en peso.

Mezclando :

Molienda húmeda: 1416 h, PVA 1%, D50 100200 μm .

Etanol/agua (1:1), contenido sólido 75%, fluidez <28 s/50 g.

suprimir :

CIP: 250300 MPa, intensidad verde>8 MPa.

En blanco: 5,0 $\times$ 10,0 $\times$ 40 mm (tenacidad), tasa de contracción 18%.

sinterización :

Sinterización al vacío: 1450 °C ($\pm$ 5 °C), mantener durante 1,5 horas, <10⁻³ Pa.

HIP: 1450°C, 120 MPa, porosidad <0,01%.

Procesando :

Rectificado: Ra < 0,2 μm , entalla de chispa (0,25 $\pm$ 0,01 mm).

Chaflán: 0,3 mm, pulido Ra <0,1 μm .

verificar :

Dimensiones: $\pm$ 0,05 mm, dureza 1400 $\pm$ 30 HV.

SEM: tamaño de grano $\sim$ 1,8 μm , tamaño de poro <0,01%.

Imán de cobalto: contenido de carbono $\pm$ 0,05%.

Ejemplo : barra de prueba YG15: KIC 12 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$, vida útil de estampado 120.000 veces (ScienceDirect, 2020).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3 Grano ultrafino YG8N (herramienta de aviación, 8 % Co)

Objetivos de rendimiento :

Dureza: 2000 ± 50 HV.

Resistencia a la flexión: $2,2 \pm 0,1$ GPa.

Tenacidad a la fractura: $9 \pm 0,5$ MPa·m^{1/2}.

Grano: $<0,5$ μm, fase η/carbono libre $<0,5\%$.

Densidad: $14,7 \pm 0,01$ g/cm³.

Ingredientes :

WC: 91,5 % en peso (0,20,4 μm), Co: 8 % en peso, Cr3C2: 0,4 % en peso, VC: 0,1 % en peso.

Contenido de carbono: $6,13 \pm 0,03$ % en peso, error $<0,005$ %.

Mezclando :

Molienda de bolas de alta energía: 1820 h, PEG modificado 1%, D50 30100 μm.

Etanol anhidro, contenido sólido 65%, dispersión ultrasónica (500 W, 10 min).

Suprimir :

Cip: 300350 mpa, intensidad verde >7 mpa.

En blanco: $6,3 \times 6,3 \times 44$ mm, tasa de contracción del 23%.

Sinterización :

Sinterización al vacío: 1350 °C (± 3 °C), mantener durante 45 min, $<5 \times 10^{-4}$ pa.

Cadera: 1350°C , 150 mpa, porosidad $<0,005\%$.

Procesando :

Rectificado de ultraprecisión: $ra < 0,2$ μm, muesca láser de femtosegundo ($0,25 \pm 0,005$ mm).

Pulido: $ra < 0,1$ μm, sin zona afectada por el calor.

Verificar :

Dimensiones: $\pm 0,02$ mm, dureza 2000 ± 20 hv.

Tem: tamaño de grano $\sim 0,4$ μm, homogeneidad $>98\%$.

Imán de cobalto: contenido de carbono $\pm 0,03\%$.

Ejemplo : barra de prueba yg8n: dureza 2000 hv, vida útil de corte del acero inoxidable 4 horas (Sandvik, 2023).

3.4 Estrategia de optimización

YG6 :

Puntos clave: Equilibrio costo-rendimiento, aglutinante PEG (bajo residuo de carbono $<0,05\%$), sinterización a 1400°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Efecto: Reducción de costos del 15%, desviación de resistencia a la flexión <3%.

Año 15 :

Puntos clave: Alta tenacidad, aglutinante de PVA (resistencia en verde >8 MPa), HIP 1450 °C.

Efecto: KIC aumentó en un 10%, la resistencia al crecimiento de grietas aumentó en un 15%.

YG8N :

Puntos clave: Control de grano (<0,5 µm), inhibidor de Cr3C2+VC, sinterización a baja temperatura (1350°C).

Efecto: dureza aumentada en un 5%, desviación de grano <5%.

Soporte de datos :

YG6: resistencia a la flexión 2,0 GPa, reducción de costos 15% (Sandvik, 2023).

YG15: KIC 12 MPa·m^{1/2}, vida útil aumentada en un 20 % (ScienceDirect, 2020).

YG8N: tamaño de grano 0,4 µm, dureza 2000 HV (Wikipedia, 2024).

4. Preparación de barras de prueba no estándar

Las barras de prueba no estándar se refieren a barras de prueba cuyo tamaño, forma o entalladura difieren de la norma (como ISO 3327 e ISO 28079) y se utilizan para pruebas especiales (como microherramientas y moldes complejos) o para investigación y desarrollo. La preparación debe considerar tanto los requisitos de personalización como la consistencia del rendimiento.

4.1 Escenarios de aplicación

Micro varilla de prueba :

Dimensiones: p. ej. 2×2×20 mm (prueba de microherramienta).

Aplicación: Para probar la resistencia a la flexión de piezas pequeñas de carburo, como herramientas dentales.

Varilla de prueba de gran tamaño :

Tamaño: p. ej. 8×8×50 mm (herramienta de minería).

Aplicación: Para probar la tenacidad de moldes grandes o herramientas de perforación de rocas.

Formas complejas :

Forma: sección transversal cilíndrica (5 mm de diámetro, 30 mm de longitud) o trapezoidal.

Aplicación: Para simular las propiedades mecánicas de piezas de trabajo reales (como matrices de trefilado de alambre).

Brecha no estándar :

Muesca: En forma de V, en forma de U o múltiples muescas (profundidad 0,10,5 mm).

Aplicación: Para estudiar el crecimiento de grietas o el comportamiento ante la fatiga.

4.2 Requisitos de especificación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tamaño :

Tolerancia: $\pm 0,05$ mm (micro), $\pm 0,1$ mm (grande).

Paralelismo: $< 0,03$ mm, perpendicularidad: $< 0,05$ mm.

Tamaño personalizado: según los requisitos de prueba (como distancia de soporte 1540 mm).

Superficie :

Ra $< 0,2$ μ m (micro/muesca), ra $< 0,4$ μ m (macro).

Sin microfisuras/capas de tensión (< 5 μ m), examen microscopia electrónica (100 $\times$).

Brecha :

Profundidad: 0,10,5 mm ($\pm 0,01$ mm).

Ancho: $< 0,05$ mm (micro), $< 0,1$ mm (regular).

Forma: en V (60°), en U (radio 0,1 mm) o personalizada.

Apariencia :

Sin poros/inclusiones, defectos $< 0,05$ mm (micro), $< 0,1$ mm (macro).

Chaflán: 0,10,5 mm (dependiendo del tamaño).

4.3 Proceso de preparación

Ingredientes :

Compatible con barras de prueba estándar, grados coincidentes (como YG6, YG8N).

Microvarilla de prueba: nanopolvo (0,20,4 μ m), error de carbono $< 0,03\%$.

Barra de prueba de gran tamaño: granos gruesos (23 μ m), cobalto 1015 % en peso.

Mezclando :

Micro: molienda de bolas de alta energía (20 h), D50 2050 μ m, dispersión ultrasónica.

Gran tamaño: molienda de bolas convencional (12 horas), D50 100200 μ m, PVA 12%.

Equipo: molino de bolas de alta energía (Retsch PM400), dispositivo ultrasónico (500 W).

Suprimir :

Micro: Moldeo de precisión (500 mpa), tolerancia del molde $\pm 0,01$ mm.

Gran tamaño: CIP (200300 mpa), uniformidad de palanquilla $> 95\%$.

Formas personalizadas: moldes impresos en 3D o grabado CNC (error $< 0,02$ mm).

Equipamiento: prensa de precisión (Carver 4350), CNC (DMG Mori NTX1000).

Sinterización :

Micro: sinterización a baja temperatura (1300-1350 °C), $< 5 \times 10^{-4}$ Pa, tamaño de grano $< 0,5$ μ m.

Gran tamaño: 1450-1500°C, HIP (150 mpa), porosidad $< 0,01\%$.

Equipo: horno de sinterización al vacío (ALD), HIP (Quintus QIH232).

Procesando :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Micro: Rectificado de ultraprecisión ($Ra < 0,1 \mu m$), entallado láser de femtosegundos (profundidad $\pm 0,005 mm$).

Grandes tamaños: rectificado convencional ($Ra < 0,4 \mu m$), entallado por chispa ($\pm 0,02 mm$).

Formas complejas: mecanizado CNC de cinco ejes (error $< 0,02 mm$), pulido electroquímico ($Ra < 0,1 \mu m$).

Equipo: CNC de cinco ejes (Haas UMC750), láser femtosegundo (Coherent Monaco).

Verificar :

Dimensiones: escáner 3D (precisión $\pm 0,005 mm$), tolerancia $\pm 0,05 mm$.

Superficie: interferometría de luz blanca ($Ra < 0,2 \mu m$), SEM (muesca $\pm 0,01 mm$).

Propiedades: Dureza $\pm 30 HV$, resistencia a la flexión $\pm 3\%$, KIC $\pm 5\%$.

Microestructura: TEM (micro, granos $< 0,5 \mu m$), SEM (tamaño macro, granos $23 \mu m$).

Inspección aleatoria: $> 20\%$ (tamaño micro), $> 10\%$ (tamaño grande) por lote.

Equipo: Escáner 3D (GOM ATOS Q), TEM (FEI Talos F200X).

4.4 Desafíos y optimización

Desafío :

Micro varilla de prueba: tamaño pequeño, error de procesamiento $> 0,05 mm$, riesgo de grietas aumentado en un 20% .

Barra de prueba de gran tamaño: tensión interna, porosidad aumentada en $0,010,02\%$.

Forma compleja: desviación geométrica $> 0,1 mm$, capa de tensión superficial aumentada en $10 \mu m$.

Optimización :

Micro : Procesamiento con láser de femtosegundos (efecto térmico $< 0,5 \mu m$), piezas troqueladas ($\pm 0,01 mm$).

Gran tamaño : HIP segmentado (150 MPa, 2 veces), alivio de tensión 15% .

Forma compleja : CNC + pulido electroquímico, desviación geométrica $< 0,02 mm$, $Ra < 0,1 \mu m$.

Monitorización online : TAC de rayos X (porosidad $< 0,005\%$), medición de temperatura infrarroja ($\pm 1^\circ C$).

Efecto :

Miniatura: desviación de tamaño $< 0,02 mm$, desviación de dureza $< 2\%$.

Gran tamaño: porosidad $< 0,005\%$, resistencia aumentada en un 10% .

Formas complejas: la precisión geométrica aumentó en un 20% , la desviación del rendimiento $< 3\%$ (ScienceDirect, 2020).

4.5 Ejemplos

Micro-varilla de prueba (herramienta dental) :

Dimensiones: $2 \times 2 \times 20 mm$, $Ra < 0,1 \mu m$.

Proceso: Fórmula YG8N, sinterización a $1350^\circ C$, procesamiento láser de femtosegundos.

Rendimiento: Dureza $2000 HV$, resistencia a la flexión $2,2 GPa$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación: Prueba de herramientas de microcorte, vida útil de corte 3 horas.

Varilla de prueba de gran tamaño (herramienta de minería) :

Dimensiones: 8×8×50 mm, Ra <0,4 μm .

Proceso: Fórmula YG15, HIP 1500 °C, rectificado CNC.

Propiedades: Dureza 1400 HV, KIC 12 MPa·m^{1/2} .

Aplicación: Prueba de brocas de perforación de roca, vida útil 600 horas.

Barra de prueba cilíndrica (matriz de trefilado) :

Dimensiones: 5 mm de diámetro, 30 mm de largo, muesca en V (0,2 mm).

Proceso: Fórmula YG6, sinterización a 1400 °C, CNC de cinco ejes + pulido electroquímico.

Rendimiento: Dureza 1500 HV, resistencia a la flexión 2,0 GPa.

Aplicación: Prueba de tenacidad de matrices de trefilado, vida útil de 100.000 metros.

5. Conclusión

Las varillas de nanoprueba deben resolver los problemas de aglomeración de nanopolvo (<0,5 %), crecimiento de grano (<0,5 μm) y alta actividad. Mediante molienda de bolas de alta energía (1820 horas), sinterización a baja temperatura (1350 °C) y procesamiento láser de femtosegundos (±0,005 mm), se logra una dureza de 2000 HV y una resistencia a la flexión de 2,2 GPa. **La optimización de grado específico ajusta los ingredientes, aglutinantes y parámetros de sinterización** para YG6 (bajo coste, 2,0 GPa), YG15 (alta tenacidad, KIC 12 MPa·m^{1/2}) e YG8N (granos ultrafinos, dureza 2000 HV) para garantizar una desviación del rendimiento <3 %. **Las varillas de prueba no estándar satisfacen necesidades personalizadas** a través del moldeo de precisión (micro), CNC de cinco ejes (formas complejas) y HIP segmentado (tamaño grande), con una desviación de tamaño <0,05 mm y una desviación de rendimiento <3%.

La optimización de procesos (como la dispersión ultrasónica y la monitorización en línea) y los equipos avanzados (como el láser de femtosegundos y la tomografía computarizada de rayos X) mejoran significativamente la calidad de las barras de prueba, y la consistencia del rendimiento aumenta en un 20 %. En el futuro, la fabricación aditiva (impresión 3D de piezas en bruto) y la inteligencia artificial (optimización de procesos) mejorarán aún más la eficiencia de preparación de barras de prueba nanométricas y no estándar.

Estándar :

GB/T 3851: Resistencia a la flexión.

ISO 3327: Barras de ensayo de flexión.

ISO 28079: Tenacidad a la fractura.

GB/T 3849: Prueba magnética de cobalto.

ISO 4499: Microestructura.

ISO 4505: Porosidad.

ASTM B406: Resistencia a la flexión.

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



Un apéndice:

Norma nacional para varillas de prueba de carburo

Las barras de prueba de metal duro o carburo cementado se utilizan para probar propiedades clave como la resistencia transversal (TRS) y la tenacidad a la fractura (KIC). Su preparación, especificaciones y pruebas deben cumplir con estrictas normas nacionales (GB/T) para garantizar la precisión y consistencia de los resultados. Las normas nacionales chinas (GB/T) abarcan la preparación, las dimensiones, las pruebas de rendimiento, el análisis de microestructura y las pruebas de composición química de las barras de prueba de carburo cementado, y algunas normas están alineadas con las normas internacionales (como ISO 3327 e ISO 28079). Este artículo detallará las normas nacionales chinas relacionadas con las barras de prueba de carburo cementado, abarcando todos los aspectos de las especificaciones, las pruebas de rendimiento, la preparación y la verificación, junto con el contenido de la norma, el ámbito de aplicación y los requisitos específicos, todo en chino para garantizar que el contenido sea preciso, detallado y atractivo.

1. Descripción general

Las barras de ensayo de carburo se utilizan principalmente para ensayos de resistencia a la flexión (1,5-2,5 GPa) y tenacidad a la fractura (812 MPa·m^{1/2}). Los tamaños estándar incluyen 5×5×35 mm (resistencia a la flexión) y 4×8×32 mm (tenacidad, entalla de 0,2-0,3 mm). La norma nacional china (GB/T) proporciona especificaciones para la preparación y el ensayo de barras de ensayo, que abarcan los siguientes aspectos:

Especificaciones de la varilla de prueba : dimensiones, tolerancias, calidad de la superficie.

Ensayos de rendimiento : dureza, resistencia a la flexión, tenacidad a la fractura, densidad, etc.

Microestructura y composición química : tamaño de grano, porosidad, contenido de carbono, 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

Proceso de preparación : dosificación, mezcla, sinterización, procesamiento, etc.
relacionado con las varillas de prueba de carburo cementado en el orden de números estándar, explicando su contenido, ámbito de aplicación, requisitos específicos y su relación con las varillas de prueba una por una.

2. Normas nacionales relacionadas con las varillas de prueba de carburo cementado

Las siguientes son normas nacionales chinas relacionadas directa o indirectamente con las barras de prueba de carburo cementado, que cubren todos los aspectos de la preparación, prueba y verificación de las barras de prueba.

2.1 GB/T 3851:2015 Método de ensayo para la resistencia a la fractura transversal del carburo cementado

Nombre estándar : Resistencia a la ruptura transversal del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba para la resistencia a la flexión (TRS) del carburo cementado, que es aplicable a barras de prueba y muestras de productos terminados y se usa ampliamente en cuchillos, moldes, herramientas de minería, etc.

Requisitos de la varilla de prueba :

Dimensiones : $5,0 \pm 0,1$ mm (ancho) $\times$ $5,0 \pm 0,1$ mm (alto) $\times$ $35,0 \pm 0,5$ mm (largo).

Tolerancias : ancho y alto $\pm 0,1$ mm, largo $\pm 0,5$ mm, paralelismo $< 0,05$ mm, perpendicularidad $< 0,05$ mm.

Rugosidad superficial : $R_a < 0,4$ μ m, la superficie que soporta la tensión está pulida, sin grietas, poros o colapso de los bordes (defectos visibles a simple vista $< 0,1$ mm).

Chaflán : $0,20,3$ mm, ángulo $45^\circ \pm 5^\circ$, para evitar concentración de tensiones.

Método de prueba :

Prueba de flexión de tres puntos :

Equipamiento: Máquina de ensayos universal, precisión $\pm 0,1$ kN.

Distancia entre pivotes: $30 \pm 0,1$ mm, velocidad de carga: $0,51$ mm/min.

Fórmula: $\sigma = 3FL / (2bh^2)$, F es la carga de rotura (N), L es la distancia de apoyo (mm), b y h son el ancho y la altura de la barra de prueba (mm).

paso :

Las barras de prueba se pulieron ($R_a < 0,4$ μ m), se limpiaron (etanol) y se secaron (80°C , 30 min).

Coloque la varilla de prueba y ajuste el punto de apoyo para garantizar una fuerza uniforme.

Aplicar carga hasta la fractura, registrar F y calcular σ (error $< \pm 5\%$).

Resultados : Resistencia a la flexión $1,5-2,5$ GPa, como YG6 $\sim 2,0$ GPa, YG15 $\sim 2,5$ GPa.

Relación con la varilla de prueba :

Especificar claramente las dimensiones, la superficie y las condiciones de prueba de las barras de prueba de resistencia a la flexión es el estándar fundamental para la preparación de las barras de prueba.

Se requiere que la geometría de la barra de prueba sea consistente (tolerancia $\pm 0,1$ mm) para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

garantizar una distribución uniforme de la tensión y una desviación de prueba $<5\%$.

Nota : Equivalente a ISO 3327:2009, aplicable a pruebas de barras estándar.

2.2 GB/T 7997-2017 Método de prueba para la dureza Vickers del carburo cementado

Nombre estándar : Prueba de dureza Vickers para carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba de dureza de carburo cementado, aplicable a barras de prueba, productos terminados o cualquier muestra, utilizado para verificar la consistencia del rendimiento de las barras de prueba.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : Superficie pulida, $Ra < 0,2\ \mu\text{m}$, sin capa de óxido ni defectos.

Tamaño : $>5 \times 5\ \text{mm}$, espesor $>1\ \text{mm}$, la varilla de prueba es directamente aplicable.

Método de prueba :

Dureza Vickers (HV) :

Equipo: Probador de dureza Vickers, precisión $\pm 0,5\%$.

Penetrador: Pirámide cuadrangular de diamante, ángulo del vértice 136° .

Carga: 1030 kgf (normalmente HV30), mantener durante 1015 segundos.

Paso :

Pulir la superficie de la barra de prueba ($Ra < 0,2\ \mu\text{m}$) y limpiarla (etanol).

Aplique carga y mida la diagonal de sangría (μm , precisión $\pm 0,1\ \mu\text{m}$).

Calcular HV (error $< \pm 50\ \text{HV}$) y tomar el promedio de 35 puntos.

Resultado : Dureza 1400-2200 HV, como YG6 $\sim 1500\ \text{HV}$, grano ultrafino $\sim 2000\ \text{HV}$.

Relación con la varilla de prueba :

Se utiliza para verificar la dureza de las barras de prueba (1400-2200 HV) para garantizar la consistencia con el producto terminado.

Las barras de prueba no requieren una preparación especial y se pueden probar después del pulido para verificar el tamaño del grano y el contenido de cobalto.

Nota : Equivalente a ISO 65071:2005, aplicable a barras de prueba convencionales y nano.

2.3 GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

Nombre estándar : Método para medir la densidad del carburo cementado.

Alcance : Especifica el método de prueba para la densidad del carburo cementado, aplicable a barras de prueba y otras muestras, utilizado para evaluar la porosidad y la uniformidad de la composición.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : bloque o varilla de prueba, masa $> 1\ \text{g}$, superficie limpia, sin capa de óxido.

Dimensiones : Las varillas de prueba ($5 \times 5 \times 35\ \text{mm}$ o $4 \times 8 \times 32\ \text{mm}$) son directamente aplicables.

Método de prueba :

Método de Arquímedes :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipamiento: balanza de precisión (precisión $\pm 0,001$ g), agua desionizada.

Fórmula: $\rho = m1 / (m1 - m2) \times \text{paga}$, m1 es el peso seco (g), m2 es el peso en agua (g).

Paso :

Las varillas de prueba se limpiaron (etanol) y se secaron (80°C, 30 min).

Se midió el peso seco y el peso en agua 3 veces y se tomó el valor promedio.

Corregido para la temperatura del agua (paga $\sim 1,0$ g/cm³, 20°C), error $< \pm 0,01$ g/cm³.

Resultado : Densidad 14,0-15,0 g/cm³, como YG6 $\sim 14,9$ g/cm³, YG15 $\sim 14,0$ g/cm³.

Relación con la varilla de prueba :

Se utiliza para verificar la densidad de la varilla de prueba (14,015,0 g/cm³), reflejando la porosidad ($< 0,01\%$) y la precisión de la proporción.

La varilla de prueba no requiere una preparación especial y se puede probar directamente para verificar la calidad de sinterización.

Nota : Equivalente a ISO 3369:2006, aplicable a barras de prueba estándar y no estándar.

2.4 GB/T 3849-2015 Métodos de ensayo para propiedades magnéticas de carburo cementado

Nombre estándar : Método para medir las propiedades magnéticas del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba indirecto para la intensidad de magnetización y el contenido de carbono de la fase de cobalto del carburo cementado, aplicable a barras de prueba y productos terminados, utilizado para detectar la fase η o el carbono libre.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : Varilla de prueba o muestra pequeña ($> 5 \times 5$ mm), superficie limpia, sin oxidación.

Tamaño : Aplicable directamente a barras de prueba de flexión o tenacidad.

Método de prueba :

Prueba magnética de cobalto :

Equipo: Magnetómetro (precisión $\pm 0,1$ emu/g).

Se mide la intensidad de magnetización (emu/g) y se infiere indirectamente el contenido de carbono.

paso :

Limpie la varilla de prueba (etanol) y séquela.

Coloque un magnetómetro y mida la intensidad de magnetización, repita 3 veces y tome el valor promedio.

El contenido de carbono se estimó comparándolo con la curva estándar (error $< \pm 0,05\%$).

Resultados : Intensidad de magnetización 120150 emu/g, como YG6 ~ 150 emu/g, descarbonización ~ 120 emu/g.

Relación con la varilla de prueba :

Se utiliza para verificar el contenido de carbono de la barra de prueba ($6,13 \pm 0,1$ % en peso) y para detectar la fase η (baja magnetización) o carbono libre (alta magnetización).

Las varillas de prueba no requieren una preparación especial y se pueden probar directamente para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

verificar los ingredientes y el proceso de sinterización.

Nota : Aplicable a carburo cementado a base de cobalto, equivalente a ISO 3326:2013.

2.5 GB/T 18376-2014 Método de evaluación de la microestructura del carburo cementado

Nombre estándar : Método para evaluar la microestructura del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de observación y evaluación de la microestructura del carburo cementado, aplicable a barras de prueba y productos terminados, utilizado para evaluar el tamaño del grano, la porosidad y los defectos (como la fase η , el carbono libre).

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestras : pulidas ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$), grabadas (reactivo de Murakami, 510 seg).

Tamaño : Rodajas de varilla de prueba ($> 5 \times 5 \text{ mm}$) o varilla entera pulida.

Método de prueba :

Microscopio óptico/SEM :

Se observaron el tamaño de grano ($0,52 \mu\text{m}$), la porosidad ($< 0,01\%$) y la distribución de fases.

Norma de evaluación: A02B00C00 (porosidad $< 0,01\%$, ISO 4505).

difracción de rayos X :

Detecta la composición de la fase (como WC, Co, $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) con una sensibilidad del 0,1 %.

paso :

Pulir la barra de prueba, grabarla y limpiarla (etanol).

Se utilizó la observación al microscopio ($50 \times 1000 \times$) para medir el tamaño del grano (error $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Análisis XRD fase η /carbono libre (relación $< 1\%$).

Resultados : Tamaño de grano $0,52 \mu\text{m}$ (convencional) o $< 0,5 \mu\text{m}$ (grano ultrafino), fase $\eta < 1\%$.

Relación con la varilla de prueba :

Se utiliza para verificar la microestructura (granos, poros, defectos) de la barra de prueba para garantizar la consistencia con el producto terminado.

Las barras de prueba se pulen y graban para evaluar la calidad de la sinterización y el control del grano.

Nota : Equivalente a ISO 44991:2008, aplicable a barras de prueba nano y convencionales.

2.6 GB/T 5314-2011 Métodos de análisis químico para carburo cementado

Nombre estándar : Métodos para el análisis químico del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica los métodos analíticos para elementos como tungsteno, cobalto y carbono en carburo cementado. Es aplicable a varillas de prueba y materias primas para verificar la composición química.

Requisitos de la varilla de prueba :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Muestra : polvo o trozos pequeños ($>0,1$ g), la varilla de prueba debe triturarse (<100 μm).

Tamaño : Muestreo directo o corte de varillas de prueba.

Método de prueba :

Análisis de carbono y azufre : método de combustión, medición de CO_2 , detección de carbono total (precisión $\pm 0,01\%$).

ICPMS : Disolución ácida, detección de W, Co, Cr, etc. (precisión $\pm 0,001\%$).

paso :

Aplastar la varilla de prueba (<100 μm) y lavar (agua desionizada).

Combustión o disolución, análisis del contenido de elementos, repetido 3 veces.

Se verificó el contenido de carbono ($6,13 \pm 0,1$ % en peso) con un error de $< \pm 0,05$ %.

Resultados : Carbono $\sim 6,13$ % en peso, Cobalto 615 % en peso, Impurezas $< 0,05$ %.

Relación con la varilla de prueba :

Para verificar la composición química de la barra de prueba (carbono, cobalto) y garantizar que no haya descarburación (fase η) ni carburación (carbono libre).

Es necesario triturar la varilla de prueba para verificar la precisión de los ingredientes y la sinterización.

Nota : Aplicable a carburos cementados a base de cobalto y níquel. Algunos métodos se basan en la norma ISO 11876.

2.7 GB/T 1482-2010 Determinación de la fluidez del polvo de carburo cementado

Nombre estándar : Método para la determinación de la fluidez de polvos de carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba para la fluidez del polvo de carburo cementado, aplicable al proceso de mezcla y secado por aspersión antes de la preparación de barras de prueba.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : Polvo después de mezclar (D50 50200 μm), que afecta indirectamente la calidad de la barra de prueba en blanco.

Tamaño : No está directamente relacionado con la varilla de prueba, pero afecta la uniformidad del prensado.

Método de prueba :

Medidor de flujo Hall :

Equipamiento: Embudo estándar (apertura 2,5 mm), precisión $\pm 0,1$ s.

Mida el tiempo que tarda en salir 50 g de polvo (s/50 g).

paso :

Se tomó el polvo secado por aspersión (D50 50200 μm) y se secó (80°C , 1 h).

Vierta en un embudo, registre el tiempo de salida, repita 3 veces y tome el valor promedio.

Fluidez: < 25 s/50 g (convencional), < 20 s/50 g (nano polvo).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados : YG6 ~25 s/50 g, YG8N ~18 s/50 g.

Relación con la varilla de prueba :

Garantizar la fluidez del polvo mezclado (<25 s/50 g), mejorar la uniformidad del blanco (>95%) y reducir la porosidad de la varilla de prueba (<0,01%).

Afecta indirectamente la calidad del prensado y sinterización de las barras de prueba.

Nota : Aplicable a polvos nano y convencionales, consulte ASTM B213.

2.8 GB/T 5169-2013 Método de prueba para la porosidad del carburo cementado

Nombre estándar : Método para la determinación de la porosidad en carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba de porosidad de carburo cementado, aplicable a barras de prueba y productos terminados, utilizado para evaluar la calidad de sinterización.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestras : pulidas ($R_a < 0,05 \mu\text{m}$), rodajas de barras de prueba o barras enteras.

Tamaño : $>5 \times 5 \text{ mm}$, la varilla de prueba es directamente aplicable.

Método de prueba :

Observación al microscopio :

Equipo: Microscopio óptico o SEM (precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Clasificación: Tipo A (<25 μm), Tipo B (2550 μm), Tipo C (carbono libre).

Estándar: A02B00C00 (porosidad <0,01%).

paso :

Pulir la varilla de prueba y limpiarla (etanol).

Se utilizó la observación al microscopio (100×500×) para contar el número y tamaño de los poros.

Evaluar la porosidad (error $\leq \pm 0,005\%$).

Resultado : Porosidad <0,01%, como la barra de prueba HIP <0,005%.

Relación con la varilla de prueba :

Verificar la porosidad de la barra de prueba (<0,01%) para garantizar la calidad de los procesos de sinterización y HIP.

Las barras de prueba se pulen para evaluar el efecto de los defectos internos en la resistencia y la tenacidad.

Nota : Equivalente a ISO 4505:1978, aplicable a barras de prueba estándar y no estándar.

2.9 GB/T 4334-2020 Método de prueba para la resistencia a la corrosión del carburo cementado

Nombre estándar : Métodos de prueba para la resistencia a la corrosión del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba para la resistencia a la corrosión del carburo cementado, aplicable a barras de prueba y productos terminados, utilizado para evaluar la estabilidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

química.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : Pulida ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$), $> 10 \times 10 \text{ mm}$, adecuada para secciones de barras de prueba.

Tamaño : La barra de prueba debe cortarse o pulirse.

Método de prueba :

Prueba de inmersión :

Medio: 5% HCl (pH 47), temperatura 60°C , tiempo 168 horas.

Se midió la pérdida de masa (mg) y se calculó la tasa de corrosión (mm/año, error $< \pm 10\%$).

Pruebas electroquímicas :

Equipamiento: Estación de trabajo electroquímica, medición de potencial de corrosión (V) y densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$).

paso :

Pula la varilla de prueba y límpiela (agua desionizada).

Prueba de inmersión o electroquímica, registrar datos, repetir 3 veces.

Calcular la tasa de corrosión ($< 0,01 \text{ mm/año}$).

Resultados : YG6 $\sim 0,01 \text{ mm/año}$, YN10 $< 0,005 \text{ mm/año}$.

Relación con la varilla de prueba :

Verificar la resistencia a la corrosión de las barras de prueba ($< 0,01 \text{ mm/año}$) y evaluar el impacto de η en el rendimiento.

Es necesario pulir la varilla de prueba para verificar indirectamente la composición química y la microestructura.

Nota : Consulte ASTM G31, aplicable a aleaciones a base de cobalto y níquel.

2.10 GB/T 12444-2006 Método de prueba para la resistencia al desgaste del carburo cementado

Nombre estándar : Método de prueba para la resistencia al desgaste del carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el método de prueba de resistencia al desgaste del carburo cementado, aplicable a barras de prueba y productos terminados, utilizado para evaluar la vida útil.

Requisitos de la varilla de prueba :

Muestra : Pulida ($R_a < 0,2 \mu\text{m}$), $> 10 \times 10 \text{ mm}$, adecuada para secciones de barras de prueba.

Tamaño : La barra de prueba debe cortarse o pulirse.

Método de prueba :

Prueba de abrasión :

Equipo: Muela abrasiva (Al_2O_3 , tamaño de grano $60100 \mu\text{m}$), carga 1020 N.

Condiciones: velocidad de rotación 200300 rpm, tiempo 3060 minutos.

Se midió la pérdida de masa (mg, error $< \pm 5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Desgaste del disco del pasador :

Equipamiento: Probador de desgaste pin-on-disc, disco de fricción (acero o cerámica).

Mida el volumen de desgaste (mm^3).

paso :

Pulir la varilla de prueba y limpiarla (etanol).

Establezca las condiciones, pruebe el desgaste y repita 3 veces.

Calcular la tasa de desgaste (por ejemplo $0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

Resultados : YG6 $\sim 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, YN10 $\sim 0,008 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Relación con la varilla de prueba :

Verificar la resistencia al desgaste de las barras de prueba y evaluar el efecto del tamaño del grano y la dureza en la vida útil.

Es necesario pulir la barra de prueba para verificar indirectamente la calidad de la microestructura.

Nota : Consulte ASTM B611 y G99 para barras de prueba estándar y no estándar.

3. Normas nacionales indirectamente relacionadas

Aunque las siguientes normas nacionales no son directamente aplicables a las barras de prueba, tienen un impacto importante en el proceso de preparación y el control de calidad, y garantizan indirectamente el rendimiento de las barras de prueba.

3.1 GB/T 52432008 Grados de carburo cementado

Nombre estándar : Grados de carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el rendimiento, la composición y la aplicación de los grados de carburo cementado (como YG6, YG15, YN10).

Relación con la varilla de prueba :

Definir recetas de barras de prueba y objetivos de rendimiento, como YG6 (6 % Co, dureza 1500 HV), YG15 (15 % Co, KIC $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Asegúrese de que la varilla de prueba coincida con la marca y que el error del ingrediente sea $< 0,1 \%$.

contenido :

Composición: WC, contenido de Co, Ni, carbono $6,13 \pm 0,1 \%$ en peso.

Propiedades: dureza 1400-2200 HV, resistencia a la flexión 1,5-2,5 GPa.

Nota : Se hace referencia a la norma ISO 513, que proporciona puntos de referencia de rendimiento para la preparación de barras de prueba.

3.2 GB/T 34505-2017 Requisitos técnicos para la preparación de polvos de carburo cementado

Nombre estándar : Especificación técnica para la preparación de polvos de carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica el tamaño de partícula, la pureza y los requisitos de preparación del polvo de carburo cementado, y es adecuado para la dosificación y mezcla de varillas de prueba.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Relación con la varilla de prueba :

Asegúrese de la calidad del polvo (tamaño de grano WC 0,12 μm , pureza >99,9%) y mejore la uniformidad de la varilla de prueba (>95%).

Controlar el contenido de oxígeno (<0,05%) y evitar la descarburación (fase η).

contenido :

Tamaño de partícula: D50 0,12 μm (convencional), 0,10,4 μm (nanómetro).

Pureza: WC >99,9%, Co >99,9%, impurezas <0,01%.

Fluidez: <25 s/50 g (GB/T 1482).

Nota : Aplicable tanto para lotes de barras de prueba nano como convencionales.

3.3 GB/T 26048-2010 Condiciones técnicas para la sinterización de carburo cementado

Nombre estándar : Especificación técnica para la sinterización de carburo cementado.

Ámbito de aplicación : Especifica los parámetros del proceso de sinterización de carburo cementado y es aplicable a la sinterización de varillas de prueba.

Relación con la varilla de prueba :

Asegúrese de la calidad de sinterización de la varilla de prueba (porosidad <0,01%, fase η <1%).

Controlar la temperatura de sinterización (1350-1450 $^{\circ}\text{C}$, ± 5 $^{\circ}\text{C}$) y la atmósfera (<10⁻³ Pa).

contenido :

Temperatura: 1350-1450 $^{\circ}\text{C}$ (convencional), 1320-1380 $^{\circ}\text{C}$ (nano).

Grado de vacío: <10⁻³ Pa, oxígeno <0,01%.

HIP: 1350-1450 $^{\circ}\text{C}$, 100-150 MPa, porosidad <0,01%.

Observaciones : Aplicable al proceso de sinterización al vacío y HIP.

4. Correspondencia entre las normas nacionales y las normas internacionales

Algunas normas nacionales son equivalentes o hacen referencia a normas internacionales (ISO, ASTM), lo que mejora la aplicabilidad global de las pruebas con varillas de prueba:

GB/T 38512015 $\approx$ ISO 3327:2009 (resistencia a la flexión).

GB/T 79972017 $\approx$ ISO 65071:2005 (dureza Vickers).

GB/T 38502015 $\approx$ ISO 3369:2006 (densidad).

GB/T 38492015 $\approx$ ISO 3326:2013 (propiedades magnéticas).

GB/T 183762014 $\approx$ ISO 44991:2008 (microestructura).

GB/T 51692013 $\approx$ ISO 4505:1978 (porosidad).

GB/T 43342020 se refiere a ASTM G31 (resistencia a la corrosión).

GB/T 124442006 hace referencia a ASTM B611/G99 (resistencia a la abrasión).

5. Combinación de la preparación de la varilla de prueba y las normas nacionales

La preparación de las varillas de prueba debe cumplir plenamente con las normas nacionales mencionadas anteriormente, y las aplicaciones específicas son las siguientes:

Ingredientes :

Cumple con **GB/T 52432008** (composición de grado, como YG6: 6 % Co), **GB/T 53142011** (carbono 6,13 $\pm$ 0,1 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Control de calidad del polvo (GB/T 345052017 , pureza WC > 99,9%).

Mezclando :

Asegúrese de la fluidez (GB/T 14822010 , <25 s/50 g) y de la uniformidad de partículas >95%.

suprimir :

Prensado isostático en frío (200350 MPa), el tamaño de la pieza tiene en cuenta la contracción (GB/T 38512015 , como 6,2×6,2×43 mm).

sinterización :

Sinterización al vacío + HIP (GB/T 260482010 , 1350-1450 °C, porosidad < 0,01 %).

Procesando :

Rectificado y pulido (GB/T 38512015 , Ra <0,4 μm; ISO 28079 , entalladura 0,20,3 mm).

verificar :

Tamaño: ±0,1 mm (GB/T 38512015).

Propiedades: dureza (GB/T 79972017 , 14002200 HV), densidad (GB/T 38502015 , 14.015.0 g/cm³).

Microestructura: tamaño de grano 0,52 μm, fase η <1% (GB/T 183762014).

Composición química: Carbono ±0,05% (GB/T 53142011 , GB/T 38492015).

6. Casos prácticos de aplicación

Barra de prueba de flexión YG6 :

Estándar : GB/T 38512015 (tamaño 5×5×35 mm, Ra <0,4 μm), GB/T 79972017 (dureza 1500 HV), GB/T 38492015 (carbono 6,13%).

Preparación : WC 94 % en peso, Co 6 % en peso, sinterizado a 1400 °C, molido Ra <0,4 μm.

Resultados : resistencia a la flexión 2,0 GPa, dureza 1500 HV, vida útil de corte 2 horas.

Barra de prueba de tenacidad YG15 :

Normas : ISO 28079 (tamaño 4×8×32 mm, muesca 0,25 mm), GB/T 38502015 (densidad 14,0 g/cm³), GB/T 183762014 (tamaño de grano ~1,8 μm).

Preparación : WC 85 % en peso, Co 15 % en peso, 1450 °C HIP, muesca de chispa.

Resultados : KIC 12 MPa·m^{1/2}, densidad 14,0 g/cm³, vida útil de perforación 120.000 veces.

Varilla de prueba nano YG8N :

Normas : GB/T 38512015 (resistencia a la flexión), GB/T 183762014 (grano <0,5 μm), GB/T 53142011 (carbono ±0,03%).

Preparación : WC 0,20,4 μm, sinterizado a 1350 °C, entallado con láser de femtosegundo.

Resultados : dureza 2000 HV, resistencia a la flexión 2,2 GPa, vida útil de la herramienta de aviación 4 horas.

7. Conclusión

La preparación y prueba de las varillas de prueba de carburo cementado deben cumplir con las siguientes normas nacionales básicas:

GB/T 38512015 : Barra de prueba de resistencia a la flexión (5×5×35 mm, Ra <0,4 μm).

GB/T 79972017 : Dureza (1400 - 2200 HV).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 38502015 : Densidad ($14.015.0 \text{ g/cm}^3$).

GB/T 38492015 : Propiedades magnéticas (carbono $\pm 0,05\%$).

GB/T 183762014 : Microestructura (tamaño de grano $0,52 \mu\text{m}$, fase $\eta < 1\%$).

GB/T 53142011 : Composición química (carbono $6,13 \pm 0,1\%$).

GB/T 51692013 : Porosidad ($< 0,01\%$).

GB/T 43342020 : Resistencia a la corrosión ($< 0,01 \text{ mm/año}$).

GB/T 124442006 : Resistencia a la abrasión ($\sim 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

GB/T 1482-2010 : Fluidez del polvo ($< 25 \text{ s/50 g}$).

GB/T 52432008 : Rendimiento de la marca.

GB/T 34505-2017 : Preparación en polvo.

GB/T 260482010 : Proceso de sinterización.

Estas normas abarcan las especificaciones (tolerancia $\pm 0,1 \text{ mm}$), el rendimiento (dureza, resistencia, tenacidad), la preparación (ingredientes, sinterización, procesamiento) y la verificación (microestructura, composición química) de las barras de prueba, garantizando la consistencia de su rendimiento (desviación $< 5\%$). Algunas normas nacionales son equivalentes a la ISO (como GB/T 3851 $\approx$ ISO 3327), aplicables a barras de prueba estándar, nanométricas y no estándar. En el futuro, la monitorización inteligente y el procesamiento automatizado mejorarán aún más la eficiencia de la implementación de las normas nacionales.

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

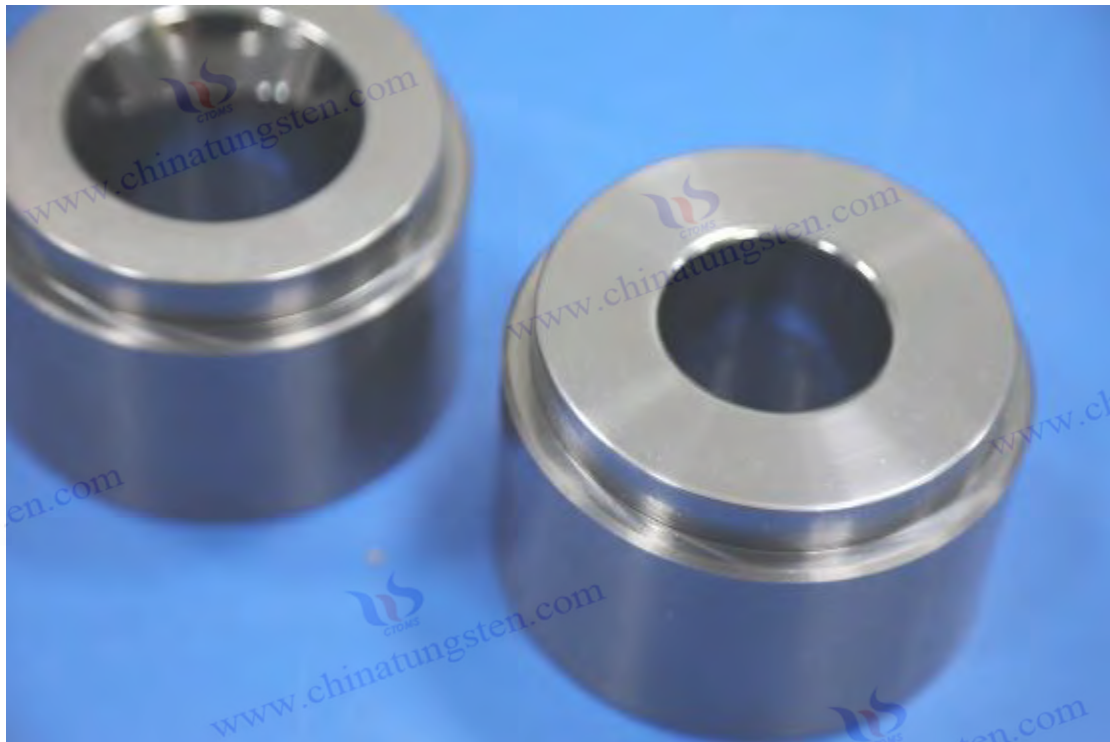
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



GB/T 3851-2015 Barra de prueba de resistencia a la flexión de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica la preparación, los requisitos de tamaño, los métodos de ensayo y los requisitos técnicos relacionados de las barras de ensayo de resistencia a la flexión de carburo cementado. Esta norma es aplicable a materiales y productos de carburo cementado con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante. Se utiliza para determinar la resistencia a la flexión como un indicador importante para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales. Este método es adecuado para ensayos de rendimiento en control de calidad, aceptación de productos e investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a carburos cementados que no sean a base de cobalto ni a materiales que contengan inclusiones no metálicas significativas.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

GB/T 3850 Método de determinación de la coercitividad del carburo cementado

GB/T 5313 Métodos de ensayo de flexión de tres y cuatro puntos para materiales metálicos a temperatura ambiente

ISO 3327:2009 Carburo cementado - Determinación de la resistencia a la flexión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 4505:1978 Carburo cementado - Preparación de barras de ensayo de resistencia a la flexión

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Resistencia a la flexión:

La tensión máxima que soporta una barra de carburo en una prueba de flexión de tres o cuatro puntos. La unidad es MPa (megapascuales), que refleja la capacidad del material para resistir la fractura.

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 Barra de prueba

Una muestra estandarizada utilizada para pruebas de resistencia a la flexión, con dimensiones específicas y calidad de superficie.

3.4 Luz:

Distancia entre los puntos de apoyo en el ensayo de flexión, en mm.

4 Principio

La resistencia a la flexión es la capacidad del carburo cementado para resistir la fractura bajo carga de flexión, la cual se determina mediante un ensayo de flexión de tres o cuatro puntos. La varilla de prueba se coloca en el punto de apoyo y se aplica una carga concentrada o uniformemente distribuida. Se registra la fuerza máxima de fractura y la resistencia a la flexión se calcula con base en las dimensiones geométricas y las propiedades del material de la varilla de prueba. La fórmula es la siguiente:

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (\text{二点弯曲})$$
$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad (\text{四点弯曲})$$

其中:

- σ_f : 抗弯强度 (MPa);
- F : 断裂载荷 (N);
- L : 跨距 (mm);
- b : 试棒宽度 (mm);
- h : 试棒高度 (mm).

Los defectos de la superficie, el tamaño del grano y la porosidad tienen un impacto significativo en los resultados, y la calidad de la preparación de la varilla de prueba debe controlarse estrictamente.

5. Preparación de la varilla 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

5.1 Requisitos de material

Las barras de prueba se prepararán a partir del mismo lote de materias primas que el carburo cementado que se va a probar.

La desviación del contenido de cobalto es $<0,1\%$ en peso y la fluctuación del tamaño del grano es $<5\%$.

5.2 Dimensiones y tolerancias

- **形状:** 矩形截面试样。
- **标准尺寸:**
 - 长度: 大于跨距 + $2 \times$ 支承点直径 (通常 20-50 mm 余量)。
 - 宽度 (b): (6.0 ± 0.1) mm 或 (10.0 ± 0.1) mm。
 - 高度 (h): (2.0 ± 0.05) mm, (3.0 ± 0.05) mm 或 (5.0 ± 0.1) mm。
- **跨距 (L):** 20 mm、30 mm 或 40 mm, 视试样高度选择 (通常 $L/h = 10 \sim 16$)。
- **表面质量:** 表面光滑, 无裂纹 ($<5\ \mu\text{m}$)。划痕或孔隙 (孔隙率 $<0.05\%$)。边缘倒角 0.1-0.2 mm。

5.3 Proceso de preparación

Prensado: Para garantizar la uniformidad de la densidad ($>99\%$), se utiliza prensado isostático o prensado uniaxial con una presión de 150-200 MPa.

Sinterización: temperatura 1350-1500°C, tiempo 1-2 horas, utilizando vacío o atmósfera protectora de hidrógeno.

Procesamiento: Utilice una muela de diamante o un mecanizado por chispa eléctrica hasta el tamaño especificado, con una rugosidad de la superficie $Ra \leq 0,4\ \mu\text{m}$.

Inspección: Cada lote de barras de prueba se somete a inspección visual y medición dimensional, y se toma una muestra aleatoria del 5 % de las barras de prueba para analizar la densidad y la microestructura.

5.4 Número de barras de prueba

barras de prueba para cada lote, de las cuales al menos 5 se utilizan para pruebas y el resto son de respaldo.

6 Instrumentos y equipos

6.1 Máquina de ensayo de materiales universal

con rango de carga de 0 a 50 kN, precisión de $\pm 0,5\%$, equipada con accesorio de flexión de tres o cuatro puntos.

6.2

Se utiliza un micrómetro con una precisión de $\pm 0,01$ mm para medir las dimensiones de la varilla de prueba.

Se utiliza un microscopio metalográfico con un aumento de 200x-500x para comprobar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

defectos superficiales.

6.4

La temperatura del ambiente de prueba se controla en una caja de temperatura constante a 20-25 °C y la humedad es <60 %.

7 Métodos de prueba

7.1 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 20-25°C, fluctuación de temperatura $\leq \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: <60%, para evitar que la varilla de prueba absorba humedad.

Velocidad de carga: 0,5-1,0 mm/min (ajustada según el tamaño de la varilla de prueba).

7.2 Instalación de la varilla de prueba

Coloque la barra de prueba en el dispositivo de doblado, alinee el punto de apoyo con la longitud de la barra de prueba y ajuste el tramo de acuerdo con la norma.

Asegúrese de que la varilla de prueba no esté inclinada y que los puntos de apoyo estén en contacto uniforme.

7.3 Pasos de prueba

1. 测量试样宽度 (b) 和高度 (h), 取 3 点平均值。
2. 安装试样, 调整跨距 (L), 记录初始状态。
3. 以指定速度加载, 直至试样断裂, 记录最大载荷 (F_m)。
4. 重复测试 5-10 根试样, 取平均值作为抗弯强度。
5. 检查新裂面, 记录新裂模式 (脆性或韧性)。

7.4 Procesamiento de datos

Cálculo de la resistencia a la flexión 计算抗弯强度 (σ_b), 保留 1 位小数。

Si el resultado de una sola varilla de prueba se desvía del valor promedio en >10%, deberá descartarse y recalcularse.

Las desviaciones estándar se informan dentro de $\pm 5\%$.

8 Resultados Expresión

La resistencia a la flexión se mide en MPa con un decimal (por ejemplo, 2200,5 MPa).

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: GB/T 3851-2015; b) Descripción de la barra de prueba: marca, lote, tamaño;
- c) Condiciones de prueba: temperatura, humedad, amplitud; d) Modelo del instrumento y estado de calibración; e) Resultados: valor promedio y desviación estándar de la resistencia a la flexión; f) Descripción anormal: si el resultado se desvía en >10%, explique el motivo; g) Fecha de la prueba: como por ejemplo, 21 de mayo de 2025; h) Probador: firma.

9 Precisión y sesgo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

9.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de la resistencia a la flexión medida por el mismo operador y el mismo equipo es $<5\%$.

Reproducibilidad: La desviación de la resistencia a la flexión medida por diferentes laboratorios es $<10\%$.

9.2 Sesgo

Error del instrumento: $\pm 0,5\%$ Influencia del error de carga $<1\%$.

Defectos de la barra de prueba: Las grietas o poros superficiales provocan una subestimación de la resistencia de entre un 5 y un 15 %.

Carga desigual: la carga excéntrica puede desviar los resultados entre un 2 y un 5 %.

10 factores influyentes

10.1 Tamaño de grano:

Los granos finos ($0,2-0,5\ \mu\text{m}$) tienen una resistencia a la flexión de 2200-2500 MPa, los granos gruesos ($>5\ \mu\text{m}$) tienen una resistencia a la flexión de 1800-2000 MPa.

10.2 Contenido de cobalto

El contenido de cobalto es del 6 al 15 %. A medida que aumenta el contenido, la resistencia a la flexión disminuye ligeramente (5-10 %), pero la tenacidad aumenta.

10.3 Porosidad

Una porosidad $> 0,1\%$ reducirá la resistencia entre un 10 y un 20 %, y la densidad debe controlarse a $> 99,5\%$.

10.4 Calidad de la superficie

Los arañazos o microfisuras provocan una concentración de tensiones locales y una reducción de la resistencia del 5-10%.

10.5 Condiciones de prueba

La temperatura alta ($>200\ ^\circ\text{C}$) reduce la resistencia entre un 5 y un 15 %. La humedad afecta en $<2\%$.

11 Aplicación de los resultados de las pruebas

11.1 Clasificación del rendimiento

Resistencia a la flexión $>2200\ \text{MPa}$: adecuado para herramientas de alta dureza.

Resistencia a la flexión 1800-2200 MPa: adecuado para moldes de tenacidad media y alta.

11.2 Optimización del proceso.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Una baja resistencia indica granos gruesos o alta porosidad. Ajuste los parámetros de sinterización (1350-1450 °C).

11.3 Control de calidad

Verifique si la resistencia a la flexión cumple con los requisitos de diseño, como el objetivo YG6 de 2300 ± 100 MPa.

11.4 Ejemplo

En el corte, la resistencia a la flexión de YG8 2100 MPa garantiza una vida útil de la herramienta de >3 horas.

12 notas

12.1 Calibración del instrumento

Antes de realizar la prueba, calibre la máquina de prueba con un error de $\leq \pm 0,5$ %.

12.2 Calidad de la barra de prueba

Asegúrese de que la barra de prueba esté libre de defectos y que la desviación dimensional sea $\leq \pm 0,1$ mm.

12.3

La temperatura de la sala de prueba se controla entre 20 y 25 °C y la humedad es ≤ 60 %.

12.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el funcionamiento para evitar salpicaduras debido a la rotura de la varilla de prueba.

13 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos de resistencia a la flexión

Tabla A.1 Resistencia a la flexión de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Resistencia a la flexión (MPa)
YG6	6	1-2	2200-2400
YG8	8	2-3	2000-2200
YG10	10	2-4	1800-2000

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

$\pm 0,5$ % El error de carga afecta la resistencia < 1 %.

B.2 Una

porosidad defectuosa de la barra de prueba del 0,1 % da como resultado una disminución del 10 %

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 la resistencia.

B.3 Influencias ambientales Una temperatura elevada de 200 °C provoca una disminución de la resistencia del 5-15 %.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar flexión de cuatro puntos para mejorar la uniformidad de la tensión y reducir el impacto de los defectos superficiales.

C.2 Utilizar mecanizado CNC de alta precisión para garantizar que la desviación del tamaño de la varilla de prueba sea $\leq \pm 0,05$ mm. C.3 Introducir pruebas ultrasónicas para detectar microfisuras internas.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba de resistencia a la flexión del carburo cementado YG8

Muestra Nº	Ancho (mm)	Altura (mm)	Distancia (mm)	Carga de rotura (N)	Resistencia a la flexión (MPa)	Valor medio (MPa)
YG8-001	6.02	2.01	20	4500	2110	2090
YG8-002	6.01	2.00	20	4400	2070	2090
YG8-003	6.00	2.02	20	4600	2140	2090

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



GB/T 7997-2017 Método de prueba de dureza para carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo para la dureza de materiales y productos de carburo cementado. Este método es aplicable a carburos cementados (como YG6, YG8, etc.) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante, y se utiliza para medir la dureza mediante el método de dureza Vickers (HV) o dureza Rockwell (HRA). Este método puede emplearse para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación de productos y las pruebas de rendimiento en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a carburos cementados no basados en cobalto ni a materiales no metálicos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 230.1 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo

GB/T 231.1 Ensayo de dureza Brinell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

GB/T 3850 Método de determinación de la coercitividad del carburo cementado

ISO 3738-1:1982 Método de ensayo para la dureza Vickers 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

ISO 6507-1:2005 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Dureza

La capacidad del carburo cementado para resistir la indentación o el rayado, generalmente expresada en dureza Vickers (HV) o dureza Rockwell (HRA).

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 La dureza Vickers (HV)

es el valor de dureza que se calcula presionando un penetrador de diamante tetraédrico regular en la superficie de la muestra bajo una carga específica y midiendo la longitud diagonal de la sangría.

3.4 La dureza Rockwell (HRA)

es el valor de dureza que se calcula presionando un cono de diamante en la superficie de una muestra bajo una carga específica y midiendo la profundidad de penetración.

4 Principio

La prueba de dureza de carburo cementado aplica una carga específica, mide el tamaño o la profundidad de la sangría en la superficie del material bajo la acción del penetrador y calcula el valor de dureza.

Dureza Vickers (HV)

Utilice un indentador de diamante tetraédrico regular (ángulo de vértice de 136°) para formar una hendidura cuadrada bajo carga y mida la longitud diagonal. La fórmula de cálculo es:

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

F : carga de prueba (N);

d: Longitud diagonal media de la sangría (mm).

Dureza Rockwell (HRA)

Se utilizó un indentador cónico de diamante (ángulo de ápice de 120°, radio superior de 0,2 mm) para aplicar la carga inicial (98,07 N) y la carga total (588,4 N), y se midió la diferencia de profundidad de la indentación. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$HRA = 100 - \frac{h}{0.002}$$

Donde: h: Diferencia de profundidad de penetración entre la carga inicial y la carga total (mm).

5. Instrumentos y equipos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.1 Probador de dureza Vickers

Rango de carga: 49,03 N (5 kgf), 98,07 N (10 kgf), 294,2 N (30 kgf).

Precisión: $\pm 0,5$ % de error de carga, error de medición del microscopio $\pm 0,001$ mm.

5.2 Probador de dureza Rockwell

Cumple con GB/T 230.1, escala A, carga 588,4 N (60 kgf).

Precisión: $\pm 0,5$ HRA.

5.3 Bloque de prueba

Bloques de prueba de dureza estándar para calibración de instrumentos, desviación $< \pm 1$ HRA o ± 10 HV.

5.4 Muela de diamante

Se utiliza para pulir superficies de muestra, rugosidad de superficie $Ra \leq 0,2 \mu\text{m}$.

5.5 Microscopio

Aumento 100x-500x, utilizado para medir el tamaño de la sangría.

5.6 Caja de temperatura constante

La temperatura del ambiente de prueba se controló a 20-25 °C y la humedad fue $< 60\%$.

6. Muestras

6.1 Requisitos de la muestra

Forma: Muestra plana, espesor ≥ 2 mm, área superficial $\geq 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$.

Estado de la superficie: Pulido a $Ra \leq 0,2 \mu\text{m}$, libre de grietas ($< 5 \mu\text{m}$), poros (porosidad $< 0,05\%$) o capa de óxido.

Homogeneidad: desviación de la composición $< 0,1$ % en peso, fluctuación del tamaño del grano < 5 %.

Cantidad: No menos de 3 ejemplares por lote.

6.2 Preparación de la muestra

Cortar las muestras a partir de piezas en bruto de carburo o productos terminados para evitar introducir tensión ($< 100 \text{ MPa}$).

Pula la superficie con una muela de diamante para garantizar una planitud de $< 0,01 \text{ mm}$.

Las muestras se lavaron con etanol, se secaron y se colocaron en un desecador.

7 Métodos de prueba

7.1 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: 20-25°C, fluctuación de temperatura $< \pm 2^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humedad relativa: <60%, evitar la absorción de humedad por la muestra.

Calibración del instrumento: Calibrado utilizando bloques de prueba estándar, desviación $\leq \pm 1$ HRA o ± 10 HV.

7.2 Prueba de dureza Vickers

7.2.1 Selección de carga

Carga normal: 294,2 N (30 kgf).

Si la muestra es delgada (<3 mm), se pueden utilizar 98,07 N (10 kgf).

7.2.2 Pasos de prueba

Coloque la muestra sobre la mesa del durómetro, asegurándose de que la superficie esté nivelada.

Seleccione una carga, aplíquela y manténgala presionada durante 10 a 15 segundos.

Mida las longitudes de las dos diagonales de la sangría y tome el valor promedio (precisión $\pm 0,001$ mm).

Se probarán 3 puntos en cada muestra y la distancia entre los centros de las hendiduras adyacentes deberá ser ≥ 5 veces la longitud diagonal.

Calcula el valor HV y mantén el número entero.

7.3 Prueba de dureza Rockwell

7.3.1 Selección de carga

Carga total: 588,4 N (60 kgf).

Carga inicial: 98,07 N (10 kgf).

7.3.2 Pasos de prueba

Coloque la muestra sobre la mesa del durómetro, asegurándose de que la superficie esté nivelada.

Aplique la carga inicial y luego aplique la carga total después de que el puntero se estabilice y manténgala así durante 5 a 10 segundos.

Retire la carga total y lea el valor HRA.

Se probaron 3 puntos en cada muestra y la distancia entre los centros de las hendiduras adyacentes fue ≥ 2 mm.

Calcule el valor promedio de HRA y mantenga 1 decimal.

7.4 Procesamiento de datos

Se toman tres puntos de prueba como valor de dureza final.

Si la desviación de un solo punto es $> 5\%$ (por ejemplo, desviación HRA $> 0,5$ o desviación HV > 50), retírela y vuelva a realizar la prueba.

8 Resultados Expresión

La dureza Vickers se expresa en HV y se expresa en números enteros (como HV 1500).

La dureza Rockwell se expresa como HRA, con un decimal (por ejemplo, HRA 91,5).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 7997-2017; b) Descripción de la muestra: marca, lote, tamaño; c) Método de prueba: dureza Vickers o Rockwell; d) Condiciones de prueba: temperatura, humedad, carga; e) Modelo del instrumento y estado de calibración; f) Resultados: valor medio de dureza, desviación estándar; g) Fecha de prueba: como por ejemplo 21 de mayo de 2025; h) Probador: firma.

9 Precisión y sesgo

9.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de dureza medida por el mismo operador y el mismo equipo es $<2\%$ (por ejemplo, HRA $<0,2$, HV <30).

Reproducibilidad: La desviación de dureza entre diferentes laboratorios es $<5\%$.

9.2 Sesgo

Error del instrumento: $\pm 0,5\%$ Influencia del error de carga $<1\%$.

Superficie de la muestra: Una rugosidad $R_a > 0,2\ \mu\text{m}$ supone una subestimación de la dureza del 2-3 %.

Error operativo: El resultado puede desviarse entre un 1 y un 2 % si el penetrador no está vertical o el tiempo de carga es insuficiente.

10 factores influyentes

10.1 Tamaño de grano

Los granos finos ($0,2-0,5\ \mu\text{m}$) tienen mayor dureza (HRA 91-93), mientras que los granos gruesos ($>5\ \mu\text{m}$) tienen menor dureza (HRA 88-90).

10.2 Contenido de cobalto

El aumento del contenido de cobalto (6-15%) disminuye la dureza (HRA disminuye en 1-2 unidades) debido a la fase aglutinante más blanda.

10.3 Porosidad

Una porosidad $> 0,1\%$ reducirá la dureza entre un 3 y un 5 %, y la densidad debe controlarse a $> 99,5\%$.

10.4 Calidad de la superficie

Los arañazos o microgrietas pueden provocar fluctuaciones locales de la dureza del 2-3%.

10.5 Condiciones de prueba

Las altas temperaturas ($>200\ ^\circ\text{C}$) reducen la dureza entre un 1 % y un 3 %. La humedad afecta la dureza en $<1\%$.

11 Aplicación de los resultados de las pruebas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11.1 Clasificación del rendimiento

HRA >91: Adecuado para herramientas de alta dureza (como brocas para PCB, vida útil >4 horas).
HRA 88-91: Adecuado para moldes de alta tenacidad (como brocas de minería, vida útil >200 horas).

11.2 Optimización del proceso.

Una dureza baja indica granos gruesos o un contenido de cobalto demasiado alto. Ajuste los parámetros de sinterización (1350-1450 °C) o añada inhibidores de grano (como VC 0,2-0,5 % en peso).

11.3 Control de calidad

Verifique que la dureza cumpla con los requisitos de diseño, como el objetivo YG6 HRA $91 \pm 0,5$.

11.4 Ejemplo

En el corte de acero de aviación, la herramienta YG8 HRA 90.5 garantiza resistencia al desgaste y una vida útil de 3,5 horas.

12 notas

12.1 Calibración del instrumento

Antes de realizar la prueba, calibre el probador de dureza a una desviación de $< \pm 1$ HRA o ± 10 HV.

12.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que la superficie de la muestra esté pulida con una rugosidad $Ra \leq 0,2 \mu m$.

12.3

La temperatura de la sala de prueba se controla entre 20 y 25 °C y la humedad es $< 60 \%$.

12.4 Protección de seguridad

Evite salpicaduras del cabezal de presión durante el funcionamiento y use gafas protectoras.

13 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos de dureza

Tabla A.1 Dureza de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell (HRA)
YG6	6	1-2	1500-1600	90,5-91,5
YG8	8	2-3	1400-1500	89.0-90.0
YG10	10	2-4	1300-1400	88.0-89.0

Apéndice B Análisis de errores

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

B.1 Error del instrumento

±0,5 % El error de carga afecta la dureza <1 %.

B.2 La rugosidad superficial

de la muestra Ra 0,4 μm hace que la dureza se subestime en un 2%.

B.3 Influencias ambientales

Una temperatura elevada de 200 °C provoca que la dureza disminuya entre un 1 y un 3 %.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Se utiliza un durómetro micro-Vickers, adecuado para analizar áreas pequeñas.

C.2 Se utiliza tecnología de nanoindentación para mejorar la precisión del ensayo de dureza (error <0,5%). C.3 Se introduce un sistema de ensayo de dureza en línea para mejorar la eficiencia de la producción.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de la prueba de dureza de carburo cementado YG8

Muestra Nº	Carga(N)	Diagonal de sangría (mm)	Dureza Vickers (HV)	Dureza Rockwell (HRA)	HRA promedio
YG8-001	294.2	0.135	1450	89.8	89.7
YG8-002	294.2	0.138	1420	89.5	89.7
YG8-003	294.2	0.136	1440	89.7	89.7

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



GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la densidad del carburo cementado. Este método es aplicable a materiales y productos de carburo cementado (como YG6, YG8 y otros grados) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante. La densidad (unidad: g/cm^3) se determina mediante el método de desplazamiento de líquido o de gas. Este método se puede utilizar para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación de productos y las pruebas de rendimiento en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a materiales que contengan porosidad significativa o inclusiones no metálicas.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

GB/T 3851-2015 Barra de prueba de resistencia a la flexión de carburo cementado

GB/T 1423 Método para la determinación de la densidad de materiales metálicos

ISO 3369:2006 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

Especificación ISO 3696 para agua para laboratorios analíticos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Densidad:

Masa de carburo cementado por unidad de volumen, expresada en g/cm³, que refleja la densidad y la uniformidad de la composición del material.

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 Método de desplazamiento de líquido:

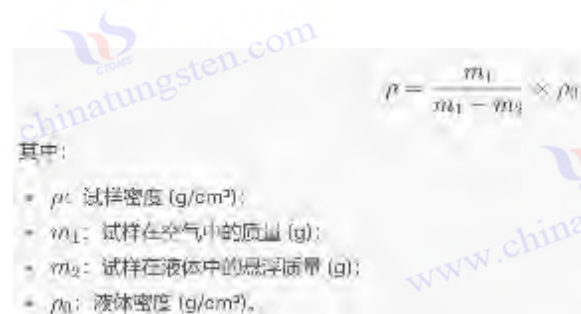
Este método utiliza el principio de Arquímedes para determinar el volumen de una muestra desplazándola con un líquido (generalmente agua o etanol).

3.4 Método de desplazamiento de gas:

Un método para medir el volumen de la muestra desplazando un gas inerte (como el helio).

4 Principio

La determinación de la densidad del carburo cementado se basa en la relación entre la masa y el volumen. El método de desplazamiento de líquido utiliza el principio de Arquímedes para calcular el volumen y la densidad midiendo la masa de la muestra en el aire y la masa suspendida en el líquido.



其中:

- ρ : 试样密度 (g/cm³);
- m_1 : 试样在空气中的质量 (g);
- m_2 : 试样在液体中的悬浮质量 (g);
- ρ_0 : 液体密度 (g/cm³).

El método de reemplazo de gas utiliza la diferencia de volumen del gas inerte dentro y fuera de la muestra para calcular el volumen de la muestra y luego determinar la densidad en función de la masa. La porosidad y la adsorción superficial afectarán los resultados, por lo que las condiciones de prueba deben controlarse estrictamente.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Balanza analítica

Precisión $\pm 0,0001$ g, utilizada para medir la masa de la muestra.

Equipado con un dispositivo de suspensión, adecuado para la reposición de líquidos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Densímetro

Medidor de densidad por desplazamiento de líquido, precisión $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Medidor de densidad de desplazamiento de gas (como el medidor de densidad de helio), precisión $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$.

5.3 Baño de agua a temperatura constante

El rango de control de temperatura es de $20\text{-}25^\circ\text{C}$, con una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

5.4 Limpiador ultrasónico

Se utiliza para limpiar la superficie de la muestra y eliminar manchas y burbujas de aceite.

5.5 Vaso de precipitados o probeta graduada

Capacidad 50 mL o 100 mL, de acuerdo con ISO 4788.

5.6 Horno de secado

Temperatura 105°C , utilizada para el secado de la muestra.

6 reactivos

6.1 Agua desionizada

Cumple con la norma ISO 3696 de agua primaria, densidad $0,9982 \text{ g/cm}^3$ (20°C).

6.2 Etanol

Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, densidad $0,7893 \text{ g/cm}^3$ (20°C).

6.3 Gases inertes

Helio de alta pureza (99,999 %), utilizado para el método de sustitución de gas.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Forma: cubo, cilindro o bloque irregular, longitud lateral o diámetro $\geq 5 \text{ mm}$, masa $\geq 5 \text{ g}$.

Estado de la superficie: Superficie lisa, libre de grietas ($< 5 \mu\text{m}$), poros (porosidad $< 0,05\%$) o manchas de aceite, pulida si es necesario.

Homogeneidad: desviación de la composición $< 0,1 \%$ en peso, fluctuación del tamaño del grano $< 5 \%$.

Cantidad: No menos de 3 ejemplares por lote.

7.2 Preparación de la muestra

Cortar las muestras a partir de piezas en bruto de carburo o productos terminados para evitar introducir tensión ($< 100 \text{ MPa}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilice una muela de diamante o una pulidora para procesar la superficie, con una rugosidad $Ra \leq 0,4 \mu m$.

Las muestras se limpiaron ultrasónicamente en etanol durante 5 minutos, se secaron ($105^{\circ}C$, 30 minutos) y se enfriaron a temperatura ambiente.

8 Métodos de prueba

8.1 Método de reposición de líquidos

8.1.1 Condiciones de prueba

Temperatura del líquido: $20 \pm 0,5^{\circ}C$, registre la densidad del líquido (agua $0,9982 g/cm^3$, etanol $0,7893 g/cm^3$).

Humedad ambiente: $<60\%$.

8.1.2 Pasos de prueba

Pesar la masa de la muestra en el aire con una precisión de $\pm 0,0001 g$.

La muestra se suspende en un alambre delgado, se sumerge en agua desionizada o etanol y se pesa la masa suspendida.

Asegúrese de que no haya burbujas adheridas a la muestra y elimínelas con ultrasonido si es necesario.

Repita la medición 3 veces y tome el valor promedio.

Calcular la densidad: $\rho = \frac{m_1}{V} \times \rho_0$

8.2 Método de desplazamiento de gas

8.2.1 Condiciones de prueba

Temperatura: $20 \pm 0,5^{\circ}C$, presión estable.

Calibración del instrumento: Calibre utilizando muestras estándar.

8.2.2 Pasos de prueba

Coloque la muestra en la cámara de muestras del densímetro y séllela.

Se introduce helio de alta pureza y se mide el volumen de la muestra (precisión $\pm 0,01 cm^3$).

Pesar la masa de la muestra (m_1) con una precisión de $\pm 0,0001 g$.

Calcular la densidad: $\rho = \frac{m_1}{V}$

Donde V es el volumen medido por el desplazamiento del gas (cm^3).

Repita la medición 3 veces y tome el valor promedio.

8.3 Procesamiento de datos

Se tomaron tres muestras como resultado final.

Si la desviación de un solo punto es $>0,5\%$ (por ejemplo, $14,90 g/cm^3$ cambia a $15,00 g/cm^3$), elimínela y vuelva a calcular.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las desviaciones estándar se informan dentro de $\pm 0,1\%$.

9 Resultados Expresión

se expresa en g/cm^3 con 2 decimales (p. ej. $14,95 \text{ g/cm}^3$).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 3850-2015; b) Descripción de la muestra: marca, lote, tamaño; c) Método de prueba: método de desplazamiento de líquido o método de desplazamiento de gas; d) Condiciones de prueba: temperatura, humedad, tipo de líquido/gas; e) Modelo del instrumento y estado de calibración; f) Resultados: valor medio de densidad, desviación estándar; g) Fecha de prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; h) Probador: firma.

10 Precisión y sesgo

10.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de densidad medida por el mismo operador y el mismo equipo es $< 0,2\%$.

Reproducibilidad: La desviación de densidad entre diferentes laboratorios es $< 0,5\%$.

10.2 Sesgo

Error del instrumento: $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ (método líquido), $\pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ (método de gas).

Superficie de la muestra: La adhesión de burbujas o manchas de aceite hacen que la densidad se subestime entre un $0,1$ y un $0,3 \%$.

Temperatura del líquido: $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ La desviación de temperatura afecta la densidad en $< 0,02 \%$.

11 Factores influyentes

11.1 Porosidad

Una porosidad $> 0,1 \%$ reducirá la densidad entre $0,2$ y $0,5 \text{ g/cm}^3$ y la densidad debe controlarse a $> 99,5 \%$.

11.2 Contenido de cobalto

El aumento del contenido de cobalto (6-15%) aumenta la densidad (aproximadamente $0,1 \text{ g/cm}^3$ / $5\% \text{ Co}$), pero se ve afectado por el equilibrio de carbono.

11.3 Tamaño del grano

Los granos finos ($0,2$ - $0,5 \text{ }\mu\text{m}$) tienen una densidad ligeramente mayor ($< 0,1 \text{ g/cm}^3$), mientras que los granos gruesos ($> 5 \text{ }\mu\text{m}$) tienen una densidad menor debido a la influencia de los poros.

11.4 Estado de la superficie

Una superficie sin pulir o con microgrietas provoca fluctuaciones de densidad de $0,05$ - $0,1 \text{ g/cm}^3$.

11.5 Condiciones de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La temperatura alta ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}$) o la humedad ($>70\%$) pueden provocar cambios en la densidad del líquido en $<0,1\%$.

12 Aplicación de los resultados de las pruebas

12.1 Control de calidad

Verifique que la densidad cumpla con los requisitos de diseño, como por ejemplo que el objetivo de YG6 es $14,90 \pm 0,10\text{ g/cm}^3$.

12.2 Optimización del proceso.

Una baja densidad indica una sinterización insuficiente o una porosidad alta. Ajuste la temperatura ($1350\text{-}1450\text{ }^{\circ}\text{C}$) o la presión.

12.3 Predicción del rendimiento

Una densidad $> 14,8\text{ g/cm}^3$ corresponde a una dureza alta ($\text{HRA} > 90$), mientras que una densidad $< 14,5\text{ g/cm}^3$ indica una tenacidad reducida.

12.4 Ejemplo

En la producción de brocas para perforaciones en aguas profundas, la densidad YG8 de $14,70\text{ g/cm}^3$ garantiza una dureza HRA 90 y una vida útil de >300 horas.

13 Notas

13.1 Calibración del instrumento

Antes de realizar la prueba, calibre el densímetro a una desviación de $< \pm 0,01\text{ g/cm}^3$.

13.2 Calidad de la muestra

: Asegúrese de que la muestra no tenga burbujas adheridas y que la superficie esté pulida.

13.3 La temperatura de la sala de prueba se controla entre

$20\text{ y }25\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la humedad es $<60\%$.

13.4 Protección de seguridad

Evite salpicaduras de líquidos durante el funcionamiento y use gafas protectoras.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Valores típicos de densidad

Tabla A.1 Densidad de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Densidad (g/cm^3)
YG6	6	1-2	14.85-14.95
YG8	8	2-3	14.65-14.75

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Densidad (g/cm^3)
YG10	10	2-4	14.40-14.50

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento:

$\pm 0,01 \text{ g}/\text{cm}^3$ (método líquido), $\pm 0,001 \text{ g}/\text{cm}^3$ (método de gas).

B.2 Una

porosidad defectuosa de muestra del 0,1 % da como resultado una caída de densidad de $0,2 \text{ g}/\text{cm}^3$.

B.3 La influencia ambiental

de la temperatura $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ provoca una desviación de densidad $< 0,02 \%$.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilice un densímetro de gases de alta precisión con un error de $< \pm 0,0005 \text{ g}/\text{cm}^3$. C.2

Utilice secado al vacío para eliminar las burbujas superficiales y mejorar la consistencia de la medición. C.3 Introduzca la tomografía de rayos X (TC) para detectar poros internos.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de la prueba de densidad de carburo cementado YG8

Muestra N°	Calidad del aire (g)	Masa suspendida (g)	Densidad (g/cm^3)	Valor medio (g/cm^3)
YG8-001	5.123	4.578	14.72	14.70
YG8-002	5.126	4.582	14.69	14.70
YG8-003	5.125	4.580	14.70	14.70

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 18376-2014 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de preparación, observación y evaluación de la microestructura del carburo cementado. Este método es aplicable a materiales y productos de carburo cementado (como YG6, YG8 y otros grados) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante. Las características de la microestructura, incluyendo el tamaño de grano, la composición de la fase, la porosidad y los defectos, se analizan mediante microscopio óptico o microscopio electrónico de barrido (MEB). Este método puede utilizarse para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación del producto y la evaluación del rendimiento en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a carburos cementados no basados en cobalto ni a materiales no metálicos.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 3848 Determinación del contenido de cobalto en carburo cementado

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 13298-2015 Métodos de inspección de microestructura de metales

GB/T 4338 Método de corrosión de microestructura metálica

ISO 4499-2:2008 Métodos de ensayo para la microestructura del carburo cementado Parte 2: Análisis cuantitativo de fases

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

Especificación ISO 3696 para agua para laboratorios analíticos

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Microestructura

Las características estructurales del carburo cementado a escala microscópica, incluido el tamaño del grano, la distribución de fases, los poros y los defectos.

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 Tamaño del grano

El diámetro promedio de los granos de la fase dura (WC), generalmente en μm .

3.4 Porosidad:

La fracción de volumen de poros en el carburo cementado, que refleja la densidad del material, con la unidad de %.

La fase 3,5 η (fase Eta)

es una fase frágil que se forma debido a un contenido insuficiente de carbono. Su fórmula química es $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$, lo que puede afectar el rendimiento.

3.6 Carbono libre:

Carbono precipitado debido al contenido excesivo de carbono, afectando la uniformidad de la microestructura.

4 Principio

La inspección de la microestructura del carburo cementado se realiza mediante la preparación de la muestra, la corrosión y la observación microscópica para analizar sus características estructurales internas. Durante el proceso de preparación, la muestra se corta, se rectifica y se pule. Posteriormente, se analiza la microestructura con un reactivo de ataque (como el reactivo de Murakami) y se observa con un microscopio óptico (100x-1000x) o un microscopio electrónico de barrido (MEB). El tamaño de grano se mide mediante el método de sección transversal, y la porosidad y la composición de fases se evalúan cuantitativamente mediante análisis de imagen. Las características microestructurales están estrechamente relacionadas con el proceso de sinterización, el balance de carbono y los defectos, y pueden reflejar las propiedades del material.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Microscopio óptico

Aumento 100x-1000x, equipado con sistema de análisis de imágenes, precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

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

5.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La resolución es $\leq 0,1 \mu\text{m}$ y se utiliza un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) para el análisis de fase.

5.3 Máquina de corte

Equipado con rueda de corte de diamante y lubricación por refrigerante para evitar daños térmicos.

5.4 Máquina de rectificado y pulido

Equipado con papel de lija de SiC (#200-#1200) y suspensión de diamante (tamaño de partícula 1-3 μm), rugosidad superficial $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Limpiador ultrasónico

Se utiliza para la limpieza de muestras y la eliminación de materiales de molienda residuales.

5.6 Caja de temperatura constante

Controle la temperatura de secado a 105°C con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$.

6 reactivos

6.1 Agua desionizada

Cumple con la norma de agua ISO 3696 Grado 1.

6.2 Reactivo de Murakami

Fórmula: $10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$, tiempo de corrosión 5-30 segundos, dependiendo de la reacción de la muestra.

6.3 Etanol

Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, utilizado para limpieza.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Forma: rectangular o cilíndrica, tamaño $\geq 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, masa $\geq 5 \text{ g}$.

Estado de la superficie: sin grietas ($< 5 \mu\text{m}$), poros (porosidad $< 0,05\%$) ni capa de óxido.

Homogeneidad: desviación de la composición $< 0,1 \%$ en peso, fluctuación del tamaño del grano $< 5 \%$.

Cantidad: No menos de 3 muestras por lote, altamente representativo.

7.2 Preparación de la muestra

Corte: El corte se realiza con una muela de diamante perpendicular a la dirección de sinterización, lubricada con refrigerante, a una velocidad de $< 500 \text{ rpm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Esmerilado: utilice papel de lija de SiC n.º 200, n.º 400, n.º 800 y n.º 1200 en secuencia, aplique una presión de 20 a 30 N y el tiempo es de 2 a 3 minutos por nivel.

Pulido: utilice una suspensión de diamante de 1-3 µm y un paño de franela durante 5 a 10 minutos, superficie $Ra \leq 0,05 \mu m$.

Limpieza y secado: Limpieza ultrasónica con etanol durante 5 min, secado a 105°C durante 30 min y enfriamiento a temperatura ambiente.

8 Visualización de microestructura

8.1 Corrosión

Utilice el reactivo de Murakami para corroer la superficie de la muestra durante 5 a 30 segundos (WC es marrón, Co es blanco y la fase η es gris), observe la reacción y ajuste el tiempo si es necesario.

Después de la corrosión, enjuague con agua desionizada, deshidrate con etanol y seque inmediatamente.

8.2 Inspección

Asegúrese de que la corrosión sea uniforme, sin sobrecorrosión (límites de grano borrosos) ni subcorrosión (falta de microestructura).

9 Inspección de la microestructura

9.1 Métodos de observación

Microscopio óptico: aumento 500x-1000x, observar tamaño de grano, distribución de fases, poros y defectos.

SEM: aumento 1000x-5000x, combinado con EDS para analizar la composición de fases.

9.2 Medición del tamaño del grano

De acuerdo con el método de sección transversal (ISO 4499-2), se midieron aleatoriamente 100 granos WC en 10 campos de visión y se promedió el diámetro con una precisión de $\pm 0,1 \mu m$.

Informar el tamaño promedio del grano y el rango de distribución.

9.3 Evaluación de la porosidad

Según la norma GB/T 13298-2015, se cuentan y clasifican el número y el área de los poros:

Tipo A: poros pequeños ($<10 \mu m$);

Tipo B: macroporos ($10-25 \mu m$);

Tipo C: agregados ($>25 \mu m$).

Porosidad = $\text{área de poros} / \text{área total} \times 100\%$, mantenga 2 decimales.

9.4 Análisis de la composición de fases

Identifique WC, Co, fase η , carbono libre y analice cuantitativamente el porcentaje de área de cada fase con una desviación de $<1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.5 Inspección de defectos

Detectar grietas e inclusiones (como Fe, Ni) y registrar su ubicación, tamaño y distribución.

10. Expresión del resultado

El tamaño de grano se expresa en μm con un decimal (por ejemplo, 0,8 μm).

La porosidad se expresa en %, con 2 decimales (por ejemplo, 0,05%).

La composición de fases se expresa como porcentaje de área con un decimal (por ejemplo, WC 90,5%).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 18376-2014; b) Descripción de la muestra: marca, lote, tamaño; c) Condiciones de preparación: corte, esmerilado, pulido; d) Condiciones de observación: ampliación, agente corrosivo; e) Resultados: tamaño de grano, porosidad, composición de fases, defectos; f) Fecha de prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

11 Precisión y sesgo

11.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación del tamaño de grano medida por el mismo operador y el mismo equipo es inferior al 5% y la desviación de porosidad es inferior al 0,02%.

Reproducibilidad: La desviación del tamaño de grano medida por diferentes laboratorios es <10% y la desviación de porosidad es <0,05%.

11.2 Sesgo

Error del instrumento: error de medición del microscopio $\pm 0,1 \mu\text{m}$, error SEM <0,01 μm .

Error de preparación: Los araños por pulido o el grabado excesivo pueden sobreestimar el tamaño del grano entre un 5 y un 10 %.

Inhomogeneidad de la muestra: una desviación de la composición >0,1 % en peso provoca una fluctuación de la porosidad del 0,1-0,2 %.

12 Factores influyentes

12.1 Proceso de sinterización

La temperatura (1350-1500 °C) afecta el crecimiento del grano, y >1450 °C da como resultado granos gruesos (>2 μm).

El prensado isostático en caliente (HIP, 150 MPa) redujo la porosidad (<0,01%).

12.2 Balance de carbono

La cantidad insuficiente de carbono forma la fase η (gris, 5-10%), mientras que el exceso de carbono precipita el carbono libre (negro, <2%).

12.3 Tamaño del grano

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los granos finos (0,2-0,5 μm) tienen baja porosidad (<0,05%), mientras que los granos gruesos (>5 μm) tienen alta porosidad (>0,1%).

12.4 Defectos

Las inclusiones (por ejemplo, Fe 0,1 %) provocan porosidad local y grietas que afectan a <0,05 mm.

13 Aplicación de los resultados de las pruebas

13.1 Control de calidad

El tamaño de grano es de 0,5-1,0 μm y la porosidad es <0,05%, lo que cumple con el estándar YG6.

13.2 Optimización de procesos

Porosidad > 0,1% indica sinterización insuficiente, ajuste la temperatura (1400°C) o la presión.

13.3 Predicción del rendimiento

El refinamiento del grano (<0,5 μm) aumenta la dureza (HRA >91), mientras que el aumento de la fase η reduce la tenacidad.

13.4 Ejemplos

Herramienta YG8, tamaño de grano 1,0 μm , porosidad 0,03%, garantiza una vida útil de corte > 3 horas.

14 Notas

14.1 Calibración del instrumento

El microscopio fue calibrado antes de la prueba, con un error de $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$.

14.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que no haya rayones en la superficie de la muestra y que la corrosión sea uniforme.

14.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de pruebas fue de 20-25 °C y la humedad fue <60%.

14.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el funcionamiento para evitar salpicaduras de líquido corrosivo.

15 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Parámetros típicos de microestructura

Tabla A.1 Características microestructurales de los grados comunes de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Contenido de cobalto (%) en peso)	Tamaño de grano (μm)	Porosidad(%)	Composición de la fase principal (%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05	WC 90, Compañía 10
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06	WC 88, Compañía 12
YG10	10	1.0-1.2	0,04-0,07	WC 86, Compañía 14

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

El error de medición del microscopio es de $\pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que afecta el tamaño del grano en $<1\%$.

B.2 Defectos de preparación

La sobrecorrosión hace que la porosidad se sobreestime entre un 0,05 y un 0,1 %.

B.3 Impacto ambiental

La humedad $>70\%$ provoca oxidación de la superficie, afectando el reconocimiento de fases.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar un sistema automático de análisis de imágenes para mejorar la precisión de la medición del tamaño de grano ($<0,05 \mu\text{m}$).

C.2 Utilizar SEM-EDS para detectar trazas de fase η , con un error cuantitativo de $<0,5 \%$.

C.3 Introducir difracción de rayos X (DRX) para verificar la consistencia de la composición de la fase.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de pruebas de microestructura de carburo cementado YG8

Muestra N°	Tamaño de grano (μm)	Porosidad(%)	WC (%)	Co (%)	fase η (%)
YG8-001	0.9	0.04	88.2	11.6	0.2
YG8-002	0.8	0.03	88.5	11.4	0.1
YG8-003	0.9	0.05	88.0	11.8	0.2

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 5314-2011 Polvos para pulvimetalurgia Métodos de muestreo - Composición química

1 Alcance

Esta sección especifica el método para determinar la composición química de polvos para pulvimetalurgia tras el muestreo. Este método es aplicable a polvos metálicos (como polvo de hierro, polvo de cobre, polvo de tungsteno, polvo de cobalto, etc.) y polvos de aleación para pulvimetalurgia, y su objetivo es determinar su composición química mediante análisis químico, incluyendo el contenido de elementos principales (como Fe, Cu, W, Co, etc.) e impurezas (como C, O, S, P, etc.). Este método se puede utilizar para el control de calidad, la aceptación de la producción y la verificación de componentes en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a polvos no metálicos ni a nanopulvos ultrafinos con un tamaño de partícula inferior a 10 μm (se debe consultar GB/T 33822-2017).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 223.1 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Método de titulación para la determinación del contenido de hierro

GB/T 223.3 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Determinación del contenido de fósforo - Método gravimétrico de fosfomolibdato de diantrona

GB/T 223.4 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Determinación del contenido de manganeso - Método de titulación potenciométrica o titulación visual

GB/T 223.5 Métodos de análisis químico para acero y aleaciones - Determinación del contenido de silicio - Método fotométrico de azul de silicio-molibdeno

GB/T 223.9 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Determinación del contenido de azufre - Método de titulación con yodo

GB/T 223.23 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Determinación del contenido de cobalto - Método fotométrico

GB/T 223.58 Métodos de análisis químico para hierro, acero y aleaciones - Determinación del contenido de tungsteno - Método gravimétrico de reducción

GB/T 4336 Método de análisis espectrométrico de emisión atómica por descarga de chispa para acero al carbono y acero de baja aleación

GB/T 5314-2011 Método de muestreo de polvo para pulvimetalurgia

ISO 4490 Principios generales para el muestreo y análisis químico de polvos metálicos

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

3.1 Composición química El porcentaje de masa (

% en peso) de varios elementos en el polvo de pulvimetalurgia, incluidos los elementos principales y los elementos de impureza.

3.2 Muestreo

El proceso de extracción de muestras representativas de un lote de polvo se lleva a cabo de acuerdo con GB/T 5314-2011.

3.3 Elementos de impureza:

oligoelementos como carbono (C), oxígeno (O), azufre (S), fósforo (P), etc. que tienen un efecto adverso en las propiedades del polvo.

3.4 Polvos para pulvimetalurgia

Polvos de metales o aleaciones preparados por atomización, reducción o métodos químicos y utilizados para procesos de prensado y sinterización.

4 Principio

La determinación de la composición química se realiza disolviendo o analizando directamente el polvo tras el muestreo, y mediante análisis químico (como titulación o método de ponderación) o análisis instrumental (como espectroscopia) se determina el contenido de cada elemento. Los elementos principales (como Fe, Cu, W y Co) se cuantifican mediante métodos estándar, mientras que las impurezas (como C y O) se determinan con instrumentos especiales. La calidad y la uniformidad del muestreo afectan directamente la precisión de los resultados, por lo que deben cumplirse estrictamente los requisitos de muestreo de la norma GB/T 5314-2011.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Balanza analítica

Precisión $\pm 0,0001$ g, utilizada para pesar muestras.

5.2 Espectrómetro de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES)

Rango de medición: nivel de ppm a nivel de % en peso, precisión $\pm 0,1\%$.

5.3 Analizador de carbono y azufre

Determinar el contenido de C y S con una precisión de $\pm 0,001$ % en peso.

5.4 Analizador de oxígeno y nitrógeno

Determinar el contenido de O y N con una precisión de $\pm 0,0005$ % en peso.

5.5 Aparato de titulación

Equipado con titulador potenciométrico o titulador automático, precisión $\pm 0,01$ mL.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.6 Horno de alta temperatura

Rango de temperatura 1000-1500°C, utilizado para fusión o combustión de muestras.

5.7 Limpiador ultrasónico

Se utiliza para la limpieza de muestras y la eliminación de contaminación de la superficie.

6 reactivos

6.1 Ácido nítrico (HNO_3)

Grado analítico, concentración 65%-68%.

6.2 Ácido clorhídrico (HCl)

Grado analítico, concentración 36%-38%.

6.3 Ácido sulfúrico (H_2SO_4)

Grado analítico, concentración 95%-98%.

6.4 Solución estándar

Como solución estándar de Fe, Cu, W, Co, concentración 0,01 mol/L, de acuerdo con GB/T 601.

6.5 Agua desionizada

Cumple con la norma de agua ISO 3696 Grado 1.

6.6 Flujo

Como por ejemplo Na_2CO_3 o polvo de Fe, que se utiliza para fundir muestras.

7 Muestreo

7.1 Método de muestreo

Según GB/T 5314-2011, se extraen muestras representativas de lotes de polvo mediante muestreo estratificado o muestreo mecánico.

Puntos de muestreo: mínimo 5 puntos, mezclar y envasar.

7.2 Tamaño de la muestra

Tome entre 50 y 100 g de muestra total de cada lote y entre 0,5 y 2 g de muestra para análisis.

7.3 Almacenamiento de muestras

Conservar en un recipiente hermético para evitar la oxidación o absorción de humedad.

8 Métodos de prueba

8.1 Preparación de la muestra

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pesar 0,5-2 g de polvo (precisión $\pm 0,0001$ g) y colocarlo en un crisol.

Agregue una cantidad adecuada de fundente (por ejemplo, Na_2CO_3 5 g), derrítalo en un horno de alta temperatura a 1000-1200 °C durante 30 minutos y disuélvalo en ácido diluido ($\text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O} = 1:1$) después de enfriar.

El volumen se completó a 100 mL con agua desionizada.

8.2 Determinación de elementos principales

Hierro (Fe): Según el método de titulación GB/T 223.1, precisión $\pm 0,01$ % en peso.

Cobre (Cu): Según el método de titulación de yodo GB/T 223.7, precisión $\pm 0,01$ % en peso.

Tungsteno (W): Según el método de reducción de peso GB/T 223.58, precisión $\pm 0,05$ % en peso.

Cobalto (Co): Según el método fotométrico GB/T 223.23, precisión $\pm 0,02$ % en peso.

8.3 Determinación de elementos de impureza

Carbono (C): utilizando un analizador de azufre de carbono, método de combustión de alta frecuencia, precisión $\pm 0,001$ % en peso.

Azufre (S): Igual que el analizador de azufre de carbono, precisión $\pm 0,0005$ % en peso.

Oxígeno (O): utilizando analizador de oxígeno y nitrógeno, método de absorción infrarroja de fusión, precisión $\pm 0,0005$ % en peso.

Fósforo (P): Según el método de peso de fosfomolibdato de diantrona GB/T 223.3, precisión $\pm 0,001$ % en peso.

8.4 Análisis instrumental (opcional)

Se utilizó ICP-OES para determinar simultáneamente múltiples elementos utilizando el método de curva de calibración con una precisión de $\pm 0,1$ % (elemento principal) y ± 10 ppm (impurezas).

La solución de muestra se inyecta directamente y la longitud de onda de medición se selecciona de acuerdo con el estándar.

8.5 Prueba en blanco

Realice una prueba en blanco de la misma manera, sin agregar muestra, y deduzca el valor del blanco.

8.6 Procesamiento de datos

Como resultado final se tomó el promedio de tres mediciones.

Si la desviación de un solo punto es $> 5\%$ (por ejemplo, Fe 98% cambia a 103%), elimínela y vuelva a calcular.

Los resultados se expresan en % de peso con 2 decimales.

9 Resultados Expresión

La composición química se expresa como porcentaje de masa (wt %) con 2 decimales (por ejemplo, Fe 98,50 %, C 0,02 %).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 5314-2011; b) Descripción de la muestra: tipo de polvo, lote, tamaño

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de partícula; c) Método de muestreo: de acuerdo con GB/T 5314-2011; d) Condiciones de prueba: temperatura, humedad; e) Modelo del instrumento y estado de calibración; f) Resultados: contenido y desviación de cada elemento; g) Fecha de prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; h) Probador: firma.

10 Precisión y sesgo

10.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de la composición medida por el mismo operador y el mismo equipo es $<0,5\%$ (elemento principal) y $<0,01\%$ (impureza).

Reproducibilidad: La desviación de la composición medida por diferentes laboratorios es $<1\%$ (elemento principal) y $<0,02\%$ (impureza).

10.2 Sesgo

Error del instrumento: error ICP-OES $\pm 0,1\%$, error del instrumento de carbono-azufre $\pm 0,001\%$.

Error de muestreo: La no uniformidad provoca una desviación del 0,5-1%.

Contaminación de la muestra: La oxidación de la superficie hace que el contenido de oxígeno se sobreestime entre un 0,01 y un 0,05 %.

11 Factores influyentes

11.1 Distribución del tamaño de partículas

Un tamaño de partícula de $<45\ \mu\text{m}$ se oxida fácilmente y el contenido de oxígeno aumenta entre un 0,02 y un 0,05 %.

11.2 Condiciones de almacenamiento

La humedad alta ($>70\%$) provoca absorción de humedad superficial, lo que afecta la determinación de C y O en un 0,01-0,03%.

11.3 Proceso de fusión

Una temperatura demasiado alta ($>1200\ ^\circ\text{C}$) provoca la volatilización de los elementos (por ejemplo, pérdida de Co del 0,1 %).

11.4 Fuentes de impurezas

La baja pureza de la materia prima (como la impureza de Fe $S > 0,02\%$) afecta los resultados.

12 Aplicación de los resultados de las pruebas

12.1 Control de calidad

Verifique si la composición cumple con las especificaciones, como polvo de Fe $\text{Fe} \geq 98\%$, $\text{C} \leq 0,02\%$.

12.2 Optimización de procesos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un contenido de oxígeno $> 0,1\%$ indica una reducción insuficiente, ajuste la temperatura (800-1000 °C).

12.3 Predicción del rendimiento

Un contenido de S $< 0,01\%$ y un contenido de P $< 0,02\%$ garantizan un rendimiento de sinterización estable.

12.4 Ejemplos

El polvo de tungsteno W $\geq 99,9\%$, O $< 0,05\%$ se utiliza para aleaciones de alta densidad con una densidad de 19,2 g/cm³.

13 Notas

13.1 Calibración del instrumento

El instrumento analítico fue calibrado antes de la prueba, con una desviación de $\leq \pm 0,1\%$.

13.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que las muestras estén libres de contaminación y almacenadas secas.

13.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de pruebas fue de 20-25 °C y la humedad fue $< 60\%$.

13.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el trabajo para evitar salpicaduras de ácido.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Rangos típicos de composición química

Tabla A.1 Composición química de los polvos comunes de pulvimetalurgia

Tipo de polvo	Componente principal (% en peso)	Límite superior de impurezas (% en peso)
Abanico de hierro	Fe $\geq 98,0$	C $\leq 0,02$, O $\leq 0,1$, S $\leq 0,01$
polvo de cobre	Cu $\geq 99,0$	O $\leq 0,1$, Fe $\leq 0,1$
Polvo de tungsteno	W $\geq 99,9$	C $\leq 0,01$, O $\leq 0,05$
polvo de cobalto	Co $\geq 99,5$	Fe $\leq 0,1$, O $\leq 0,1$

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

Error ICP-OES $\pm 0,1\%$, impacto en elementos principales $< 0,1\%$.

B.2 Error de muestreo

La falta de homogeneidad da como resultado una desviación del 0,5-1 % en Fe.

B.3 Impacto ambiental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Una humedad >70% sobreestimó el contenido de O en 0,02%.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar el método de fusión al vacío para reducir la desviación en la determinación del contenido de oxígeno.

C.2 Utilizar ICP-MS de alta precisión para detectar trazas de impurezas (<1 ppm). C.3 Implementar un sistema de muestreo automático para mejorar la uniformidad.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba de composición química del polvo de hierro

Muestra N°	Fe (% en peso)	C (% en peso)	O (% en peso)	S (% en peso)	Fe promedio (% en peso)
Fe-001	98.52	0.015	0.082	0.008	98.50
Fe-002	98.48	0.014	0.080	0.007	98.50
Fe-003	98.50	0.016	0.085	0.009	98.50

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

GB/T 5169-2013 Método de prueba para la porosidad del carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo para la porosidad del carburo cementado. Este método es aplicable a materiales y productos de carburo cementado (como los grados YG6, YG8, etc.) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante. La porosidad (unidad: %) se determina mediante un método metalográfico o un método de análisis de imagen, incluyendo poros de tipo A (poros pequeños), tipo B (poros grandes) y tipo C (agregados). Este método puede utilizarse para el control de calidad en el proceso de producción, la aceptación del producto y la evaluación del rendimiento en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a los carburos cementados que contienen inclusiones no metálicas significativas o carburos que no contienen cobalto.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 18376-2014 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 13298-2015 Métodos de inspección de microestructura de metales

GB/T 4338 Método de corrosión de microestructura metálica

ASTM B276 Determinación de la porosidad aparente del carburo cementado

Método de evaluación de la microestructura del carburo cementado según la norma ISO 4505

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Porosidad.

La fracción volumétrica de poros en el carburo cementado refleja la densidad del material. La unidad es %, y se puede dividir en Tipo A (diámetro $<10\ \mu\text{m}$), Tipo B (diámetro $10\text{--}25\ \mu\text{m}$) y Tipo C (diámetro $>25\ \mu\text{m}$).

3.2 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través del proceso de pulvimetalurgia.

3.3 Método metalográfico:

Método para determinar cuantitativamente la porosidad mediante la preparación de muestras, la corrosión y la observación microscópica.

3.4 Método de análisis de imágenes:

Este método utiliza tecnología de procesamiento de imágenes para extraer datos de poros de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

imágenes de microscopio o microscopio electrónico de barrido (SEM).

4 Principio

La prueba de porosidad del carburo cementado se basa en la observación de la microestructura transversal de la muestra mediante un microscopio óptico o SEM tras su preparación, así como en la identificación y clasificación de los poros (tipo A, B y C). El método metalográfico calcula la porosidad contando, de forma manual o automática, el número y el área de los poros; el método de análisis de imágenes utiliza software para procesar los datos de las imágenes y medir automáticamente la distribución y el porcentaje de poros. La porosidad está estrechamente relacionada con el proceso de sinterización, el balance de carbono y la uniformidad microestructural, y afecta a las propiedades del material.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Microscopio óptico

Aumento 100x-1000x, equipado con sistema de análisis de imágenes, precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La resolución es $\leq 0,1 \mu\text{m}$ y está equipado con un espectrómetro de energía dispersiva (EDS) para el análisis de las características de los poros.

5.3 Máquina de corte

Equipado con rueda de corte de diamante y lubricación por refrigerante para evitar daños térmicos.

5.4 Máquina de rectificado y pulido

Equipado con papel de lija de SiC (#200-#1200) y suspensión de diamante (tamaño de partícula 1-3 μm), rugosidad superficial $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

5.5 Limpiador ultrasónico

Se utiliza para la limpieza de muestras y la eliminación de materiales de molienda residuales.

5.6 Caja de temperatura constante

Controle la temperatura de secado a 105°C con una precisión de $\pm 2^\circ\text{C}$.

6 reactivos

6.1 Agua desionizada

Cumple con la norma ISO 3696 Clase I de agua.

6.2 Reactivo de Murakami

Fórmula: $10 \text{ g K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6] + 10 \text{ g KOH} + 100 \text{ mL H}_2\text{O}$, tiempo de corrosión 5-30 segundos, dependiendo de la reacción de la muestra.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Etanol

Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, utilizado para limpieza.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Forma: rectangular o cilíndrica, tamaño $\geq 10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, masa $\geq 5 \text{ g}$.

Estado de la superficie: sin grietas ($< 5 \mu\text{m}$) ni capa de óxido, porosidad $< 0,5\%$.

Homogeneidad: desviación de la composición $< 0,1 \%$ en peso, fluctuación del tamaño del grano $< 5 \%$.

Cantidad: No menos de 3 muestras por lote, altamente representativo.

7.2 Preparación de la muestra

Corte: El corte se realiza con una muela de diamante perpendicular a la dirección de sinterización, lubricada con refrigerante, a una velocidad de $< 500 \text{ rpm}$.

Esmerilado: utilice papel de lija de SiC n.º 200, n.º 400, n.º 800 y n.º 1200 en secuencia, aplique una presión de 20 a 30 N y el tiempo es de 2 a 3 minutos por nivel.

Pulido: utilice una suspensión de diamante de 1-3 μm y un paño de franela durante 5 a 10 minutos, superficie $R_a \leq 0,05 \mu\text{m}$.

Limpieza y secado: Limpieza ultrasónica con etanol durante 5 min, secado a 105°C durante 30 min y enfriamiento a temperatura ambiente.

8 Visualización de microestructura

8.1 Corrosión

Utilice el reactivo de Murakami para corroer la superficie de la muestra durante 5 a 30 segundos (WC es marrón, Co es blanco y los poros son negros), observe la reacción y ajuste el tiempo si es necesario.

Después de la corrosión, enjuague con agua desionizada, deshidrate con etanol y seque inmediatamente.

8.2 Inspección

Asegúrese de que la corrosión sea uniforme sin sobrecorrosión (límites de grano borrosos) ni subcorrosión (porosidad no revelada).

9 Prueba de porosidad

9.1 Metalografía

Observación: utilice un microscopio óptico con un aumento de 500x-1000x y observe 10 campos de visión aleatorios.

Medición: Cuente manualmente el número de poros tipo A, B y C y mida el área de los poros (precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cálculo: Porosidad = área total de poros/área total del campo × 100%, conservar 2 decimales.

9.2 Análisis de imágenes

Observación: Utilice un microscopio electrónico de barrido (SEM) o un microscopio óptico de alta resolución, aumento 1000x-5000x, tome 10 imágenes.

Análisis: Utilice software de procesamiento de imágenes (como ImageJ) para identificar automáticamente los poros, clasificarlos en tipos A, B y C y calcular el porcentaje de área.

Verificación: Repita la medición 3 veces y calcule el valor promedio. La desviación es <0,02 %.

9.3 Clasificación de poros

Tipo A: diámetro <10 μm, poros pequeños.

Tipo B: 10-25 μm de diámetro, poros grandes.

Tipo C: diámetro >25 μm, agregados.

10. Expresión del resultado

La porosidad se expresa en %, con 2 decimales (por ejemplo, 0,05%).

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: GB/T 5169-2013; b) Descripción de la muestra: marca, lote, tamaño; c) Condiciones de preparación: corte, esmerilado, pulido; d) Método de prueba: método metalográfico o método de análisis de imágenes; e) Resultado: porosidad total y distribución de tipo A, B, C; f) Fecha de prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

11 Precisión y sesgo

11.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de porosidad medida por el mismo operador y el mismo equipo es <0,02%.

Reproducibilidad: La desviación de porosidad entre diferentes laboratorios es <0,05%.

11.2 Sesgo

Error del instrumento: Error de medición del microscopio ±0,1 μm, impacto <0,01%.

Error de preparación: los arañazos por pulido o el grabado excesivo pueden sobreestimar la porosidad en un 0,02-0,05 %.

Inhomogeneidad de la muestra: una desviación de la composición >0,1 % en peso provoca una fluctuación de la porosidad del 0,1 %.

12 Factores influyentes

12.1 Proceso de sinterización

La temperatura (1350-1500°C) afecta la porosidad, y >1450°C aumenta los poros de tipo B y C (>0,1%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El prensado isostático en caliente (HIP, 150 MPa) redujo la porosidad total (<0,01%).

12.2 Balance de carbono

La cantidad insuficiente de carbono forma la fase η , aumentando la porosidad en un 0,05-0,1%; el exceso de carbono precipita el carbono libre, con un impacto de <0,02%.

12.3 Tamaño del grano

Los granos finos (0,2-0,5 μm) tienen baja porosidad (<0,03%), mientras que los granos gruesos (>5 μm) tienen alta porosidad (>0,15%).

12.4 Defectos

Las inclusiones (por ejemplo, Fe 0,1%) conducen a un aumento local de la porosidad de 0,05-0,1%.

13 Aplicación de los resultados de las pruebas

13.1 Control de calidad

Porosidad <0,05% cumple con el estándar YG6 y garantiza una dureza HRA >90.

13.2 Optimización de procesos

Porosidad > 0,1% indica sinterización insuficiente, ajuste la temperatura (1400°C) o la presión.

13.3 Predicción del rendimiento

Una porosidad <0,03% corresponde a una alta resistencia a la flexión (>2000 MPa), >0,1% reduce la tenacidad.

13.4 Ejemplos

Herramienta YG8, porosidad 0,04%, vida útil de corte >3 horas.

14 Notas

14.1 Calibración del instrumento

El microscopio fue calibrado antes de la prueba, con un error de $\leq \pm 0,1 \mu\text{m}$.

14.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que no haya rayones en la superficie de la muestra y que la corrosión sea uniforme.

14.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de pruebas fue de 20-25 °C y la humedad fue <60%.

14.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el funcionamiento para evitar salpicaduras de líquido corrosivo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

15 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Rango típico de porosidad

Tabla A.1 Porosidad de los grados comunes de carburo cementado

Marca	Contenido de cobalto (% en peso)	Tamaño de grano (μm)	Porosidad(%)
YG6	6	0,6-0,8	0,02-0,05
YG8	8	0,8-1,0	0,03-0,06
YG10	10	1.0-1.2	0,04-0,07

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

El error de medición del microscopio es de $\pm 0,1 \mu\text{m}$, lo que afecta la porosidad en $<0,01\%$.

B.2 Defectos de preparación

La sobrecorrosión hace que la porosidad se sobreestime entre un 0,02 y un 0,05 %.

B.3 Impacto ambiental

Una humedad $>70\%$ provoca oxidación de la superficie, afectando la medición en un 0,01%.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar tomografía de rayos X (TC) para detectar la porosidad interna con una precisión $<0,01\%$.

C.2 Utilizar un sistema automático de análisis de imágenes para mejorar la consistencia de la medición de la porosidad. C.3 Introducir un proceso de sinterización al vacío para reducir la porosidad inicial.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba de porosidad del carburo cementado YG8

Muestra N°	Tipo A(%)	Tipo B(%)	Tipo C (%)	Porosidad total (%)	valor promedio (%)
YG8-001	0.02	0.01	0.00	0.03	0.04
YG8-002	0.03	0.01	0.01	0.05	0.04
YG8-003	0.02	0.02	0.00	0.04	0.04

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 12444-2006 Métodos de ensayo para la resistencia al desgaste de metales y aleaciones

1 Alcance

Esta norma especifica el método de ensayo para la resistencia al desgaste de metales y aleaciones. Este método es aplicable a materiales metálicos y aleados (como acero, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, etc.) y sus recubrimientos superficiales. Mediante ensayos de desgaste en condiciones controladas de laboratorio, se evalúa la resistencia al desgaste de los materiales, incluyendo el desgaste por rayado, el desgaste por impacto y el desgaste por deslizamiento. Este método puede utilizarse para la selección de materiales, el control de calidad, la aceptación de la producción y la evaluación de la resistencia al desgaste en investigación y desarrollo.

Esta norma no es aplicable a materiales no metálicos ni al desgaste en entornos extremos (como temperaturas altas $> 1000^{\circ}\text{C}$ o entornos altamente corrosivos).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 6394 Dimensiones de muestras de prueba de metal y métodos de preparación

GB/T 10610 Determinación de la rugosidad superficial de materiales metálicos

GB/T 13298-2015 Métodos de inspección de microestructura de metales

Método de prueba estándar ASTM G65 para la prueba de abrasión de ruedas de caucho/arena seca

ASTM D4060 Método de prueba estándar para la resistencia a la abrasión de recubrimientos orgánicos utilizando el abrasivo Taber

ISO 8251 Determinación de la resistencia al desgaste de recubrimientos de óxido anódico sobre aluminio y sus aleaciones

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Resistencia al desgaste

La capacidad de un metal o aleación para resistir la pérdida de material de la superficie en condiciones de desgaste específicas, generalmente caracterizadas por pérdida de masa, pérdida de volumen o profundidad de desgaste.

3.2 Abrasión de bajo estrés:

desgaste causado por rayones o deslizamientos leves, común en entornos de desgaste de bajo impacto y baja carga.

3.3 Abrasión por alta tensión:

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

Desgaste causado por alta carga o impacto, a menudo acompañado de deformación plástica o fractura de la superficie del material.

3.4 Desgaste por deslizamiento

Pérdida de material causada por la fricción cuando dos superficies se deslizan una respecto de otra.

3.5 Tasa de desgaste

La cantidad de pérdida de material por unidad de tiempo o unidad de distancia de deslizamiento, expresada en g/m o $\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

4 Principio

La resistencia al desgaste de metales y aleaciones se evalúa mediante ensayos de desgaste en condiciones controladas de laboratorio. Los métodos de ensayo incluyen el ensayo de arena seca/rueda de caucho (desgaste de baja tensión), el ensayo de abrasión Taber (desgaste por deslizamiento) y el ensayo de desgaste por impacto, que simulan diferentes mecanismos de desgaste. La resistencia al desgaste se caracteriza midiendo la pérdida de masa, la pérdida de volumen o la profundidad de desgaste de la muestra antes y después del ensayo. Las condiciones de ensayo (como la carga, la velocidad y el tipo de abrasivo) influyen directamente en los resultados y deben controlarse estrictamente.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Balanza analítica

Precisión: $\pm 0,0001 \text{ g}$, se utiliza para pesar la masa de la muestra.

5.2 Máquina de prueba de rueda de caucho/arena seca

Cumple con los requisitos ASTM G65, dureza de la rueda de caucho 60-70 Shore A, caudal de arena 300-400 g/min.

5.3 Probador de abrasión Taber

Cumple con los requisitos de ASTM D4060 con muelas abrasivas CS-17 o H-18, carga de 500 a 1000 g.

5.4 Máquina de prueba de desgaste por impacto

Simula desgaste por alto estrés, frecuencia de impacto 50-100 veces/min, carga 10-50N.

5.5 Microscopio

Aumento 50x-500x, utilizado para observar la morfología del desgaste.

5.6 Probador de rugosidad superficial

Cumple con GB/T 10610, rango de medición R_a 0,01-10 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6 Reactivos y materiales

6.1 Abrasivos estándar

Arena seca: arena de cuarzo natural, tamaño de partícula 50-70 mesh, de acuerdo a ASTM G65.

Ruedas Taber: CS-17 (dureza media) o H-18 (dureza alta).

6.2 Etanol

Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, utilizado para limpieza.

6.3 Agua desionizada

Cumple con la norma de agua ISO 3696 Grado 1.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Forma: Rectangular o circular, dimensiones 76 mm $\times$ 25 mm $\times$ 6 mm (prueba de arena seca/rueda de caucho) o 100 mm de diámetro $\times$ 3 mm de espesor (prueba de Taber).

Estado de la superficie: superficie lisa, sin grietas, rugosidad $R_a \leq 0,8 \mu\text{m}$.

Cantidad: Al menos 3 ejemplares por cada condición.

Homogeneidad: Desviación de composición $< 0,1\%$ en peso.

7.2 Preparación de la muestra

Las muestras se cortaron de acuerdo con GB/T 6394 y las superficies se pulieron con papel de lija de SiC n.º 600-n.º 1200.

Las muestras se limpiaron ultrasónicamente con etanol durante 5 minutos y se pesaron ($\pm 0,0001$ g) después del secado.

8 Métodos de prueba

8.1 Prueba de rueda de caucho/arena seca (desgaste por baja tensión)

8.1.1 Condiciones de prueba

Carga: 130 N.

Caudal de arena: 300-400 g/min.

Tiempo de prueba: 6000 rpm (aproximadamente 30 minutos).

Ambiente: Temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $50 \pm 5\%$.

8.1.2 Pasos de prueba

Fije la muestra en el soporte de la máquina de prueba y ajuste la rueda de goma para que entre en contacto con la muestra.

Inicie el flujo de arena, gire la rueda de goma y registre la masa al comienzo de la prueba (W_1).

Después de la prueba, retire la muestra, límpiela, séquela y pésela (W_2).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Calcular la pérdida de masa: $\Delta W = W_1 - W_2$

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de <5%.

8.2 Prueba de desgaste Taber (desgaste por deslizamiento)

8.2.1 Condiciones de prueba

Muela abrasiva: CS-17 (desgaste medio).

Carga: 1000 g.

Velocidad de rotación: 60 rpm.

Ciclo de prueba: 10000 revoluciones.

Ambiente: Temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $50 \pm 5\%$.

8.2.2 Pasos de prueba

Fije la muestra en el plato giratorio de la máquina de prueba Taber e instale la muela abrasiva.

Registre la masa al inicio de la prueba (W_1).

Ponga en marcha la máquina de prueba, hágala funcionar a 10.000 revoluciones y limpie periódicamente los residuos de molienda.

Después de la prueba, limpie la muestra y pésela (W_2).

Calcular la pérdida de masa: $\text{磨耗指数} = \frac{\Delta W}{\text{测试质量}} \times 1000$

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de <5%.

8.3 Prueba de desgaste por impacto (desgaste por alta tensión)

8.3.1 Condiciones de prueba

Carga: 20 N.

Frecuencia de impacto: 60 veces/min.

Duración de la prueba: 30 minutos.

Ambiente: Temperatura $23 \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $50 \pm 5\%$.

8.3.2 Pasos de prueba

Fije la muestra en el soporte del probador de impacto y ajuste la posición del cabezal de impacto.

Registre la masa al inicio de la prueba (W_1).

Encienda la máquina de prueba, hágala funcionar durante 30 minutos y registre el número de impactos.

Después de la prueba, limpie la muestra y pésela (W_2).

Calcular la pérdida de masa: $\Delta W = W_1 - W_2$

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de <5%.

9 Resultados Expresión

La pérdida de masa se expresa en gramos con cuatro decimales (por ejemplo, 0,0123 g).

El índice de desgaste se expresa en mg/1000 revoluciones, con un decimal (por ejemplo 1,2 mg/1000)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

revoluciones).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 12444-2006; b) Descripción de la muestra: marca del material, tamaño, estado de la superficie; c) Método de prueba: arena seca/rueda de caucho, abrasión Taber o desgaste por impacto; d) Condiciones de prueba: carga, velocidad, tipo de abrasivo; e) Resultado: pérdida de masa o índice de desgaste; f) Fecha de la prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

10 Precisión y sesgo

10.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación de la pérdida de masa medida por el mismo operador y el mismo equipo es <5%.

Reproducibilidad: La desviación de la pérdida de masa medida por diferentes laboratorios es <10%.

10.2 Sesgo

Error del instrumento: error de balanza $\pm 0,0001$ g, influencia <1%.

Desviación abrasiva: la falta de uniformidad del grano provoca que la pérdida de masa fluctúe entre un 2 y un 5 %.

Influencia ambiental: La humedad >60% provoca oxidación superficial, afectando a <2%.

11 Factores influyentes

11.1 Dureza del material

La dureza alta (como HRC >60) tiene buena resistencia al desgaste y reduce la pérdida de masa en un 10-20%.

11.2 Rugosidad de la superficie

Ra >1,0 μm aumenta el desgaste y la pérdida de masa en un 5-10%.

11.3 Propiedades abrasivas

Aumentar el tamaño de las partículas de arena (>70 mallas) aumenta el desgaste y aumenta la pérdida de masa en un 10-15%.

11.4 Condiciones de prueba

Aumentando la carga (130 N a 150 N) la pérdida de masa aumentó entre un 5 y un 8%.

12 Aplicación de los resultados de las pruebas

12.1 Selección de materiales

Pérdida de masa <0,01 g Cumple con los requisitos de alta resistencia al desgaste y es adecuado para equipos de minería.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.2 Optimización de procesos

Una pérdida de masa $> 0,05$ g indica un tratamiento térmico insuficiente y se debe ajustar la temperatura de enfriamiento (900°C).

12.3 Predicción del rendimiento

Un índice de desgaste de $<1,5$ mg/1000 revoluciones corresponde a una vida útil de >10 años.

12.4 Ejemplos

Acero 45#, pérdida de masa de prueba de arena seca 0,008 g, utilizado para cucharón de excavadora, vida útil > 5000 horas.

13 Notas

13.1 Calibración del instrumento

La máquina de prueba se calibró antes de la prueba y la desviación de carga fue $\leq \pm 1\%$.

13.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que la superficie de la muestra esté limpia y tenga una rugosidad uniforme.

13.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de prueba fue de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y la humedad fue de $50 \pm 5\%$.

13.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el trabajo para evitar salpicaduras de arena.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Datos típicos de resistencia al desgaste

Tabla A.1 Pérdida de masa de metales y aleaciones comunes

Material	Métodos de prueba	Pérdida de masa (g)	Índice de desgaste (mg/1000 revoluciones)
Acero 45#	Arena seca/rueda de goma	0.008	-
Acero inoxidable 304	Taber Wear	0.012	1.2
Aleación de aluminio 6061	Desgaste por impacto	0.015	-

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

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 error de balanza es de $\pm 0,0001$ g y la influencia es $<1\%$.

B.2 Desviación abrasiva

La falta de homogeneidad de las partículas de arena hace que la pérdida de masa fluctúe entre el 2 y el 5%.

B.3 Impacto ambiental

La humedad $>60\%$ provoca oxidación de la superficie, afectando a $<2\%$.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar un microscopio láser para medir con precisión la profundidad del desgaste ($<0,01 \mu\text{m}$).

C.2 Utilizar abrasivos estandarizados para reducir la desviación. C.3 Implementar un sistema de monitoreo en tiempo real para mejorar la consistencia de las pruebas.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba de rueda de caucho/arena seca de acero n.º 45

Muestra N°	Masa antes de la prueba (g)	Masa después de la prueba (g)	Pérdida de masa (g)	Valor medio (g)
45#-001	50.1234	50.1156	0.0078	0.0080
45#-002	50.1250	50.1169	0.0081	0.0080
45#-003	50.1242	50.1160	0.0082	0.0080

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

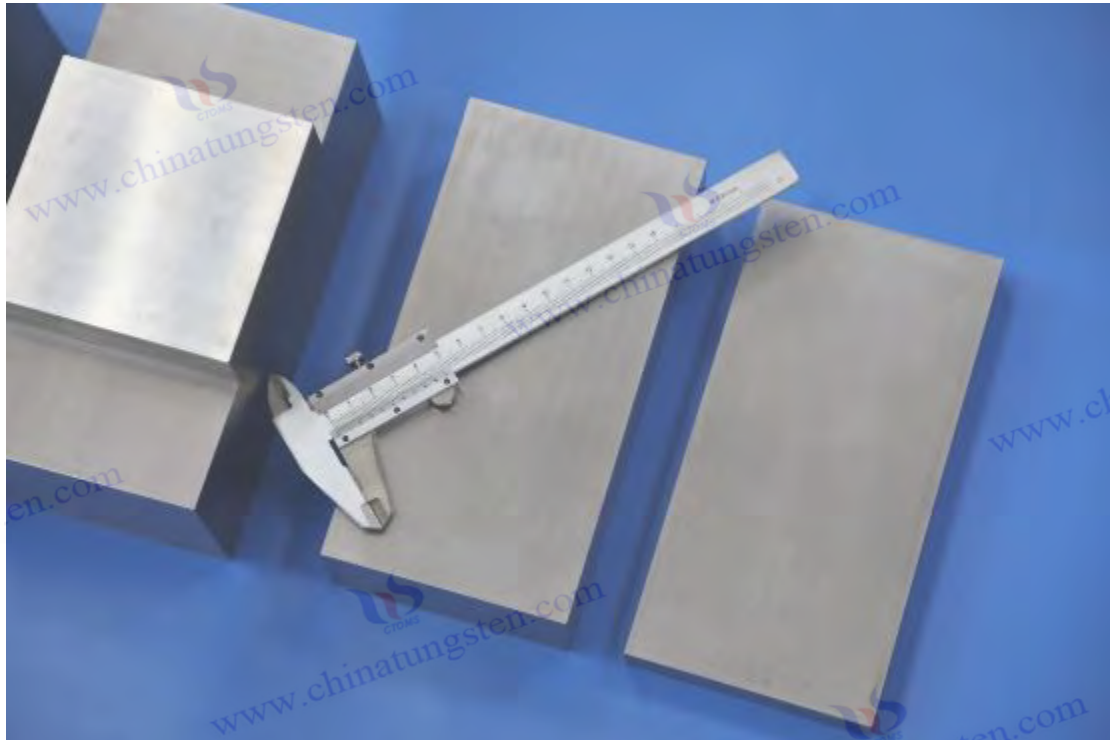
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



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



GB/T 1482-2010 Determinación de la fluidez de polvos metálicos Método del medidor de flujo Hall

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la fluidez de polvos metálicos mediante el método del caudalímetro Hall. Este método es aplicable a polvos metálicos que fluyen libremente a través de un embudo estándar con un diámetro de orificio de 2,5 mm. El tiempo (unidad: segundo) necesario para que 50 g de polvo fluyan a través del embudo estándar se mide para caracterizar su fluidez. Este método puede utilizarse para el control de calidad, la aceptación de la producción y la evaluación de la fluidez en I+D de pulvimetalurgia, fabricación aditiva (como la impresión 3D SLM, el proceso EBM) y campos relacionados.

Esta norma no se aplica a polvos que no fluyen libremente (como polvos ultrafinos con un tamaño de partícula de $<10\ \mu\text{m}$ o polvos altamente adhesivos).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 5314-2011 Método de muestreo de polvo para pulvimetalurgia

GB/T 1479.1-2010 Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos Parte 1: Método del embudo

GB/T 31057.3-2008 Propiedades físicas de materiales granulares Parte 3: Índice de fluidez

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO 4490:2008 Determinación de las propiedades de flujo de polvos metálicos utilizando un embudo calibrado (reómetro Hall)

ASTM B213-17 Método estándar para determinar el caudal de polvos metálicos utilizando un embudo con caudalímetro Hall

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 Fluidiez

La capacidad del polvo metálico de fluir libremente en condiciones específicas, caracterizada por el tiempo (segundos) necesario para que 50 g de polvo fluyan a través de un embudo estándar (tamaño de poro de 2,5 mm), con la unidad de s/50 g.

3.2 Caudalímetro Hall:

Instrumento utilizado para medir la fluidez de polvos metálicos. Consta de un embudo estándar, un recipiente receptor y un cronómetro.

3.3 Polvo Metálico

Partículas de metal o aleación preparadas por atomización, reducción o métodos químicos, utilizadas en pulvimetalurgia o fabricación aditiva.

3.4 Flujo libre:

el polvo puede fluir continuamente a través de un embudo estándar sin ninguna fuerza externa (solo la gravedad).

4 Principio

El método del medidor de flujo Hall caracteriza la fluidez de un polvo metálico midiendo el tiempo que tardan 50 g de polvo en fluir a través de un embudo estándar con un diámetro de orificio de 2,5 mm. La fluidez se ve afectada por las propiedades físicas del polvo, como el tamaño de partícula, la forma, el estado de la superficie, la adhesión y la fricción. Cuanto menor sea el tiempo de flujo, mejor será la fluidez. La prueba debe realizarse en condiciones ambientales controladas para garantizar la repetibilidad y la precisión de los resultados.

5. Instrumentos y equipos

5.1 Medidor de flujo Hall

Embudo: Fabricado en metal no magnético, resistente a la corrosión (como acero inoxidable), con pared interior pulida y rugosidad $Ra \leq 0,4 \mu m$.

Parámetros geométricos del embudo: diámetro superior 60 mm, apertura inferior $2,5 \pm 0,02$ mm, ángulo de cono $60^\circ \pm 0,5^\circ$.

Altura: 100 ± 2 mm desde el orificio inferior hasta la parte superior.

5.2 Contenedor receptor

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Volumen ≥ 100 mL, diámetro ≥ 39 mm, utilizado para recibir el polvo que sale.

5.3 Balanza analítica

Rango de medición ≥ 100 g, precisión $\pm 0,01$ g.

5.4 Cronómetro

Precisión $\pm 0,2$ s, utilizada para cronometraje.

5.5 Limpiador ultrasónico

Para limpiar embudos y recipientes.

5.6 Horno de secado

Rango de control de temperatura $105 \pm 2^\circ\text{C}$ para secado de polvo.

6 reactivos

6.1 Etanol

Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, utilizado para limpieza.

6.2 Agua desionizada

Cumple con la norma de agua ISO 3696 Grado 1.

7 especímenes

7.1 Requisitos de la muestra

Volumen de muestra: al menos 200 g, capaz de fluir libremente a través de un embudo con un poro de 2,5 mm.

Tamaño de partícula: típicamente 10-150 μm , dependiendo del tipo de polvo.

Uniformidad: Desviación de la distribución del tamaño de partícula $< 5\%$, evitar aglomeración o estratificación.

Cantidad: Cada lote se dividirá en 3 porciones después del muestreo, cada porción deberá ser ≥ 50 g.

7.2 Preparación de la muestra

Se tomaron muestras del lote de polvo de acuerdo con GB/T 5314-2011 para garantizar la representatividad.

Coloque la muestra en un horno de secado ($105 \pm 2^\circ\text{C}$) y séquela durante 30 minutos, luego enfríela a temperatura ambiente.

Si hay aceite en la superficie del polvo, utilice una limpieza ultrasónica con etanol durante 5 minutos y úselo después del secado.

8 Métodos de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.1 Condiciones de prueba

Temperatura ambiente: $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

Humedad relativa: $50 \pm 5\%$, evitar que el polvo absorba humedad.

Área de prueba: Sin interferencias del flujo de aire, el instrumento se coloca sobre una superficie horizontal.

8.2 Calibración del instrumento

Compruebe la apertura del embudo ($2,5 \pm 0,02 \text{ mm}$) para asegurarse de que no haya ningún bloqueo o deformación.

El instrumento se calibró con polvo estándar (polvo esférico puro con velocidad de flujo conocida, como tiempo de salida $30 \pm 1 \text{ s/50 g}$) con una desviación de $< \pm 2\%$.

8.3 Procedimientos de prueba

Pesar $50 \pm 0,01 \text{ g}$ de muestra y registrar la masa (m).

Cierre temporalmente el orificio en la parte inferior del embudo con el dedo o un deflector y vierta la muestra en el embudo para asegurarse de que el polvo se distribuya uniformemente.

Ponga en marcha el cronómetro y al mismo tiempo retire el deflector para permitir que el polvo fluya libremente.

Cuando el polvo haya salido completamente (sin residuos en el embudo), detenga el cronometraje y registre el tiempo de salida (t, unidad: segundos).

Cada muestra se midió 3 veces y se tomó el valor promedio con una desviación de $< \pm 2 \text{ s}$.

Si el polvo no puede fluir o está bloqueado a mitad de camino, regístrelo como "incapaz de fluir".

8.4 Procesamiento de datos

La fluidez se expresa como tiempo de salida (s/50 g) con un decimal (por ejemplo, $32,5 \text{ s/50 g}$).

Si la desviación de las tres mediciones fue $> 2 \text{ s}$, se eliminaron los valores atípicos y se repitió la prueba.

9 Resultados Expresión

La fluidez se expresa como tiempo de salida (s/50 g) con un decimal.

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: GB/T 1482-2010; b) Descripción de la muestra: tipo de polvo, lote, distribución del tamaño de partícula; c) Condiciones de prueba: temperatura, humedad; d) Estado del instrumento: apertura del embudo, calibración; e) Resultados: tiempo promedio de salida y desviación; f) Fecha de prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

10 Precisión y sesgo

10.1 Precisión

Repetibilidad: La desviación del tiempo de salida medida por el mismo operador y el mismo equipo es $< \pm 2 \text{ s}$.

Reproducibilidad: La desviación del tiempo de salida medida por diferentes laboratorios es $< \pm 3 \text{ s}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Sesgo

Error del instrumento: desviación de la apertura del embudo $\pm 0,02$ mm, tiempo de impacto $< \pm 1$ s.

Estado del polvo: la absorción o aglomeración de humedad prolongará el tiempo de salida entre 2 y 5 s.

Error operativo: vertido desigual o desviación del tiempo que afecta $< \pm 1$ s.

11 Factores influyentes

11.1 Distribución del tamaño de partículas

Un tamaño de partícula $< 45 \mu\text{m}$ aumenta la adhesión y prolonga el tiempo de salida de 5 a 10 s; un tamaño de partícula $> 150 \mu\text{m}$ tiene buena fluidez y acorta el tiempo de 3 a 5 s.

11.2 Forma de la partícula

Los polvos esféricos (como los producidos por deposición AEM, con un tiempo de flujo de < 35 s/50 g) fluyen mejor que las formas irregulares (5-10 s más).

11.3 Condiciones de la superficie

Una superficie rugosa o bolas satélite (pequeñas partículas adheridas) extenderán el tiempo de salida de 3 a 8 segundos.

11.4 Condiciones ambientales

Una humedad $> 60\%$ hace que el polvo absorba humedad y el tiempo de salida se prolongue entre 2 y 5 s.

11.5 Propiedades del polvo

Una alta adhesión o fricción (como polvos finos o superficies oxidadas) da como resultado un flujo deficiente y es posible que no fluya.

12 Aplicación de los resultados de las pruebas

12.1 Control de calidad

El tiempo de salida < 35 s/50 g cumple con los requisitos del proceso SLM de impresión 3D.

12.2 Optimización de procesos

Un tiempo de salida > 40 s/50 g indica que la forma de la partícula es deficiente y es necesario optimizar el proceso de atomización.

12.3 Predicción del rendimiento

Un tiempo de salida < 30 s/50 g corresponde a un buen rendimiento de distribución uniforme del polvo y a una tasa de defectos de impresión de $< 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12.4 Ejemplos

Polvo de aleación de titanio (Ti-6Al-4V), tiempo de flujo 32,5 s/50 g, utilizado para imprimir piezas de aviación, rugosidad superficial Ra <5 µm.

13 Notas

13.1 Calibración del instrumento

La apertura del embudo y el cronómetro se calibraron antes de la prueba, con una desviación de <±1%.

13.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que la muestra esté seca y libre de aglomerados.

13.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de prueba fue de 23 ± 2 °C y la humedad fue de 50 ± 5 %.

13.4 Protección de seguridad

Evite que salga polvo durante el trabajo y utilice una máscara protectora.

14 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Datos típicos de liquidez

Tabla A.1 Tiempo de flujo de polvos metálicos comunes

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (µm)	Forma de la partícula	Tiempo de flujo (s/50 g)
polvo de aleación de titanio	15-45	esférico	30.0-35.0
Polvo de acero inoxidable	20-63	esférico	28.0-33.0
polvo de cobre	45-100	irregular	35.0-40.0

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

Una desviación de la apertura del embudo de $\pm 0,02$ mm afecta el tiempo de salida en <±1 s.

B.2 Estado del polvo

La absorción de humedad prolonga el tiempo de eflujo de 2 a 5 s.

B.3 Impacto ambiental

Una humedad >60% aumenta el tiempo de efluente en 2-3 s.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar un sistema de cronometraje automático para reducir los errores de cronometraje manual.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C.2 Utilizar un analizador láser de tamaño de partículas para controlar con precisión la distribución del tamaño de las partículas. C.3 Introducir un dispositivo de vibración para mejorar la fluidez de los polvos altamente adhesivos.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

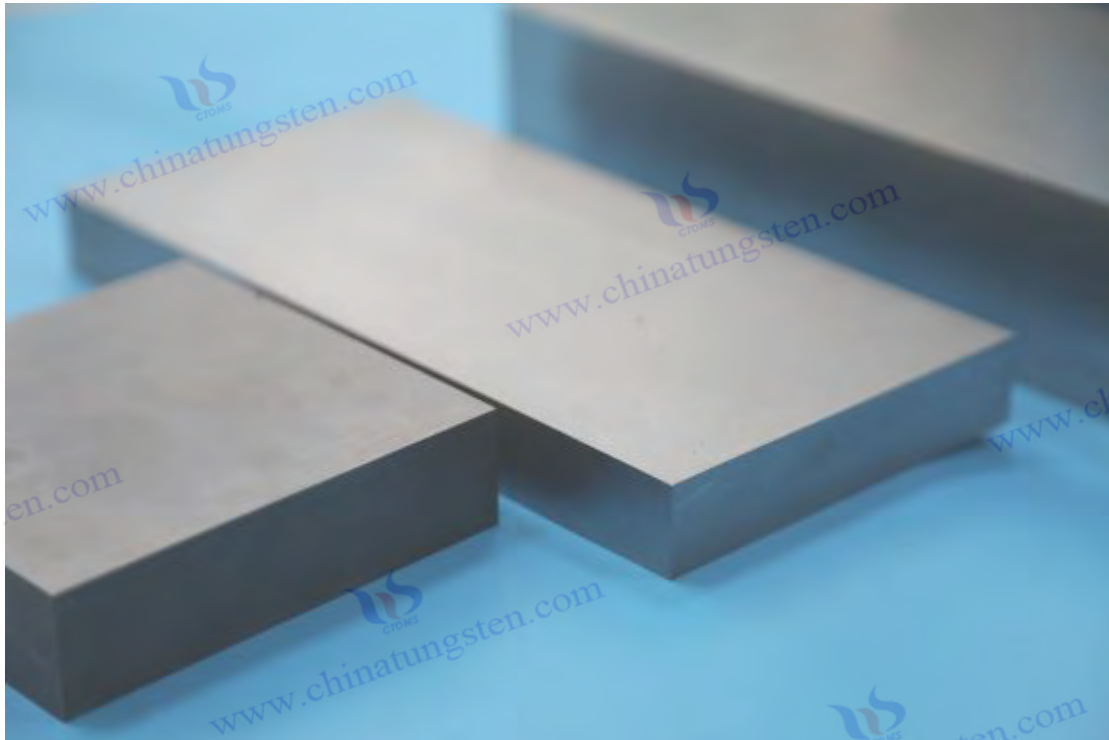
Tabla D.1 Datos de la prueba de fluidez del polvo de acero inoxidable

Muestra N°	Masa(g)	Tiempo(s) de flujo	Tiempo medio de salida (s/50 g)
SS-001	50.02	32.8	32.5
SS-002	50.01	32.4	32.5
SS-003	50.00	32.3	32.5

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



GB/T 5243-2008 Método para marcar las propiedades de los grados de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica el método de marcado para el rendimiento de los grados de carburo cementado. Este método es aplicable al carburo cementado (incluidos los grados de las series YG, YT e YW) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante. Sus parámetros de rendimiento, como la composición química, las propiedades físicas y las propiedades mecánicas, se especifican mediante un método de marcado unificado. Esta norma se puede utilizar para la selección de materiales, el control de calidad, la aceptación de la producción y la gestión del rendimiento de los grados en investigación y desarrollo.

Esta norma no se aplica a los carburos cementados que no sean a base de cobalto ni a los carburos cementados que no sean a base de WC.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 18376-2014 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 5169-2013 Método de prueba para la porosidad del carburo cementado

GB/T 5242-2006 Guía de clasificación y aplicación de grados 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

ISO 4499-1 Métodos para la determinación de las propiedades físicas del carburo cementado Parte

1: Densidad

ISO 4499-2 Métodos para la determinación de las propiedades mecánicas del carburo cementado

Parte 2: Dureza

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)

como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través de pulvimetalurgia.

3.2 Grado

El código de identificación del carburo cementado refleja su composición química, propiedades físicas y propiedades mecánicas, y se utiliza para distinguir materiales para diferentes propósitos.

3.3 Composición química

El porcentaje de masa (% en peso) de cada elemento en el carburo cementado, incluidos WC, Co y elementos agregados (como TiC, TaC).

3.4 Propiedades físicas:

Densidad, porosidad, tamaño de grano y otras propiedades del carburo cementado.

3.5 Propiedades mecánicas:

Dureza, resistencia a la flexión, tenacidad y otras propiedades del carburo cementado.

4. Método de marcado del rendimiento de la marca

4.1 Reglas de denominación de marca

Los grados de carburo cementado se representan mediante una combinación de letras y números, siguiendo las siguientes reglas:

Primera letra: Indica la categoría de la aplicación

YG: Carburo cementado de uso general (aleación WC-Co).

Carburo cementado que contiene carburo de titanio (TiC) con alta resistencia al desgaste.

Carburo cementado que contiene carburo de tantalio (TaC) o carburo de niobio (NbC) con un excelente rendimiento integral.

Número: Indica el contenido de cobalto (Co) (% en peso), por ejemplo, YG6 significa que el contenido de cobalto es del 6%.

Sufijo (opcional): indica un rendimiento o uso especial

K: Para cortar (como YG6K).

M: Para resistencia al impacto (como YG8M).

F: Granos finos (como YG6F).

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 Marcado de parámetros de rendimiento

El desempeño de la marca incluirá los siguientes parámetros, marcados en un formato fijo:

Composición química: contenido de WC, contenido de Co, contenido de elementos añadidos (% en peso).

Propiedades físicas: densidad (g/cm^3), porosidad (%), tamaño de grano (μm).

Propiedades mecánicas: dureza (HRA), resistencia a la flexión (MPa), tenacidad a la fractura ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

4.3 Formato de anotación

El rendimiento de las calificaciones se marca en forma de tabla, por ejemplo:

Marca: YG6

Composición química: WC 94%, Co 6%

Propiedades físicas: densidad $14,9 \text{ g}/\text{cm}^3$, porosidad $<0,05\%$, tamaño de grano $0,8-1,0 \mu\text{m}$

Propiedades mecánicas: dureza 91,5 HRA, resistencia a la flexión 2200 MPa, tenacidad a la fractura $10,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

5 Métodos de prueba

5.1 Determinación de la composición química

Después del muestreo según GB/T 5314-2011, se determinaron los contenidos de WC, Co y elementos añadidos mediante análisis químico con una precisión de $\pm 0,1\%$ en peso.

5.2 Determinación de propiedades físicas

Densidad: Según GB/T 3850-2015, precisión $\pm 0,01 \text{ g}/\text{cm}^3$.

Porosidad: Según GB/T 5169-2013, método metalográfico o método de análisis de imágenes, precisión $\pm 0,01\%$.

Tamaño de grano: Según GB/T 18376-2014, medido con microscopio metalográfico, precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

5.3 Determinación de propiedades mecánicas

Dureza: Según ISO 4499-2, dureza Vickers (HV) o dureza Rockwell (HRA), precisión $\pm 0,5 \text{ HRA}$.

Resistencia a la flexión: Según ISO 3327, método de flexión de tres puntos, precisión $\pm 50 \text{ MPa}$.

Tenacidad a la fractura: según el método de viga con entalla de un solo borde (SENB), precisión $\pm 0,5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

6 Resultados Expresión

El rendimiento de las calificaciones se muestra en una tabla, con los valores de los parámetros conservados hasta los decimales especificados:

Composición química: mantener 1 decimal (por ejemplo, 94,0%).

Densidad: Mantener 2 decimales (p. ej. $14,90 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Porosidad: mantener 2 decimales (por ejemplo 0,05%).

Tamaño de grano: mantener 1 decimal (por ejemplo, $1,0 \mu\text{m}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureza: mantener 1 decimal (por ejemplo 91,5 HRA).

Resistencia a la flexión: conservar valores enteros (por ejemplo 2200 MPa).

Tenacidad a la fractura: mantener un decimal (por ejemplo, $10,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: GB/T 5243-2008; b) Marca: como YG6; c) Descripción de la muestra: lote, tamaño; d) Método de prueba: composición química, propiedades físicas, propiedades mecánicas; e) Resultados: tabla de parámetros de rendimiento; f) Fecha de prueba: como el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

7 Precisión y sesgo

7.1 Precisión

Composición química: Desviación de repetibilidad $< \pm 0,1 \%$ en peso.

Propiedades físicas: Desviación de densidad $< \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, desviación de porosidad $< \pm 0,02\%$.

Propiedades mecánicas: desviación de dureza $< \pm 0,5 \text{ HRA}$, desviación de resistencia a la flexión $< \pm 50 \text{ MPa}$.

7.2 Sesgo

Error del instrumento: error de balanza $\pm 0,0001 \text{ g}$, error del microscopio $\pm 0,1 \mu\text{m}$.

Inhomogeneidad de la muestra: una desviación de la composición $> 0,1 \%$ en peso afecta la fluctuación de la resistencia a la flexión en $\pm 100 \text{ MPa}$.

Influencia ambiental: La humedad $> 70\%$ sobreestima la porosidad en un $0,01\text{-}0,03\%$.

8 Factores influyentes

8.1 Fluctuación de la composición

Un contenido de cobalto de $\pm 0,5 \%$ provocará un cambio en la dureza de $\pm 1 \text{ HRA}$ y un cambio en la resistencia a la flexión de $\pm 200 \text{ MPa}$.

8.2 Tamaño del grano

Un tamaño de grano $< 0,5 \mu\text{m}$ aumenta la dureza ($> 92 \text{ HRA}$) y disminuye la tenacidad ($< 9 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$); un tamaño de grano $> 2 \mu\text{m}$ disminuye la dureza ($< 90 \text{ HRA}$) y aumenta la tenacidad ($> 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

8.3 Proceso de sinterización

Una temperatura $> 1450^\circ\text{C}$ aumenta la porosidad ($> 0,1 \%$) y reduce la resistencia a la flexión entre 100 y 300 MPa .

8.4 Adición de elementos

TiC $> 5\%$ aumenta la dureza ($+1 \text{ HRA}$) y disminuye la tenacidad ($-1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9 Aplicación del Desempeño de Grado

9.1 Selección de materiales

YG6 (dureza 91,5 HRA, resistencia a la flexión 2200 MPa) es adecuado para herramientas de corte.

9.2 Optimización de procesos

Una resistencia a la flexión < 2000 MPa indica que la temperatura de sinterización es insuficiente y debe ajustarse a 1400-1450 °C.

9.3 Predicción del rendimiento

Dureza>91 HRA, tenacidad>10 MPa·m^{1/2} corresponde a una vida útil de corte>5 horas.

9.4 Ejemplos

YG8 (resistencia a la flexión 2400 MPa, tenacidad 11,0 MPa·m^{1/2}), utilizado para brocas de impacto, vida útil >3000 impactos.

10. Notas

10.1 Calibración del instrumento

La balanza y el microscopio fueron calibrados antes de la prueba, con una desviación de ≤±1%.

10.2 Calidad de la muestra

Asegúrese de que la muestra esté libre de grietas y tenga una composición uniforme.

10.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de pruebas fue de 20-25 °C y la humedad fue <60%.

10.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante la operación para evitar que salga polvo.

11 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Propiedades de los grados comunes de carburo cementado

Tabla A.1 Propiedades típicas de los grados

Marca	WC (peso %)	Co (%) en peso)	Densidad (g/cm ³)	Porosidad(%)	Tamaño de grano (μm)	Dureza (HRA)	Resistencia a la flexión (MPa)	Tenacidad a la fractura (MPa·m ^{1/2})
YG6	94.0	6.0	14.90	0.04	0,8-1,0	91.5	2200	10.5
YG8	92.0	8.0	14.70	0.05	1.0-1.2	90.5	2400	11.0
YT15	79.0	6.0	12.50	0.03	0,6-0,8	92.0	1800	9.0

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

Un error de balanza de $\pm 0,0001$ g afecta una densidad $< 0,01$ g/cm³.

B.2 Desviación de la muestra

La composición desigual hace que la resistencia a la flexión fluctúe en ± 100 MPa.

B.3 Impacto ambiental

Una humedad $> 70\%$ sobreestima la porosidad entre un 0,01 y un 0,03%.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Se utiliza fluorescencia de rayos X (XRF) para analizar la composición con una precisión de $< \pm 0,05\%$ en peso.

C.2 Se utiliza un microscopio electrónico de barrido (MEB) para medir el tamaño de grano con una precisión de $< \pm 0,05$ μm . C.3 Se introduce un sistema de pruebas automatizado para mejorar la consistencia de las mediciones.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de la prueba de rendimiento del grado YG6

parámetro	Medida 1	Medida 2	Medida 3	valor promedio
Densidad (g/cm ³)	14.91	14.89	14,90	14,90
Dureza (HRA)	91.4	91.6	91.5	91.5
Resistencia a la flexión (MPa)	2180	2220	2200	2200

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 34505-2017

Fabricación aditiva de polvo metálico Especificaciones del método de preparación

1 Alcance

Esta norma especifica las especificaciones del método de preparación de polvos metálicos para fabricación aditiva, incluyendo la selección de la materia prima, el proceso de preparación, el control de calidad y los requisitos de rendimiento. Este método es aplicable a polvos metálicos (como aleaciones de titanio, aleaciones de aluminio, acero inoxidable, etc.) utilizados en la fabricación aditiva (como la fusión selectiva por láser (SLM) y la fusión por haz de electrones (EBM), para garantizar que la distribución del tamaño de partícula, la morfología, la fluidez y la composición química del polvo cumplan con los requisitos del proceso de fabricación aditiva. Esta norma puede utilizarse como guía para el proceso de preparación de polvos, la aceptación de la producción y la verificación del rendimiento.

Esta norma no se aplica a polvos no metálicos ni a polvos metálicos no destinados a la fabricación aditiva.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 1482-2010 Determinación de la fluidez de polvos metálicos - Método del reómetro Hall

GB/T 5314-2011 Método de muestreo de polvo para pulvimetalurgia

GB/T 13305 Métodos de análisis químico para acero y ferroaleaciones

GB/T 19077.1-2008 Medición de la distribución del tamaño de partículas mediante el método de difracción láser Parte 1: Generalidades

ISO 13320-1:2009 Análisis del tamaño de partículas por difracción láser

ASTM B214-16 Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 La fabricación aditiva (FA)

es una tecnología que fabrica entidades depositando materiales capa por capa, incluyendo SLM, EBM, etc.

3.2 Polvo metálico

Partículas de metal o aleación preparadas mediante un proceso específico y utilizadas como materia prima para la fabricación aditiva.

3.3 Método de preparación: El proceso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de procesamiento de materias primas metálicas en polvos que cumplen con los requisitos de la fabricación aditiva, incluido el método de atomización, el método de trituración mecánica, etc.

3.4 Distribución del tamaño de partículas

La distribución estadística del tamaño de partículas de polvo, generalmente expresada como D10, D50 o D90.

3.5 Esfericidad:

El grado en el cual las partículas de polvo están cerca de la forma esférica, lo que afecta la uniformidad y fluidez de la distribución del polvo.

4 Método de preparación

4.1 Selección de materia prima

Tipo de material: Utilice metales o aleaciones de alta pureza (como Ti-6Al-4V, acero inoxidable 316L) con un contenido de impurezas $\leq 0,1$ % en peso.

Forma inicial: Varilla de metal, alambre o esponja de metal (como esponja de titanio).

Requisitos de pureza: contenido de oxígeno $\leq 0,2$ % en peso, contenido de nitrógeno $\leq 0,05$ % en peso.

4.2 Proceso de preparación

4.2.1 Atomización de gas

Principio: El metal fundido se pulveriza en finas gotas a través de un gas a alta presión (como nitrógeno o argón) y se enfría hasta formar un polvo esférico.

Parámetros del proceso:

Temperatura de fusión: 1500-1800°C (dependiendo del material).

Presión de gas: 2-5 MPa.

Velocidad de enfriamiento: 10^3 - 10^5 K /s .

Materiales aplicables: aleación de titanio, aleación a base de níquel.

Características de salida: tamaño de partícula 10-150 μm , esfericidad $>0,9$.

4.2.2 Proceso de electrodo rotatorio de plasma (PREP)

Principio: Después de que el electrodo giratorio se funde, forma gotas a través de la fuerza centrífuga y se enfría hasta convertirse en polvo.

Parámetros del proceso:

Velocidad de rotación del electrodo: 10000-20000 rpm.

Potencia: 50-100 kW.

Medio de enfriamiento: argón o helio.

Materiales aplicables: metales de alto punto de fusión (como tungsteno y molibdeno).

Características de salida: tamaño de partícula 20-200 μm , esfericidad $>0,95$, contenido de oxígeno $<0,1$ % en peso.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.3 Aleación mecánica

Principio: Los polvos metálicos se mezclan y refinan mediante molienda de bolas de alta energía.

Parámetros del proceso:

Tiempo de molienda de bolas: 10-50 horas.

Relación bola-material: 10:1 a 20:1.

Velocidad de rotación: 300-500 rpm.

Materiales aplicables: materiales compuestos a base de aluminio.

Características de salida: tamaño de partícula 1-50 μm , morfología irregular.

4.2.4 Método de disolución-precipitación

Principio: El metal se disuelve y luego se precipita en polvo en condiciones controladas.

Parámetros del proceso:

Temperatura de disolución: 150-200°C.

Presión: 0,5-1,0 MPa.

Relación sólido-líquido: 0,05-0,1 g/ml.

Materiales aplicables: Polvo metálico recubierto de polipropileno.

Características de salida: tamaño de partícula 20-50 μm , esfericidad ajustable.

4.3 Posprocesamiento

Cribado: utilice una criba vibratoria o una clasificación por flujo de aire para controlar el rango de tamaño de partícula (por ejemplo, 15-45 μm).

Secado: Secar a 105 $\pm$ 2°C durante 1 hora para eliminar la humedad.

Tratamiento de superficie: Proteger con gas inerte (como Ar) para reducir la oxidación.

5. Control de calidad

5.1 Composición química

Determinado según GB/T 13305, contenido de oxígeno $\leq 0,2$ % en peso, contenido de nitrógeno $\leq 0,05$ % en peso, contenido total de impurezas $\leq 0,3$ % en peso.

5.2 Distribución del tamaño de partículas

Determinado según GB/T 19077.1-2008, D10 ≥ 10 μm , D50 = 20-50 μm , D90 ≤ 100 μm .

5.3 Morfología y esfericidad

La observación mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) mostró que la esfericidad era $\geq 0,9$.

5.4 Liquidez

Medido según GB/T 1482-2010, el tiempo de salida es ≤ 35 s/50 g.

5.5 Densidad aparente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cm³ (dependiendo del material) según medición según ASTM B214-16.

6. Expresión de resultados

Las propiedades de los polvos preparados se enumeran en forma de tabla:

Composición química: contenido de cada elemento (% en peso).

Distribución del tamaño de partícula: D10, D50, D90 (μm).

Morfología: Esfericidad y descripción de imágenes SEM.

Fluidez: Tiempo de flujo (s/50 g).

Densidad aparente: g/cm³ .

El informe de prueba debe incluir:

- a) Número de norma: GB/T 34505-2017; b) Tipo de polvo: marca del material, lote; c) Método de preparación: parámetros del proceso; d) Resultados de la prueba: tabla de parámetros de rendimiento;
- e) Fecha de la prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; f) Probador: firma.

7 Precisión y sesgo

7.1 Precisión

Distribución del tamaño de partícula: Desviación de repetibilidad $<\pm 5 \mu\text{m}$.

Fluidez: Desviación de repetibilidad $<\pm 2 \text{ s}$.

Composición química: Desviación de repetibilidad $<\pm 0,1 \%$ en peso.

7.2 Sesgo

Error del instrumento: la desviación del analizador de tamaño de partícula es de $\pm 2 \mu\text{m}$, lo que afecta el tamaño de partícula $<\pm 5\%$.

Desviación del proceso: La fluctuación de la presión del gas de $\pm 0,5 \text{ MPa}$ provoca que la distribución del tamaño de partícula cambie en $\pm 10 \mu\text{m}$.

Influencia ambiental: La humedad $>60\%$ reduce la fluidez entre 2 y 5 s.

8 Factores influyentes

8.1 Pureza de la materia prima

Un contenido de oxígeno $> 0,2 \%$ en peso aumenta la oxidación de la superficie del polvo y la fluidez disminuye en 5-10 s.

8.2 Parámetros del proceso

Las velocidades de enfriamiento $<10^3 \text{ K/s}$ dieron como resultado partículas irregulares con una esfericidad $<0,8$.

Una velocidad del electrodo $<10000 \text{ rpm}$ da como resultado un tamaño de partícula más grande ($>200 \mu\text{m}$).

8.3 Posprocesamiento

Un tamizado desigual produce una desviación en la distribución del tamaño de partícula de $>10\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un secado insuficiente reduce la densidad aparente en 0,1-0,2 g/cm³.

9 Aplicación de los resultados de la preparación

9.1 Proceso de fabricación aditiva

Tamaño de partícula 15-45 µm, fluidez <35 s/50 g, adecuado para impresión SLM.

9.2 Optimización del rendimiento

Esfericidad>0,9, contenido de oxígeno<0,1 % en peso Mejora la resistencia a la tracción de las piezas impresas (>800 MPa).

9.3 Ejemplos

El polvo de Ti-6Al-4V (D50 = 35 µm, fluidez 32 s/50 g) se utiliza para álabes de turbinas de aviación con una rugosidad superficial de Ra <10 µm.

10. Notas

10.1 Calibración del instrumento

El analizador de tamaño de partículas y el medidor de flujo Hall se calibraron antes de la prueba, con una desviación de <±1%.

10.2 Control de procesos

Asegúrese de que la pureza del gas sea >99,99% para evitar la contaminación.

10.3 Control ambiental

La temperatura de la sala de prueba fue de 23 ± 2 °C y la humedad fue de 50 ± 5 %.

10.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante el trabajo para evitar que salga polvo metálico volando.

11 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Parámetros típicos de preparación de polvo metálico

Tabla A.1 Parámetros del proceso de diferentes métodos de preparación

método	Material	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Tamaño de partícula (µm)	Esfericidad	Contenido de oxígeno (% en peso)
Atomización de gas	Ti-6Al-4V	1700	3.0	20-50	>0,9	<0,15
Método PREP	Aleación de tungsteno	1800	4.0	30-100	>0,95	<0,10
Aleación	Materiales	Temperatura	-	1-50	<0,7	<0,20

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

método	Material	Temperatura (°C)	Presión (MPa)	Tamaño de partícula (µm)	Esfericidad	Contenido de oxígeno (% en peso)
mecánica	compuestos base de aluminio	a ambiente				

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

El analizador de tamaño de partículas tiene una desviación de ±2 µm, lo que afecta el tamaño de partículas en <±5%.

B.2 Desviación del proceso

Una fluctuación de la presión del gas de ±0,5 MPa hace que la distribución del tamaño de partícula varíe en ±10 µm.

B.3 Impacto ambiental

Una humedad >60% reduce la fluidez durante 2-5 s.

Apéndice C Sugerencias de mejora

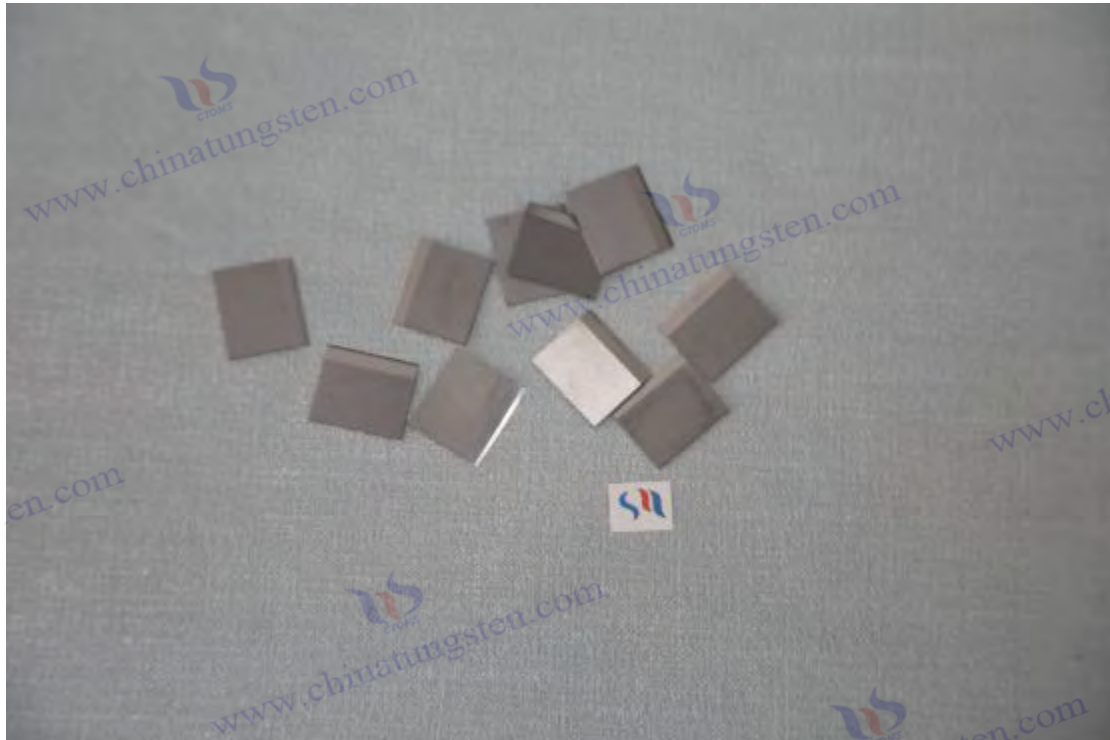
- C.1 Se utilizó el análisis del tamaño de partícula mediante láser para mejorar la precisión a ±1 µm.
C.2 Se utilizó un entorno de vacío para reducir el contenido de oxígeno a <0,05 % en peso. C.3 Se introdujo un sistema de monitorización en línea para optimizar los parámetros del proceso.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

Tabla D.1 Datos de prueba de preparación de polvo de Ti-6Al-4V

parámetro	Medida 1	Medida 2	Medida 3	valor promedio
D50 (µm)	34.5	35.0	34.8	34.8
Fluidez (s/50 g)	32.2	32.0	32.3	32.2
Contenido de oxígeno (% en peso)	0.12	0.13	0.11	0.12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 26048-2010 Especificación para el proceso de sinterización de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica las especificaciones del proceso de sinterización de carburo cementado, incluyendo la preparación de la materia prima, los parámetros del proceso, los requisitos del equipo, el control de calidad y los métodos de prueba de rendimiento. Este método es aplicable al proceso de sinterización de carburo cementado (como los grados de las series YG, YT e YW) con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) como fase aglutinante, utilizado principalmente para la producción de herramientas de corte, moldes y piezas resistentes al desgaste. Esta norma puede utilizarse como guía para el proceso de sinterización, la aceptación de la producción y la verificación del rendimiento.

Esta norma no se aplica a la sinterización de carburos cementados no basados en cobalto o carburos cementados no basados en WC.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son esenciales para la aplicación de esta norma. Para cualquier documento referenciado con fecha, solo la versión con fecha aplica a esta norma. Para cualquier documento referenciado sin fecha, la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones) aplica a esta norma.

GB/T 18376-2014 Método de prueba de microestructura de carburo cementado

GB/T 3850-2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado

GB/T 5169-2013 Método de prueba para la porosidad 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 5243-2008 Método para marcar las propiedades de los grados de carburo cementado
ISO 3327 Método para la determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado
ISO 4499-2 Métodos para la determinación de las propiedades mecánicas del carburo cementado
Parte 2: Dureza

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma.

3.1 El metal duro es un material compuesto hecho de carburo de tungsteno (WC)
como fase dura y cobalto (Co) como fase de unión a través de pulvimetalurgia.

3.2 La sinterización es

el proceso de combinar partículas de polvo en un sólido denso mediante calentamiento, generalmente a una temperatura inferior al punto de fusión de los componentes principales.

3.3 Sinterización en fase líquida

Durante el proceso de sinterización, la fase aglutinante (como el cobalto) se funde para formar una fase líquida, que promueve la reorganización y densificación de las partículas.

3.4 Sinterización en estado sólido:

Durante el proceso de sinterización, no se forma ninguna fase líquida y la unión de las partículas se logra solo mediante difusión en estado sólido.

3.5 Microestructura

Las características organizativas del carburo cementado después de la sinterización, incluido el tamaño del grano, la porosidad y la distribución de fases.

4 Proceso de sinterización

4.1 Preparación de la materia prima

Selección de polvo: utilice polvos de WC y Co de alta pureza, pureza de WC $\geq 99,8\%$, pureza de Co $\geq 99,9\%$, contenido de impurezas $\leq 0,1\%$ en peso.

Tamaño de partícula: tamaño de grano WC 0,5-2,0 μm , tamaño de partícula de polvo de Co 1-3 μm .

Mezcla: Para mezclar se utiliza molienda de bolas seca o húmeda, con una relación de bolas a material de 5:1 a 10:1 durante 24 a 48 horas para garantizar la uniformidad (desviación $\leq \pm 0,5\%$ en peso).

Prensado: Presione el material mezclado hasta formar un cuerpo verde a una presión de 100-300 MPa y una densidad de cuerpo verde del 50%-60% de la densidad teórica.

4.2 Proceso de sinterización

4.2.1 Sinterización de una sola etapa (sinterización al vacío)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipamiento: Horno de sinterización al vacío, temperatura máxima 1550°C, grado de vacío $\leq 10^{-2}$ Pa.

Parámetros del proceso:

Velocidad de calentamiento: 5-10°C/min a 600°C (eliminación de aditivos), mantener durante 1 hora.

Continúe aumentando la temperatura a 1400-1450 °C (temperatura de sinterización en fase líquida) y manténgala a esta temperatura durante 1-2 horas.

Velocidad de enfriamiento: 5-10°C/min hasta 1000°C, luego enfriar naturalmente a temperatura ambiente.

Atmósfera: vacío o argón a baja presión ($<0,1$ MPa).

Grados aplicables: YG6, YG8, adecuado para herramientas de corte.

4.2.2 Sinterización en dos etapas (sinterización en fase sólida + fase líquida)

Equipo: horno de sinterización en atmósfera de hidrógeno, horno de sinterización al vacío.

Parámetros del proceso:

Sinterización en fase sólida: Mantener a 1300-1350 °C (por debajo del punto de fusión del cobalto) durante 1 hora en una atmósfera de hidrógeno para promover la unión inicial de las partículas.

Sinterización en fase líquida: Elevar la temperatura a 1450-1480°C y mantenerla a esta temperatura durante 30-60 minutos en atmósfera de vacío o argón para lograr una densificación completa.

Enfriamiento: 5-10°C/min hasta 1000°C, luego enfriamiento natural.

Grados aplicables: YT15, YW1, adecuado para materiales que requieren granos finos.

4.2.3 Prensado isostático en caliente (sinterización HIP)

Equipamiento: Horno de prensado isostático en caliente, presión máxima 100 MPa, temperatura máxima 1500°C.

Parámetros del proceso:

Temperatura de sinterización: 1400-1450°C.

Presión: 50-100 MPa.

Tiempo de conservación del calor: 1-2 horas.

Enfriamiento: Enfriar a temperatura ambiente en el horno.

Grados aplicables: Los grados de alto rendimiento (como YG6F) se utilizan para piezas que requieren baja porosidad.

4.3 Tratamiento post-sinterización

Enfriamiento: Controlar la velocidad de enfriamiento para evitar grietas causadas por estrés térmico.

Limpieza de superficies: Eliminar la capa de óxido o residuo de la superficie y limpiar con etanol.

Ajuste de tamaño: La calibración de tamaño se realiza en función de la contracción (15%-20%).

5. Control de calidad

5.1 Composición química

Determinado de acuerdo con GB/T 5243-2008, la desviación del contenido de WC y Co es $\leq \pm 0,5\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en peso, y el contenido de impurezas es $\leq 0,1$ % en peso.

5.2 Microestructura

Tamaño de grano: medido según GB/T 18376-2014, tamaño de grano WC 0,8-1,5 μm .

Porosidad: Medida según GB/T 5169-2013, porosidad $\leq 0,05\%$.

Distribución de fases: La fase de cobalto se distribuye uniformemente sin segregación evidente.

5.3 Propiedades físicas

Densidad: Determinada según GB/T 3850-2015, densidad relativa $\geq 99\%$.

Contracción: Contracción lineal 15%-20%, desviación $\leq \pm 1\%$.

5.4 Propiedades mecánicas

Dureza: medida según ISO 4499-2, HRA ≥ 90 .

Resistencia a la flexión: medida según ISO 3327, ≥ 2000 MPa.

6 Resultados Expresión

Las propiedades después de la sinterización se enumeran en forma de tabla:

Composición química: WC, contenido de Co (% en peso).

Microestructura: tamaño de grano (μm), porosidad (%).

Propiedades físicas: densidad (g/cm^3), contracción (%).

Propiedades mecánicas: dureza (HRA), resistencia a la flexión (MPa).

El informe de prueba debe incluir:

a) Número de norma: GB/T 26048-2010; b) Marca: como YG6; c) Proceso de sinterización: etapa única, dos etapas o HIP; d) Parámetros del proceso: temperatura, tiempo, atmósfera; e) Resultados de la prueba: tabla de parámetros de rendimiento; f) Fecha de la prueba: como por ejemplo el 21 de mayo de 2025; g) Probador: firma.

7 Precisión y sesgo

7.1 Precisión

Tamaño de grano: Desviación de repetibilidad $\leq \pm 0,1$ μm .

Porosidad: Desviación de repetibilidad $\leq \pm 0,02\%$.

Dureza: Desviación de repetibilidad $\leq \pm 0,5$ HRA.

Resistencia a la flexión: Desviación de repetibilidad $\leq \pm 50$ MPa.

7.2 Sesgo

Error del instrumento: error del microscopio $\pm 0,1$ μm , que afecta al tamaño del grano $\leq \pm 5\%$.

Desviación del proceso: La fluctuación de temperatura de ± 10 °C provoca una variación de porosidad de $\pm 0,03$ %.

Influencia ambiental: Un contenido de oxígeno en la atmósfera $> 0,01\%$ aumenta la porosidad en un 0,01-0,02%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8 Factores influyentes

8.1 Temperatura

Las temperaturas $<1400^{\circ}\text{C}$ dan como resultado una densificación insuficiente y una porosidad $>0,1\%$; temperaturas $>1480^{\circ}\text{C}$ causan un crecimiento anormal del grano ($>2\text{ }\mu\text{m}$).

8.2 Tiempo de retención

Cuando el tiempo de retención es <30 minutos, la densificación es incompleta y la densidad relativa es $<98\%$. Cuando el tiempo de retención es >2 horas, los granos crecen y la dureza disminuye entre 0,5 y 1 HRA.

8.3 Atmósfera

Un contenido de oxígeno $>0,01\%$ provoca una oxidación de la superficie y un aumento de la porosidad del 0,02-0,05%.

8.4 Propiedades del polvo

Un tamaño de grano $<0,5\text{ }\mu\text{m}$ aumenta la dureza (>92 HRA) pero disminuye la resistencia a la flexión ($<1800\text{ MPa}$).

9 Aplicación de los resultados de sinterización

9.1 Herramientas de corte

YG6 (dureza 91,5 HRA, resistencia a la flexión 2200 MPa), utilizado para herramientas de torneado, vida útil >5 horas.

9.2 Optimización de procesos

Una porosidad $>0,05\%$ indica que la temperatura de sinterización es insuficiente y debe ajustarse a 1450°C .

9.3 Predicción del rendimiento

Densidad relativa $>99\%$, dureza >91 HRA correspondiente a un aumento del 20% en la resistencia al desgaste.

9.4 Ejemplos

YG8 (sinterización de dos etapas, tamaño de grano $1,0\text{ }\mu\text{m}$, resistencia a la flexión 2400 MPa), utilizado para matrices de estampación, vida útil $>10\text{ }000$ veces.

10. Notas

10.1 Calibración del instrumento

La temperatura del horno de sinterización y el grado de vacío se calibraron antes de la prueba, con una desviación de $\leq\pm 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10.2 Control de procesos

Asegúrese de que la pureza de la atmósfera sea >99,99% y evite la oxidación.

10.3 Control ambiental

La temperatura de la cámara de sinterización fue de 23±2°C y la humedad fue <60%.

10.4 Protección de seguridad

Utilice gafas protectoras durante la operación para evitar que salga polvo.

11 Apéndice (Apéndice informativo)

Apéndice A Parámetros típicos del proceso de sinterización

Tabla A.1 Parámetros de sinterización de diferentes grados

Marca	Método de sinterización	de Temperatura (°C)	Tiempo de retención (min)	de atmósfera	Densidad relativa (%)	Tamaño de grano (μm)
YG6	Sinterización al vacío	1450	60	vacío	99.5	0,8-1,0
YG8	Sinterización en dos etapas	1350+1480	60+30	Hidrógeno + vacío	99.3	1.0-1.2
YT15	Sinterización HIP	1450	90	Argón + presión	99.8	0,6-0,8

Apéndice B Análisis de errores

B.1 Error del instrumento

La desviación de temperatura de ±10°C afecta la porosidad en <±0,03%.

B.2 Desviación del proceso

Una desviación del tiempo de retención de ±5 minutos da como resultado un cambio de densidad relativa de ±0,5%.

B.3 Impacto ambiental

Un contenido de oxígeno atmosférico > 0,01% aumenta la porosidad entre un 0,01 y un 0,02%.

Apéndice C Sugerencias de mejora

C.1 Utilizar monitoreo de temperatura en línea para controlar la desviación <±5 °C.

C.2 Utilizar gas inerte de alta pureza para reducir el contenido de oxígeno a <0,005 %. C.3 Introducir tecnología de enfriamiento rápido para reducir el crecimiento del grano.

Apéndice D Ejemplos de datos de prueba

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tabla D.1 Datos de la prueba de sinterización YG6

parámetro	Medida 1	Medida 2	Medida 3	valor promedio
Densidad relativa (%)	99.4	99.5	99.6	99.5
Tamaño de grano (μm)	0.9	0.8	1.0	0.9
Dureza (HRA)	91.4	91.6	91.5	91.5

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