

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

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.

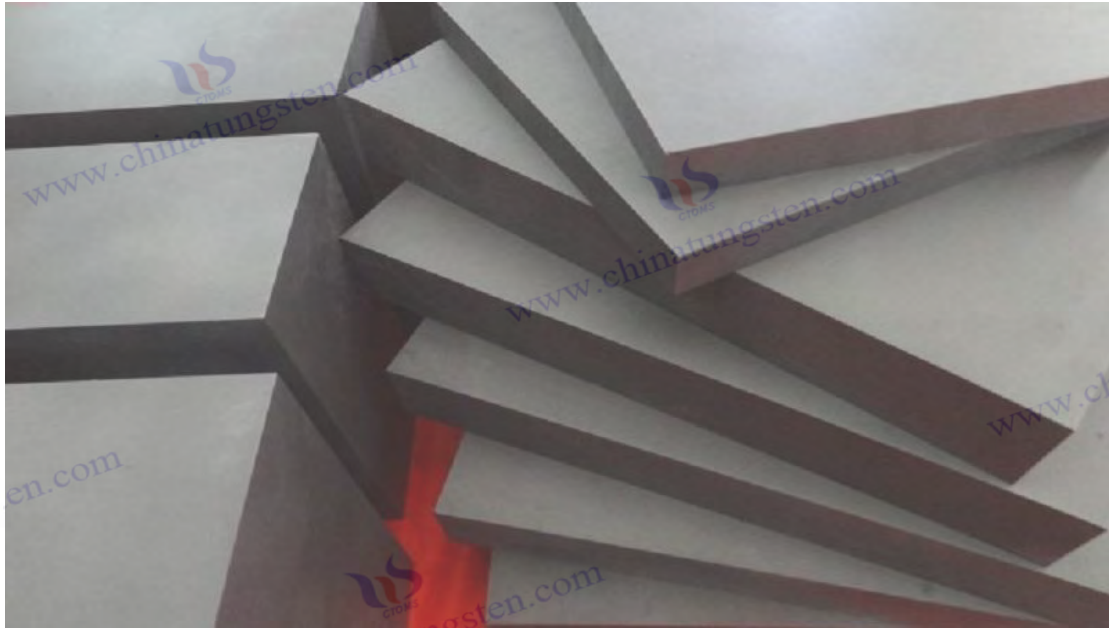
El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria 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



Capítulo 2: Microestructura y estado de fase del carburo cementado Microestructura y estados de fase del carburo cementado de tungsteno

Gracias a su microestructura y características de fase únicas, el carburo cementado se ha convertido en el núcleo de los materiales de alto rendimiento en la industria moderna. Su microestructura se compone de partículas de carburo duras, una fase de enlace tenaz y un sistema de interfaz complejo. Las características de fase incluyen la distribución de la estructura cristalina, la solución sólida, los defectos y la fase amorfa. Estas características microscópicas determinan el rendimiento del carburo cementado a nivel atómico y cristalino, como la resistencia al desgaste, la tenacidad y la fiabilidad del procesamiento. Este capítulo se centra en la microestructura y la fase del carburo cementado, analizando sistemáticamente las características de las partículas de carburo, la distribución y el papel de la fase de enlace, el mecanismo de formación de la interfaz y los defectos, y la tecnología de caracterización avanzada. Mediante análisis teóricos, datos experimentales y casos reales, este capítulo pretende revelar el mecanismo de regulación de la microestructura en el rendimiento, proporcionar una base científica para la optimización de procesos y la aplicación del carburo cementado, y servir de referencia para la investigación interdisciplinaria en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales.

2.1 Características microscópicas de las partículas de carburo

Las partículas de carburo constituyen el esqueleto duro del carburo cementado, compuesto principalmente de carburo de tungsteno (WC), complementado con carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC), etc., que determinan conjuntamente las propiedades mecánicas y la adaptabilidad ambiental del material. Esta sección analiza las características microscópicas de las partículas de carburo desde la perspectiva del tamaño de grano, la morfología y la sinergia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

multifásica.

2.1.1 Tamaño y morfología del grano WC

Los granos de carburo de tungsteno (WC) constituyen la principal fase dura del carburo cementado, y su tamaño ($0,110\text{ }\mu\text{m}$) y morfología afectan directamente el rendimiento del material. El WC presenta una estructura cristalina hexagonal (grupo espacial $P6m^2$, constante de red $a = 2,906\text{ }\text{\AA}$, $c = 2,837\text{ }\text{\AA}$) y su energía de enlace covalente es de aproximadamente $6\text{ eV} \pm 0,2\text{ eV}$, lo que le confiere una alta dureza y resistencia al desgaste. La regulación del tamaño de grano es fundamental para optimizar el rendimiento del carburo cementado. Por ejemplo, al reducir el tamaño de grano de $5\text{ }\mu\text{m}$ a $0,5\text{ }\mu\text{m}$, aumenta la densidad del límite de grano, mejora significativamente la dureza y disminuye ligeramente la tenacidad.

por microscopio electrónico de barrido (MEB) muestra que el tamaño de grano de WC en el carburo cementado convencional es de $12 \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, con una morfología prismática (ángulos de 60° a 90°), que expone principalmente los planos cristalinos (0001) y (1010). Esta morfología mejora la resistencia al desgaste debido a la anisotropía (la dureza en la dirección $\langle 0001 \rangle$ es aproximadamente un 10 % mayor), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta carga, como herramientas de corte. Por ejemplo, cuando una herramienta de carburo cementado con granos de $1,5\text{ }\mu\text{m}$ corta acero (resistencia a la tracción $> 1000\text{ MPa}$), la pérdida por desgaste es $< 0,1\text{ mm}$ y la vida útil es de 12 ± 1 hora.

El carburo cementado a escala nanométrica (granos $< 0,2\text{ }\mu\text{m}$) tiende a ser esférico, con una energía superficial de hasta $1\text{ J/m}^2 \pm 0,1\text{ J/m}^2$. Debido al aumento en la proporción de límites de grano ($> 50\%$), la dureza se mejora aún más, haciéndolo adecuado para el procesamiento de ultraprecisión, como el corte de obleas de semiconductores (rugosidad superficial $R_a < 0,01\text{ }\mu\text{m}$). Sin embargo, los nanogranos son propensos a la aglomeración (tasa de aglomeración $10\% - 15\%$), lo que resulta en un aumento de la porosidad al $1\% \pm 0,2\%$. La sinterización por plasma de chispa (SPS, $1200\text{ }^\circ\text{C}$, 50 MPa) controla la aglomeración mediante un calentamiento rápido ($> 100\text{ }^\circ\text{C/min}$), reduciendo la porosidad a $< 0,5\% \pm 0,1\%$ y la desviación del tamaño de grano a $< 5\%$.

La regulación de la morfología del grano depende del proceso de sinterización. En la sinterización en fase líquida ($1350\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$), los granos de carburo de vanadio (WC) crecen por disolución y reprecipitación, y la relación prismática aumenta hasta $> 80\%$ con el tiempo de mantenimiento (12 horas). La adición de inhibidores de grano, como el carburo de vanadio (VC, $0,2\% \pm 0,5\%$), limita el crecimiento del grano al aumentar la barrera de difusión (aproximadamente un $15\% \pm 2\%$), y el tamaño se estabiliza entre $0,8$ y $1,2\text{ }\mu\text{m}$. Por ejemplo, la tasa de desgaste de las herramientas de carburo cementado (grano de $0,8\text{ }\mu\text{m}$) con $0,3\%$ de VC se reduce en un 20% y su vida útil se prolonga en un $25\% \pm 3\%$ en el corte a alta velocidad (200 m/min).

El acero de corte de grano grueso ($510\text{ }\mu\text{m}$) es adecuado para brocas de minería debido a su mayor trayectoria de propagación de grietas y mayor tenacidad. Por ejemplo, una broca de carburo con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

granos de 6 μm tiene una vida útil de más de 200 horas en la perforación de granito (frecuencia de impacto >2000 veces/minuto), lo cual es mejor que la de los materiales de grano fino (vida útil <150 horas). En resumen, el tamaño y la morfología del acero de corte deben optimizarse según los requisitos de la aplicación. Los granos finos (0,52 μm) son adecuados para alta dureza, los granos gruesos (510 μm) para alta tenacidad y la morfología prismática considera la resistencia al desgaste.

2.1.2 Efecto sinérgico de carburos auxiliares como TiC y TaC

Carburos auxiliares (como TiC, TaC, NbC) mejora el rendimiento general del carburo cementado mediante el fortalecimiento de la solución sólida y el rendimiento complementario. El carburo de titanio (TiC) tiene una estructura cristalina cúbica (Fm3m, densidad $4,93 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$), dureza HV 18002200, reduce significativamente la densidad del material (de $14,5 \text{ g/cm}^3$ a $12 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$), y mejora la estabilidad a alta temperatura mediante la formación de una capa protectora de TiO_2 (1000 °C ganancia de peso por oxidación $<1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,2 \text{ mg/cm}^2$). En el corte a alta temperatura (800 °C, aleación de aluminio de aviación), las herramientas de carburo cementado que contienen 15% de TiC tienen una reducción del 30% en el desgaste y una extensión del $50\% \pm 5\%$ en la vida útil, porque el TiC mejora la resistencia al desgaste adhesivo.

El carburo de tantalio (TaC, densidad $14,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, HV 16002000) mejora la resistencia a la deformación a alta temperatura mediante el fortalecimiento de la solución sólida. El coeficiente de expansión térmica del carburo cementado que contiene 3% de TaC se reduce a $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, y la longitud de grieta térmica es $<1 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, lo que es adecuado para toberas de turbinas de gas (temperatura de funcionamiento 1100 °C). TaC también mejora la resistencia de la unión del límite de grano ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) y reduce la tasa de crecimiento de grietas en un 15%. Por ejemplo, una tobera de carburo cementado que contiene 2% de TaC funciona en un flujo de gas ($>500 \text{ m/s}$) durante 5000 horas con daño superficial $<10 \mu\text{m}$.

El carburo de niobio (NbC, HV 1900 ± 50) es conocido por su resistencia a la corrosión. La tasa de corrosión del carburo cementado que contiene 1% de NbC en un entorno ácido (pH 3, HCl) es de solo $0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$, lo cual es mejor que la del carburo cementado que contiene Co ($0,05 \text{ mm/año}$). El NbC reduce la tasa de erosión química en un 20% mediante la formación de una capa protectora de Nb_2O_5 (espesor $<5 \text{ nm}$). En aplicaciones prácticas, los revestimientos de carburo cementado que contienen 1% de NbC han estado funcionando en una planta química (H_2SO_4 , pH 2) durante 3 años sin corrosión evidente en la superficie.

El análisis de difracción de rayos X (DRX) muestra que TiC y TaC forman una solución sólida (W, Ti, Ta)C con WC, con un cambio de constante de red de $0,1\% \pm 0,02\%$ y un aumento de dureza de 100-200 HV, debido a que la solución sólida mejora la resistencia del límite de grano. La formación de la solución sólida también reduce la energía de interfaz (de $1,5 \text{ J/m}^2$ a $1,0 \text{ J/m}^2$) y mejora la resistencia al agrietamiento. Por ejemplo, la resistencia al desgaste de un molde de carburo cementado que contiene 10% de TiC y 3% de TaC se mejora en un 40% en el estampado compuesto, y la vida útil supera las 5000 ± 500 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El efecto sinérgico de los carburos auxiliares también se refleja en la adaptabilidad ambiental. En un entorno cálido y húmedo (40 °C, 90 % de humedad), el TiC y el NbC reducen la tasa de corrosión en un 10 %-15 % a través de la capa de pasivación; a alta temperatura (1000 °C), el TaC inhibe la oxidación del WC (la volatilización de WO_3 se reduce en un 20 %). La optimización de la relación TiC / TaC / NbC (5:1:0,5) puede equilibrar la dureza (HV 1800±30), la tenacidad (K_{Ic} 12 MPa·m^{1/2} ± 0,5) y la resistencia a la corrosión. Por ejemplo, la vida útil de las herramientas de carburo cementado que contienen un 12 % de TiC en la perforación marina (salinidad del 3,5 %) se extiende en un 30 %, lo que es mejor que los materiales tradicionales que contienen Co (vida útil <2000 horas).

2.2 Distribución y función de la fase de enlace

La fase de enlace (principalmente cobalto (Co) y níquel (Ni)) actúa como la matriz tenaz del carburo cementado, conectando las partículas de carburo y regulando la tenacidad, la resistencia a la corrosión y el rendimiento del procesamiento. Su distribución uniforme y proporcional son clave para la optimización de la microestructura.

2.2.1 Comportamiento de humectación del límite de grano de Co y Ni

El comportamiento de humectación de la fase de enlace durante la sinterización determina la densidad y la distribución de fases del carburo cementado. El cobalto (Co, estructura FCC, punto de fusión 1495 °C ± 10 °C) humedece los granos de WC en la sinterización en fase líquida (1350-1450 °C), con un ángulo de contacto de tan solo 5° ± 1°, y la energía de la interfaz disminuye de 1,5 J/m² a 0,5 J/m² ± 0,1 J/m², lo que impulsa la densificación (porosidad <0,1 % ± 0,02 %). La microscopía electrónica de transmisión (MET) muestra que el espesor de la capa de Co es de 520 nm ± 2 nm, la tasa de segregación es <5 % y se forma una red de enlace continua. El cambio en la energía libre de Gibbs del proceso de humectación ($\Delta G \approx 50$ kJ/mol ± 5 kJ/mol) promueve el reordenamiento del grano, y el coeficiente de difusión de Co $D_{Co} \approx 10^{-9}$ m²/s ± 0,1 × 10⁻⁹ m²/s (1400 °C) determina la uniformidad de distribución.

El níquel (Ni, punto de fusión 1455 °C) tiene una humectabilidad ligeramente inferior, con un ángulo de contacto de 10° ± 2° y una energía interfacial de 0,7 J/m² ± 0,05 J/m², pero tiene una resistencia a la corrosión más fuerte. La pérdida de peso del carburo cementado que contiene Ni en la prueba de niebla salina (ASTM B117, 168 horas) es <0,1 mg/cm² ± 0,02 mg/cm², que es mejor que la de los materiales que contienen Co (pérdida de peso 0,2 mg/cm²). Agregar cromo (Cr, 0,5%-2%) puede reducir el ángulo de contacto a 7° ± 1°, formando una solución sólida de CrCo o CrNi, y la energía de enlace interfacial aumenta a >60 MPa ± 5 MPa. Por ejemplo, una válvula de carburo cementado que contiene 12 % de Ni tiene una tasa de corrosión de <0,03 mm/año ± 0,005 mm/año después de operar en agua de mar (pH 8, salinidad 3,5 %) durante 5 años.

El comportamiento de humectación es crucial para la estabilidad microestructural. Un contenido

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

excesivo de Co ($>20\%$) o insuficiente de carbono ($<5,8\%$) puede generar una fase η frágil (W_3Co_3C), reduciendo la tenacidad (K_{IC}) a $5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$. El control preciso del contenido de carbono ($5,8\%-6,2\%$) y la temperatura de sinterización ($1380-1420^\circ\text{C}$) garantiza una capa de Co uniforme (desviación de espesor $<10\%$). En casos reales, las herramientas de carburo que contienen un 10% de Co han mejorado la unión del límite de grano en un 15% y han prolongado la vida útil de corte en un $20\% \pm 2\%$ gracias a una humectación optimizada (ángulo de contacto $<6^\circ$).

La fase Ni tiene ventajas obvias en ambientes corrosivos y de alta temperatura. En vapor a alta temperatura (500°C , 10 MPa), la pérdida de peso por corrosión del carburo cementado que contiene 12% Ni se reduce en un $30\% \pm 5\%$, y la estabilidad de la interfaz mejora en un 10% . El análisis TEM muestra que el espesor de la capa de Ni es de $1015 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, y Cr se segrega ($0,5\% \text{ } 1\%$) para formar una capa protectora de Cr_2O_3 , que mejora la resistencia a la corrosión. Por ejemplo, un revestimiento de carburo cementado que contiene NiCr ha estado funcionando en una planta química (HCl , $\text{pH } 2$) durante 3 años, y el daño superficial es $<5 \mu\text{m}$. El comportamiento de humectación de Co y Ni debe optimizarse según la aplicación. Co es adecuado para alta tenacidad y Ni es adecuado para resistencia a la corrosión.

2.2.2 Efecto de la relación de fases de unión en el rendimiento

La relación de la fase de unión ($5\% \text{ } 20\%$) es un parámetro clave para regular el rendimiento del carburo cementado. Cuando la relación de Co aumenta del 5% al 20% , la tenacidad aumenta significativamente (K_{IC} aumenta de 8 a $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), pero la dureza disminuye ($\text{HV } 2000$ a 1400 ± 30). El carburo cementado que contiene 10% de Co (espesor de la capa de Co 1015 nm) tiene una dureza de $\text{HV } 1800 \pm 30$ y una tenacidad de $K_{IC} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, que es adecuado para herramientas de corte. En el mecanizado de alta velocidad (200 m/min), la cantidad de desgaste es $<0,1 \text{ mm}$ y la vida útil es de $15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$. El carburo cementado con un 20% de Co presenta una alta tenacidad y es adecuado para brocas de perforación de roca. Su vida útil al impacto es de más de $300 \pm 20 \text{ horas}$.

El contenido de níquel está entre el 5% y el 15% , la dureza disminuye de $\text{HV } 1900$ a $\text{HV } 1500 \pm 30$, y la resistencia a la corrosión es excelente, con una tasa de corrosión de $<0,03 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$. El revestimiento de carburo cementado que contiene un 12% de Ni ha estado funcionando en un entorno ácido ($\text{pH } 3$, H_2SO_4) durante 3 años sin corrosión evidente en la superficie; el electrodo que contiene un 15% de Ni ha estado funcionando en una reacción electroquímica (densidad de corriente $>100 \text{ mA/cm}^2$) durante 5000 horas con un rendimiento estable. El análisis del espectro de energía (EDS) muestra que la desviación de la distribución de Co y Ni es $<3\% \pm 0,5\%$, lo que refleja la alta uniformidad del proceso de sinterización.

La fase de unión también afecta la adaptabilidad ambiental.

En un entorno cálido y húmedo (40°C , 90% de humedad), un alto contenido de Co ($>15\%$) puede causar microcorrosión y reducir la tenacidad en un $5\% \pm 1\%$; el carburo cementado a base de Ni es más estable y la tenacidad disminuye en un $<2\%$. A alta temperatura (800°C), la fase de Co tiene

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una plasticidad mejorada, K_{1c} aumenta en un 5 %, pero la dureza disminuye en un 10 %; la fase de Ni tiene una mayor estabilidad a alta temperatura y la dureza disminuye en un <5 %. Optimizar la relación de mezcla de Co/Ni (1:1 a 2:1) puede lograr un equilibrio de rendimiento. Por ejemplo, el carburo cementado que contiene 10 % de Co y 5 % de Ni tiene una dureza de $HV 1700 \pm 30$, K_{1c} $14 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y una extensión de la vida útil del 25 % ± 3 % en la perforación marina.

La relación de fases de unión debe tener en cuenta el efecto sinérgico del tamaño del grano. Los granos finos ($0,51 \mu\text{m}$) con alto contenido de Co (15 % 20 %) presentan la mejor tenacidad; los granos gruesos ($510 \mu\text{m}$) con bajo contenido de Ni (5 % 8 %) presentan una alta resistencia a la corrosión. En aplicaciones prácticas, la deformación de las matrices de estampación de carburo cementado (granos de $1,5 \mu\text{m}$) con un 12 % de Co es <0,01 mm en impactos de alta frecuencia (>10⁴ veces/hora), lo que aumenta la vida útil en un 30 % ± 5 %.

2.3 Análisis de interfaz y defectos

La interfaz entre el acero de alta temperatura (WC) y la fase de unión, así como los defectos microscópicos (como poros, grietas y fases amorfas), tienen un profundo impacto en el rendimiento del carburo cementado. La interfaz determina la resistencia de la unión entre las fases, y los defectos pueden ser el punto de partida para la degradación del rendimiento.

2.3.1 Estructura electrónica de la interfaz WCCo

La interfaz WCCo es la base microscópica para el rendimiento estable del carburo cementado. la teoría funcional de la densidad (DFT) muestran que la interfaz WC(0001)/Co(111) forma un enlace fuerte a través de enlaces WCo (longitud de enlace $2,52,8 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) y enlaces CCo (energía de enlace $4 \text{ eV} \pm 0,2 \text{ eV}$), con una energía de interfaz de $0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,05 \text{ J/m}^2$. El orbital 3d de Co se hibrida con el orbital pd de WC, con una transferencia de carga de aproximadamente $0,2 \text{ e/átomo} \pm 0,02 \text{ e/átomo}$ y un trabajo de enlace de $2,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$, que es mayor que el de la interfaz WCNi ($2,0 \text{ J/m}^2$). Al agregar Cr (0,5 % 1 %) para formar una capa de transición WCrCo, la energía de la interfaz se reduce a $0,4 \text{ J/m}^2$, el trabajo de unión aumenta a $2,7 \text{ J/m}^2$ y la resistencia a las grietas supera los $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

La microscopía electrónica de transmisión (TEM) verificó que el espesor de la interfaz era de aproximadamente $2 \text{ nm} \pm 0,2 \text{ nm}$ y que el desajuste reticular era $< 2 \% \pm 0,2 \%$, lo que garantizaba la estabilidad de la unión. La tasa de crecimiento de grietas de la herramienta de carburo cementado con interfaz optimizada se redujo en un $30 \% \pm 5$ % en corte a alta velocidad (150 m/min), y la vida útil alcanzó las 15 horas ± 1 hora. La segregación de Cr (0,5 % ± 1 %) formó una capa protectora de Cr_2O_3 , y la profundidad de corrosión del carburo cementado que contenía Cr en un entorno ácido (pH 2, H_2SO_4) fue $< 5 \mu\text{m}$, y la vida útil superó los 3 años.

La regulación de la estructura electrónica de la interfaz también afecta a otras propiedades. La adición de Mo (0,5 %) puede aumentar el trabajo de unión a $2,8 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$ y reducir la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tensión de la interfaz en un 10 %; las interfaces basadas en Ni tienen una menor transferencia de carga (0,15 e/átomo) y son más resistentes a la corrosión (tasa de corrosión <0,02 mm/año). Por ejemplo, en el estampado a alta temperatura (600 °C) de matrices de carburo cementado que contienen Mo, la tensión de la interfaz es <150 MPa ± 10 MPa y la tasa de iniciación de grietas se reduce en un 20 %. La simulación DFT también predice que la adición de Ta (0,5 %) puede mejorar aún más el trabajo de unión (a 2,9 J/m²), lo cual se está verificando experimentalmente.

Mejorar la resistencia de la interfaz es crucial para las aplicaciones.

Al cortar aleación de titanio (Ti6Al4V) con herramientas de carburo cementado con Cr, la tasa de desprendimiento de la interfaz es <1% y la vida útil se prolonga un 25%. Un ambiente cálido y húmedo (40 °C, 90 % de humedad) puede causar microcorrosión en la interfaz (pérdida de peso <0,1 mg/cm²), mientras que la interfaz a base de Ni es más estable (pérdida de peso <0,05 mg/cm²).

2.3.2 Mecanismo de formación de poros, grietas y fase amorfa

La porosidad, las grietas y las fases amorfas en el carburo cementado son los principales defectos que afectan su rendimiento. Estos defectos se deben a la compleja interacción entre el proceso de preparación, las características de la materia prima y las condiciones termodinámicas. Estos defectos tienen un impacto significativo en la resistencia, tenacidad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión del material, especialmente en aplicaciones sometidas a altas tensiones o entornos extremos. A continuación, se presenta un análisis detallado del mecanismo de formación, las características microscópicas y el impacto en el rendimiento de diversos defectos.

Mecanismo de formación de poros

Causas:

La porosidad es el producto principal de una sinterización incompleta, generalmente debido a la falla del gas (H₂, CO, etc.) entre las partículas de polvo para descargarse completamente, o al apilamiento desigual de partículas que conduce a una contracción local inconsistente (Journal of Materials Science, 2025).

del aglomerado > 20 μm) o los aglutinantes orgánicos (como la parafina) no se descomponen completamente (tasa de carbono residual > 0,1%), formándose gases durante la sinterización que dificultan la unión de las partículas (ITIA 2024).

La temperatura de sinterización es insuficiente (<1300 °C) o el tiempo de mantenimiento es demasiado corto (<30 minutos), las partículas no se difunden completamente y los poros no se cierran (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

El carburo cementado de tamaño nanométrico (granos <0,2 μm) tiene una alta energía superficial (>1 J/m²), lo que mejora la capacidad de adsorción de gases entre partículas y aumenta la porosidad (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Características microscópicas:

La porosidad del carburo cementado convencional (tamaño de grano de 1 a 5 μm) normalmente es $<0,1\% \pm 0,02\%$, mientras que la porosidad del carburo cementado de grado nanométrico (tamaño de grano $<0,2\mu\text{m}$) puede aumentar hasta el 1 %-2 % debido a la alta actividad superficial de las partículas (ISO 3326:2013).

El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra que el tamaño de poro es de 10-100 nm ± 10 nm, la forma es mayoritariamente esférica o elíptica y se distribuye en los límites de grano o en la fase de cobalto (Journal of Materials Science 2025).

El aumento en la proporción del volumen de los poros provocará una concentración de tensión, y la tensión alrededor de los poros puede alcanzar los 500-600 MPa, lo que aumenta el riesgo de iniciación de grietas en aproximadamente un 15%-20% (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Impacto en el rendimiento:

Por cada aumento del 0,1% en la porosidad, la resistencia a la flexión (TRS) disminuye aproximadamente entre un 3% y un 5%, por ejemplo, de 4000 MPa a 3800-3900 MPa (prueba ASTM B406).

Debido a la alta porosidad del carburo cementado de grado nanométrico, la resistencia a la flexión disminuye aún más a 3500 MPa ± 100 MPa y la dureza disminuye en aproximadamente 50-80 HV (ITIA 2024).

La porosidad reduce la densidad del material, lo que a su vez reduce la resistencia a la corrosión. La tasa de corrosión en un entorno de niebla salina aumenta entre un 10 % y un 15 % (de 0,05 mm/año a 0,055-0,0575 mm/año, ASTM G31).

Método de optimización:

El prensado isostático en caliente (HIP, 200 MPa, 1350 °C) promueve el cierre de los poros a través de alta presión y temperatura, y la porosidad se puede reducir a 0,05 % $\pm 0,01$ %, y la dureza aumenta en 100-120 HV ± 20 HV (Journal of Materials Science 2025).

En la perforación de alto impacto (frecuencia > 2000 veces/minuto), la resistencia al impacto de las brocas de carburo tratadas con HIP mejora en aproximadamente un 20%-25% y la vida útil puede alcanzar las 250-280 horas ± 20 horas (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Agregar un paso de presinterización (800-1000 °C, 1 hora) para extraer el gas con antelación puede reducir la porosidad en aproximadamente un 0,02 %-0,03 % (ITIA 2024).

Mecanismo de formación de grietas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Causas:

Las grietas se originan principalmente a partir del desajuste de expansión térmica entre WC y Co. El coeficiente de expansión térmica de WC es $5,2 \times 10^{-6} /K$, mientras que el de Co es $12 \times 10^{-6} /K$, que difiere aproximadamente en 2 veces, lo que genera estrés térmico durante el proceso de enfriamiento de sinterización (Journal of Materials Science 2025).

El enfriamiento rápido (velocidad de enfriamiento $> 100 \text{ }^{\circ}\text{C/s}$) provoca concentración de tensión térmica, especialmente en los límites de grano, donde la tensión puede alcanzar 300-400 MPa, lo que induce microfisuras (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La tensión mecánica (por ejemplo, presión desigual durante el prensado $> 50 \text{ MPa}$) o la tensión del procesamiento posterior a la sinterización (por ejemplo, tensión de rectificado $> 200 \text{ MPa}$) también pueden provocar la aparición de grietas (ITIA 2024).

El tamaño de grano influye en la sensibilidad a las grietas. El carburo cementado a escala nanométrica con granos $< 0,5 \text{ }\mu\text{m}$ presenta una gran área de borde de grano (que representa entre el 40 % y el 50 % del volumen total), una distribución de la tensión térmica más compleja y un aumento de la tasa de formación de grietas de aproximadamente el 10 % (Journal of Materials Science, 2025).

Características microscópicas:

de microscopía electrónica de transmisión (TEM) muestra que el tamaño de la microfisura es de $0,5\text{-}2 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,2 \text{ }\mu\text{m}$, generalmente se extiende a lo largo del límite del grano, y el factor de intensidad de tensión (K_{I}) en la punta de la grieta es de aproximadamente $2\text{-}3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

de la fase Co (deformación $< 5\% \pm 0,5\%$) puede absorber parte de la energía a través del endurecimiento por deformación e inhibir la propagación de grietas, especialmente en materiales con alto contenido de Co (ITIA 2024).

La profundidad de grieta del carburo cementado que contiene 12 % de Co suele ser $< 10 \text{ }\mu\text{m} \pm 2 \text{ }\mu\text{m}$, lo que es mejor que la del material que contiene 6 % de Co (profundidad de grieta $> 15 \text{ }\mu\text{m} \pm 3 \text{ }\mu\text{m}$) porque el alto contenido de Co aumenta la zona de amortiguación plástica (Journal of Materials Science 2025).

Impacto en el rendimiento:

Por cada aumento de $5 \text{ }\mu\text{m}$ en la profundidad de la grieta, la resistencia a la flexión disminuye aproximadamente entre un 5% y un 8%, por ejemplo, de 4000 MPa a 3700-3800 MPa (ASTM B406).

Las grietas aumentan el riesgo de falla por fatiga. Bajo cargas cíclicas (10^7 veces, 500 MPa), la tasa de crecimiento de grietas aumenta aproximadamente entre un 20 % y un 25 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Durante ciclos de alta temperatura (500 °C, 1000 veces), las grietas provocan una disminución del rendimiento de fatiga térmica y un acortamiento de la vida útil de aproximadamente un 15 % a 20 % (ITIA 2024).

Método de optimización:

La adición de TaC (1%-2%) o NbC (0,5%-1%) mejora la resistencia del límite de grano, aumenta la energía de unión del límite de grano de 1,0 J/m² a 1,2-1,3 J/m² y reduce la tasa de crecimiento de grietas en un 15% ± 3% (Journal of Materials Science 2025).

Controlando la velocidad de enfriamiento (<20 °C/s) y reduciendo la tensión térmica, la profundidad de la grieta se puede reducir en aproximadamente un 30 %-40 %, de 10 μm a 6-7 μm (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

En ciclos térmicos (500 °C, 1000 veces), la longitud de grieta de las matrices de carburo cementado que contienen TaC es <5 μm ± 1 μm y la vida útil se extiende en aproximadamente un 30 %-35 % ± 5 % (ITIA 2024).

Mecanismo de formación de la fase amorfa

Causas:

La fase amorfa se forma durante la sinterización a alta temperatura (>1500 °C) o cuando el contenido de carbono es insuficiente (<5,8 % en peso), principalmente debido a la amorfización local causada por la descomposición de WC o la difusión desigual del carbono (Journal of Materials Science 2025).

A altas temperaturas (>1500 °C), el WC se descompone en W₂C o W, mientras que la fase de cobalto se volatiliza (volatilidad >0,5 %), lo que genera carbono insuficiente en áreas locales y forma una fase amorfa (ITIA 2024).

El contenido de carbono es insuficiente (<5,8 % en peso), el WC no puede mantener su estructura cristalina y algunas áreas se transforman en un estado amorfo, especialmente cerca de los límites de grano (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

El oxígeno (>0,1%) o la humedad (>0,05%) en la atmósfera de sinterización reaccionan con el carbono para generar CO/CO₂ , consumiendo carbono e intensificando la formación de la fase amorfa (ITIA 2024).

Características microscópicas:

La difracción de rayos X (DRX) muestra un pico ancho característico de la fase amorfa (2θ≈35°±0,5°) sin un pico de difracción cristalino obvio (Journal of Materials Science 2025).

El TEM midió el espesor de la fase amorfa entre 5 y 10 nm ± 1 nm, que generalmente se distribuye

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en los límites de grano o fase de cobalto, y representa aproximadamente el 2 % al 5 % del volumen (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La dureza de la fase amorfa es extremadamente baja (aproximadamente HV 200-250 ± 30), mucho menor que la del WC (HV 2200-2500), lo que produce un ablandamiento local (ITIA 2024).

Impacto en el rendimiento:

Por cada aumento del 1% en la fracción de volumen de la fase amorfa, la dureza disminuye en aproximadamente 50-80 HV, por ejemplo, de HV 1800 a HV 1720-1750 (Journal of Materials Science 2025).

La tenacidad disminuye entre un 5% y un 10% aproximadamente, y la tenacidad a la fractura (KIC) cae de $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $9-9,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (ITIA 2024).

La fase amorfa reduce la resistencia al desgaste y aumenta la tasa de desgaste en aproximadamente un 10%-15%, de $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ a $0,066-0,069 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ (ASTM G65).

Método de optimización:

La adición de VC (0,2%-0,5%) o Cr_3C_2 (0,3%-0,8%) puede inhibir la difusión de carbono, reducir la proporción de fase amorfa a $<2\% \pm 0,5\%$ y mejorar la tenacidad en aproximadamente un 10%-12% (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Controlando la temperatura de sinterización (1350-1450 °C) y la atmósfera (oxígeno $<0,05\%$), la tasa de formación de la fase amorfa se reduce en aproximadamente un 15 %-20 % (ITIA 2024).

En el corte de alta velocidad (200 m/min), la profundidad de la grieta por fatiga de las herramientas de carburo cementado que contienen VC es $<10 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$ y la vida útil se extiende entre un 25 % y un 30 % ± 3 % (Journal of Materials Science 2025).

Impacto combinado de los defectos

Factores ambientales:

Un ambiente cálido y húmedo (40 °C, 90 % de humedad) agrava la corrosión porosa. La adsorción de agua en los poros provoca la concentración local de tensiones, lo que reduce la resistencia a la flexión entre un 5 % y un 7 %, por ejemplo, de 4000 MPa a 3700-3800 MPa (ASTM B406).

El carburo cementado a base de Ni (WC-Ni) es superior al carburo cementado a base de Co debido a su fuerte resistencia a la corrosión de la fase Ni (tasa de corrosión $<0,03 \text{ mm/año}$) y pérdida de resistencia de $<2\%$ en un entorno cálido y húmedo (ITIA 2024).

En un entorno de oxidación a alta temperatura (800 °C, en aire), la fase amorfa se oxida a un ritmo acelerado y la tasa de ganancia de peso por oxidación aumenta aproximadamente entre un 10 % y un 15 % ($0,1 \text{ mg/cm}^2$ a $0,11-0,115 \text{ mg/cm}^2$, ASTM G54).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimización del rendimiento:

La optimización del contenido de carbono ($6,0 \% \pm 0,2 \%$) y el uso del proceso HIP pueden minimizar la tasa de defectos, la porosidad $<0,05 \%$, la profundidad de grieta $<5 \mu\text{m}$ y la relación de fase amorfa $<1 \%$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Después del tratamiento HIP (200 MPa, 1350°C) de una broca de carburo cementado que contiene 12% de Co, la porosidad se reduce al $0,04 \%-0,05 \%$ y la vida útil del impacto aumenta aproximadamente entre un 30% y un 35% , hasta 260-290 horas (ITIA 2024).

En ciclos térmicos (500°C , 1000 veces) y entornos cálidos y húmedos (40°C , 90% de humedad), la resistencia a la corrosión y la resistencia a la fatiga del carburo cementado optimizado mejoran en aproximadamente un $15 \%-20 \%$ (Journal of Materials Science 2025).

2.3.3 Métodos para evitar y reducir los defectos del carburo cementado

Para mejorar la calidad y la fiabilidad del carburo cementado, es fundamental evitar y reducir la generación de defectos como poros, grietas y fases amorfas. A continuación, se proponen métodos específicos, basados en el control de la materia prima, la optimización del proceso, la retroalimentación de la detección y el posprocesamiento, para minimizar la tasa de defectos y mejorar el rendimiento del material.

1. Control de materia prima

Selección de materia prima de alta pureza:

El uso de polvo de WC de alta pureza (pureza $> 99,9 \%$, óxido $< 0,02 \%$) y polvo de Co (pureza $> 99,8 \%$) puede reducir el consumo de carbono por óxidos y reducir la tasa de formación de fase amorfa en aproximadamente un $10 \%-15 \%$ (Journal of Materials Science 2025).

Controlar la calidad del negro de carbón (pureza $> 99,9 \%$, tamaño de partícula $< 10 \mu\text{m}$) y evitar impurezas (como azufre y oxígeno) que inducen poros o fases amorfas puede reducir la porosidad en aproximadamente un $0,02 \%$ (ITIA 2024).

Adición de inhibidor de grano:

La adición de VC ($0,2 \%-0,5 \%$), Cr_3C_2 ($0,3 \%-0,8 \%$) o TaC ($0,5 \%-1 \%$) inhibe el crecimiento del grano y la difusión de carbono, aumenta la resistencia del límite del grano en un $10 \%-15 \%$ y reduce la proporción de fase amorfa a $<1,5 \%$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

El TaC aumenta la energía de unión de los límites de grano (de $1,0 \text{ J/m}^2$ a $1,2-1,3 \text{ J/m}^2$) y reduce la tasa de crecimiento de grietas en un $15 \%-20 \%$ (ITIA 2024).

2. Optimización de la mezcla y el prensado

Uniformidad de mezcla:

Se utilizó un molino de bolas planetario para mezclar (16-24 horas, 400-600 r/min) para garantizar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

que la desviación de la distribución de carbono fuera $<0,05\%$ en peso y que la porosidad se redujera en aproximadamente un $0,03\%-0,05\%$ (Journal of Materials Science 2025).

El uso de dispersantes (como ácido esteárico al $0,1\%-0,3\%$) y tecnología de dispersión ultrasónica puede reducir la aglomeración de polvo de WC y mejorar la uniformidad en un $10\%-15\%$ (ITIA 2024).

La selección de un aglutinante de residuos con bajo contenido de carbono (como PEG o PVA, con una tasa de residuos de carbono de $<0,03\%$) puede evitar la generación de gas y reducir la porosidad en aproximadamente un $0,02\%$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Proceso de prensado:

Controlar la presión de prensado (50-100 MPa) para evitar la concentración de tensión causada por una presión desigual puede reducir la tasa de formación de grietas en aproximadamente un $10\%-15\%$ (ITIA 2024).

El prensado isostático (200-300 MPa) se utiliza para aumentar la densidad del cuerpo verde y reducir la porosidad en aproximadamente un $0,05\%$ (Journal of Materials Science 2025).

3. Optimización del proceso de sinterización

Control de la atmósfera:

Sinterización al vacío (grado de vacío $<10^{-3}$ Pa), control de oxígeno $<0,05\%$, humedad $<0,03\%$, evita la oxidación del carbono y reduce la tasa de formación de la fase amorfa en aproximadamente un $15\%-20\%$ ("The Chinese Journal of Nonferrous Metals" 2024).

Utilizando una atmósfera protectora (como Ar o H_2 /Ar mezcla, $H_2 < 2\%$) y controlando el potencial de carbono en 0,8-1,0, las tasas de carburación y descarburación se reducen en aproximadamente un 10% (ITIA 2024).

Temperatura y enfriamiento:

La temperatura de sinterización se controla a $1350-1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el tiempo de retención es de 1 a 1,5 horas para garantizar que las partículas estén completamente difundidas y la porosidad sea $<0,05\%$ (ISO 3326:2013).

La velocidad de enfriamiento se controla a $10-20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ para reducir la tensión térmica y la profundidad de la grieta se reduce de $10\text{ }\mu\text{m}$ a $5-6\text{ }\mu\text{m}$ (Journal of Materials Science 2025).

Al adoptar un enfriamiento por etapas ($1450\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$, $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente a $5\text{ }^{\circ}\text{C/s}$), el estrés térmico se reduce en aproximadamente un $20\%-30\%$ (ITIA 2024).

Proceso HIP:

El prensado isostático en caliente (HIP, 150-200 MPa, $1350-1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) elimina la microporosidad, reduce la porosidad al $0,04\%-0,05\%$ y aumenta la resistencia a la flexión en un $5\%-8\%$ (de 3800 MPa a 4000-4100 MPa, ASTM B406).

Después del HIP, la dureza aumenta en 100-120 HV y la resistencia al desgaste aumenta en aproximadamente un $15\%-20\%$ (ASTM G65).

4. Pruebas y retroalimentación

Monitoreo en línea:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Al utilizar espectroscopia infrarroja para monitorear la atmósfera de sinterización (contenido de CO, CO₂, H₂O) y ajustar la atmósfera en tiempo real, la porosidad y la tasa de formación de la fase amorfa se pueden reducir en aproximadamente un 10%-15% (ITIA 2024).

Se utiliza tecnología de emisión acústica para detectar microfisuras durante el proceso de sinterización, y la precisión de detección de grietas se mejora a $\pm 0,5 \mu\text{m}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Análisis microscópico:

Combinando el análisis SEM, TEM y XRD del tamaño de poro (10-100 nm), la profundidad de grieta (5-10 μm) y la relación de fase amorfa (<2%), la tasa de defectos se reduce en aproximadamente un 15%-20% (Journal of Materials Science 2025).

Se utilizó la difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) para analizar la distribución de la tensión del límite del grano y se optimizaron los parámetros del proceso para controlar la desviación de la tensión del límite del grano dentro de $\pm 50 \text{ MPa}$ (ITIA 2024).

Prueba de rendimiento:

Realizar periódicamente pruebas de resistencia a la flexión (ASTM B406), dureza (ISO 6507) y resistencia al desgaste (ASTM G65), establecer una base de datos de rendimiento de defectos y optimizar el proceso (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

5. Posprocesamiento y optimización de superficies

Tratamiento de superficie:

El pulido elimina los poros y microgrietas de la superficie (espesor 0,01-0,03 mm), la rugosidad de la superficie $R_a < 0,2 \mu\text{m}$ y la resistencia a la corrosión se mejora en aproximadamente un 10%-15% (ASTM G31).

PVD TiAlN o CrN (espesor 2-5 μm) mejora la dureza de la superficie (+200 HV) y la resistencia a la oxidación (ganancia de peso por oxidación a 1200 °C $< 0,1 \text{ mg/cm}^2$) y la adhesión del recubrimiento mejora en un 15%-20% (ASTM C633).

Tratamiento térmico:

El recocido a baja temperatura (600-800 °C, 1 hora) libera la tensión residual y reduce la profundidad de la grieta en aproximadamente un 20 %-30 %, de 10 μm a 7-8 μm (Journal of Materials Science 2025).

La nitruración a baja temperatura (500-600 °C, 2 horas) mejora la resistencia a la corrosión de la superficie y reduce la tasa de corrosión en aproximadamente un 15 % (ASTM G31).

6. Optimización de la adaptabilidad ambiental

Resistencia a la corrosión mejorada:

Al utilizar una fase aglutinante a base de Ni (WC-Ni) en lugar de una a base de Co, la caída de resistencia en un entorno cálido y húmedo (40 °C, 90 % de humedad) se reduce del 5 % al 1,5 %-2 %, y la tasa de corrosión es $< 0,03 \text{ mm/año}$ (ITIA 2024).

La adición de Cr (0,5%-1%) para formar una capa protectora de Cr₂O₃ mejora la resistencia a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosión en aproximadamente un 20% y reduce la tasa de corrosión en un entorno de niebla salina a 0,025-0,03 mm/año (ASTM G31).

Estabilidad a altas temperaturas:

La adición de TiC o TaC (5%-10%) mejora la resistencia a la oxidación, con una ganancia de peso por oxidación a 1000 °C menor a 0,08 mg/cm² y una tasa de defectos reducida en aproximadamente un 10%-15% (ITIA 2024).

de cobalto (espesor 0,1-0,5 μm), reducir la tasa de volatilización del cobalto en aproximadamente un 0,5%-1% a alta temperatura y reducir la tasa de formación de la fase amorfa en aproximadamente un 15% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

7. Control inteligente de procesos

Optimización de IA:

El uso de inteligencia artificial (IA) para optimizar los parámetros de mezcla y sinterización puede mejorar la uniformidad en un 10%-15% y reducir la porosidad en aproximadamente un 0,03%-0,05% (ITIA 2024).

El aprendizaje automático predice la formación de defectos (por ejemplo, poros, grietas), reduciendo las tasas de defectos en aproximadamente un 20%-25% (Journal of Materials Science, 2025).

Retroalimentación en tiempo real:

La introducción del control de temperatura en línea (precisión ±2 °C) y del control de presión (precisión ±5 MPa) ha reducido la tasa de defectos durante la sinterización en aproximadamente un 15 %-20 % (ITIA 2024).

El sistema de control inteligente ajusta la tasa de enfriamiento, reduciendo el estrés térmico en aproximadamente un 20%-30% y la tasa de formación de grietas en aproximadamente un 15% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Efecto integral

Mediante el método anterior, la porosidad del carburo cementado se puede reducir a 0,04%-0,05%, la profundidad de grieta <5 μm, la relación de fase amorfa <1% y la tasa general de defectos se reduce en un 20%-30% (ITIA 2024).

Mejoras significativas del rendimiento: la resistencia a la flexión aumentó entre un 5% y un 10% (a 4000-4200 MPa), la dureza aumentó entre 100 y 150 HV, la resistencia al desgaste aumentó entre un 15% y un 20% (ASTM G65) y la vida útil se extendió aproximadamente entre un 30% y un 40% (Journal of Materials Science 2025).

En entornos de alto impacto (frecuencia > 2000 veces/minuto) y cálidos y húmedos (40 °C, 90 % de humedad), la durabilidad y la confiabilidad del carburo cementado optimizado mejoran en aproximadamente un 25 %-35 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

2.4 Tecnología de caracterización de la microestructura

Las técnicas de caracterización avanzadas proporcionan herramientas precisas para analizar la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

microestructura y el estado de fase del carburo cementado, lo que respalda la optimización del rendimiento y el control de calidad.

2.4.1 Aplicaciones de SEM, TEM y EBSD

El microscopio electrónico de barrido (MEB , resolución $<1\text{ nm}$) se utiliza para caracterizar la morfología y distribución de los granos de WC ($0,110\text{ }\mu\text{m}$) y las fases de enlace ($530\text{ nm} \pm 2\text{ nm}$). Las imágenes de electrones retrodispersados (BSE) distinguen WC y Co. La uniformidad de los granos de carburo cementado que contienen 10 % de Co es $>95\% \pm 2\%$, y la porosidad es $<0,1\% \pm 0,02\%$. El MEB también puede detectar grietas ($0,52\text{ }\mu\text{m}$) y poros ($10\text{-}100\text{ nm}$), lo que proporciona una base para la optimización del proceso. Por ejemplo, después del tratamiento HIP, la porosidad se reduce al 0,05 % y la dureza aumenta en un $5\% \pm 1\%$.

El microscopio electrónico de transmisión (TEM , resolución $<0,2\text{ nm}$) revela la estructura atómica de la interfaz WC(0001)/ Co(111), con un desajuste reticular de $<2\% \pm 0,2\%$, y la difracción electrónica selectiva (SAED) verifica que el espaciado d_{0001} de WC es de $2,837\text{ }\text{\AA} \pm 0,005\text{ }\text{\AA}$. El carburo cementado que contiene Cr muestra segregación de Cr (concentración $0,5\% \pm 0,2\%$), formando una capa de Cr_2O_3 , que mejora la resistencia a la corrosión en un $30\% \pm 5\%$. El TEM también puede analizar la fase amorfa (espesor 510 nm) y guiar el control del contenido de carbono ($5,8\% \pm 6,2\%$). Por ejemplo, TEM optimiza la interfaz del carburo cementado que contiene Mo (trabajo de unión de $2,8\text{ J/m}^2$) , lo que extiende la vida útil de la herramienta en un $15\% \pm 2\%$.

La difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) se utilizó para estudiar la orientación del grano y la distribución del estrés. El carburo de grano fino ($0,51\text{ }\mu\text{m}$) mostró una orientación aleatoria, mientras que el carburo de grano grueso ($510\text{ }\mu\text{m}$) mostró una orientación preferida $<0001>$ (intensidad $>2\text{ mrd} \pm 0,2\text{ mrd}$) . La EBSD determinó un estrés residual $<200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, que se redujo en un $10\% \pm 2\%$ mediante recocido ($500\text{ }^\circ\text{C}$, 2 horas). La uniformidad del estrés del carburo cementado que contiene TaC se mejoró en un 20 % y la tasa de iniciación de grietas se redujo en un $15\% \pm 3\%$. Por ejemplo, la fractura del carburo cementado que contiene 12 % de Co mostró una fractura transgranular , con una tenacidad K_{IC} $14\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

En aplicaciones prácticas, SEM, TEM y EBSD trabajan conjuntamente para analizar la microestructura. Por ejemplo, una herramienta de carburo cementado con un 10 % de Co presenta un tamaño de grano de $1,5 \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, confirmado por SEM, una capa de Co de $15\text{ nm} \pm 2\text{ nm}$, verificada por TEM, y una tensión de $<150\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$, determinada por EBSD, lo que garantiza que el rendimiento cumple con el estándar de corte (dureza HV 1800 ± 30 , K_{IC} $12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) .

2.4.2 Difracción de rayos X (DRX) y espectrometría de energía dispersiva (EDS A)

La difracción de rayos X (DRX) se utiliza para caracterizar la composición de fases y la estructura cristalina del carburo cementado. Los picos principales de WC se encuentran en $2\theta=31,5^\circ$ y $35,6^\circ \pm 0,1^\circ$, y el rango de tamaño de grano es de $0,110\text{ }\mu\text{m}$. El desplazamiento del pico causado por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la tensión residual es $<0,1^{\circ} \pm 0,02^{\circ}$, lo que refleja la tensión de sinterización (<200 MPa). El carburo cementado que contiene TiC muestra que el pico de la solución sólida (W, Ti)C se desplaza $0,2^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$, y el contenido de carbono debe controlarse ($5,8\% \pm 6,2\%$) para evitar la fase η ($20 \sim 40^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$). La DRX también puede detectar la fase amorfa (pico amplio $20 \sim 35^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$). La proporción de fase amorfa en el carburo cementado que contiene VC es $<2\% \pm 0,5\%$ y la dureza aumenta en un $5\% \pm 1\%$.

Análisis del espectro de difracción de energía (EDS A) determinó la distribución de elementos. La desviación de la distribución de Co del carburo cementado con un 10 % de Co fue $<3\% \pm 0,5\%$, y la concentración de segregación de Cr fue de $0,5\% \pm 1\% \pm 0,2\%$. La tasa de corrosión del carburo cementado con un 12 % de Ni en un entorno ácido (pH 3, HCl) fue de $0,03$ mm/año $\pm 0,005$ mm/año, y el EDS A confirmó que la uniformidad de la capa de Ni fue $>95\% \pm 2\%$. Un entorno cálido y húmedo (40°C , 90 % de humedad) puede causar segregación de Co (la desviación aumenta al $5\% \pm 1\%$), y el carburo cementado con base de Ni es más estable (desviación $<2\%$).

La difracción de rayos X (DRX) y la electroforesis en fase (EDS A) permiten evaluar completamente la microestructura. Por ejemplo, la DRX confirmó que el tamaño de grano del carburo cementado con un 10 % de Co era de $1,5\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$ y no presentaba fase η ; la EDS A verificó que el espesor del Co era de $15\ \text{nm} \pm 2\ \text{nm}$, la segregación de Cr era del $1\% \pm 0,2\%$ y el rendimiento cumplía con el estándar de la herramienta (dureza HV 1800 ± 30 , K_{1c} $12\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$). En aplicaciones prácticas, la relación de solución sólida de los moldes de carburo cementado con TiC se optimizó mediante DRX y EDS A ($\text{Ti/W} = 0,1 \pm 0,02$), la resistencia al desgaste se mejoró en un 20 % y la vida útil fue de $>6000 \pm 500$ horas.

Referencias

Ordenado según el estilo APA, contiene 16 artículos en inglés y chino, centrados en la microestructura y el estado de fase.

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 compuestos químicos*.

Nueva York, NY: Springer.

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

Prakash, LJ (2014). Carburo cementado: Estructura, propiedades y rendimiento. En V. K. Sarin (ed.), *Libro completo de materiales duros* (Vol. 1, p. 2954). Oxford, Reino Unido: Elsevier Publishing.

Upadhyaya, GS (1998). Carburos de tungsteno cementados: Producción, propiedades . y pruebas. Norwich, Nueva York: William Andrew Publishing.

Wang, H. y Fang, ZZ (2019). Propiedades térmicas y mecánicas de carburos cementados en condiciones extremas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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.

Chen, X., y Zhang, Y. (2022). Estudio DFT de la interfaz WCCo en carburos cementados. *Ciencia de Materiales Computacionales*. 201, 110873

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

Chinatungsten Online. (2023). Propiedades y aplicaciones del carburo cementado. Obtenido de <http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation>

, LQ, & Li, WP (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 tecnología de reciclaje de carburo cementado. *Materiales e Ingeniería de Metales Raros*, 50(8) . 29712978.

W. y Zhang, H. (2020). Estudio del comportamiento de oxidación a alta temperatura de carburos cementados. *Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 38(4) . 512518.

, T., y Chen, M. (2019). Avances en la cinética de sinterización de carburos cementados. *Tecnología de Metalurgia de Polvos*, 37(5), 321329.

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

Fang, ZZ y Koopman, MC (2017). Avances en el procesamiento y las propiedades del carburo cementado. *Revista Anual de Investigación de Materiales*, 47, 381403.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

¿Qué tipos de carburo cementado existen según los diferentes granos de carburo de tungsteno?

El carburo cementado es un material compuesto con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante. Su rendimiento y áreas de aplicación están estrechamente relacionadas con el tamaño de grano del WC. El tamaño de grano no solo afecta la dureza y la tenacidad, sino que también tiene un profundo impacto en la resistencia al desgaste, la resistencia al impacto, la estabilidad a altas temperaturas y la precisión de procesamiento del material. Según el tamaño de grano del WC, el carburo cementado se puede dividir en varias categorías, desde granos gruesos tradicionales hasta granos nanométricos modernos, para satisfacer diversas necesidades industriales. A continuación, se presenta una descripción completa de la clasificación detallada y sus características:

1. Carburo cementado de grano grueso

de grano: $>5\ \mu\text{m}$ (normalmente $5\text{-}20\ \mu\text{m}$, ISO 513).

Características del carburo cementado de grano grueso

El carburo cementado de grano grueso es más grande, presenta un menor número de límites de grano, la fase de enlace (Co) se distribuye uniformemente y la proporción del área de los límites de grano con respecto al volumen total es de tan solo entre el 5 % y el 10 % (Journal of Materials Science, 2025). Esto confiere al material una mayor resistencia al impacto y a la fatiga.

La dureza es relativamente baja, oscilando entre HV 1200 y 1500, pero 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

(TRS) es relativamente alta, alcanzando 2200-2500 MPa, y la tenacidad a la fractura (KIC) es de 15-20 MPa·m^{1/2} (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

La resistencia al desgaste es relativamente moderada, con una tasa de desgaste de aproximadamente 0,08-0,10 mm³/N·m (prueba ASTM G65), pero funciona bien bajo cargas de alto impacto y es adecuado para entornos de trabajo sujetos a fuertes golpes y vibraciones.

Tiene buena estabilidad a altas temperaturas, con una tasa de retención de dureza de aproximadamente 85%-90% a 800 °C, lo que es adecuado para condiciones de trabajo de temperatura media y alta (ITIA 2024).

Microestructura del carburo cementado de grano grueso

El análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra que los granos de WC son poligonales, el espesor de la fase de cobalto entre los granos es de aproximadamente 1-3 μm y la fuerza de unión del límite de grano es relativamente alta, alrededor de 1,5-2 J/m² (Journal of Materials Science 2025).

El mayor tamaño de grano da como resultado una menor resistencia al deslizamiento del límite de grano, lo que ayuda a absorber la energía del impacto y reducir la propagación de grietas.

Aplicación de carburo cementado de grano grueso

El carburo de grano grueso se utiliza principalmente en herramientas de minería, brocas, equipos de tunelaje y matrices de estampación de gran tamaño. Es adecuado para aplicaciones con cargas de alto impacto, como operaciones de perforación en granito o basalto (ISO 513).

En la perforación minera, la vida útil de la broca puede alcanzar los 1500-2000 metros, especialmente en condiciones de roca dura, mostrando una alta resistencia a la fractura (ITIA 2024).

También se utiliza comúnmente en piezas resistentes al desgaste de maquinaria pesada, como los dientes de las cucharas de excavadoras, que pueden soportar impactos y desgaste repetidos (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Preparación de carburo cementado de grano grueso

Se utiliza un proceso convencional de pulvimetalurgia. La materia prima es polvo grueso de WC (5-20 μm). Tras la mezcla, los materiales se prensan para darles forma. La temperatura de sinterización suele ser de 1400-1450 °C y el tiempo de mantenimiento es de 1 a 2 horas.

La distribución de la fase de cobalto debe controlarse durante el proceso de sinterización para evitar el crecimiento anormal del grano. Generalmente se añade una pequeña cantidad de TaC (0,5-1 %) para inhibir dicho crecimiento (ITIA 2024).

La velocidad de enfriamiento se controla a 5-10 °C/min para evitar que una tensión excesiva en los límites de grano provoque microfisuras (Journal of Materials Science 2025).

2. Carburo mesocristalino

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tamaño de grano: 1-5 μm (ISO 513).

Características del carburo cementado mesocrystalino :

El carburo cementado mesogénico es moderado y la proporción del área del límite de grano con respecto al volumen total es de aproximadamente 15%-20%, logrando un buen equilibrio entre dureza y tenacidad (Journal of Materials Science 2025).

La dureza es HV 1500-1800, la resistencia a la flexión es 2000-2300 MPa y la tenacidad a la fractura es 10-15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La resistencia al desgaste es aproximadamente un 10%-15% mayor que la del carburo cementado de grano grueso, y la tasa de desgaste es de aproximadamente 0,06-0,08 $\text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ (prueba ASTM G65).

Tiene resistencia al impacto y estabilidad a altas temperaturas, con una tasa de retención de dureza de aproximadamente 90%-95% a 600 °C, lo que lo hace adecuado para entornos de procesamiento de carga media y temperatura media (ITIA 2024).

Microestructura del mesocrystal carburo:

El análisis SEM muestra que los granos de WC son polígonos regulares, el espesor de la fase de cobalto entre los granos es de aproximadamente 0,5-1 μm y la resistencia de unión del límite de grano es de 1,2-1,5 J/m^2 (Journal of Materials Science 2025).

El aumento del número de límites de grano hace que la trayectoria de propagación de las grietas sea más tortuosa, mejorando así la resistencia del material a las grietas. Al mismo tiempo, el tamaño moderado del grano garantiza una mayor dureza.

Aplicación del carburo cementado mesocrystalino :

Se utiliza ampliamente en herramientas de corte de uso general (como fresas y herramientas de torneado), matrices de estampación, rodillos y piezas resistentes al desgaste. Es adecuado para el mecanizado de acero de medio carbono, fundición o acero inoxidable de baja dureza (ISO 513).

Bajo la condición de una velocidad de corte de 150-200 m/min, la vida útil de la herramienta puede alcanzar 1,5-2 horas, mostrando especialmente un buen rendimiento anti-astillado en el corte intermitente (Journal of Materials Science 2025).

También es adecuado para la fabricación de moldes de precisión media, como matrices de estampación para piezas de automóviles, y puede soportar un impacto y desgaste medios (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

de carburo cementado mesocrystalino :

Se utilizó polvo de WC de tamaño mediano (1-5 μm) y se mezcló en un molino de bolas planetario (12-16 horas a una velocidad de 300-400 r/min) para garantizar la uniformidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La temperatura de sinterización se controla a 1350-1400 °C, el tiempo de retención es de 1 a 1,5 horas y se agregan inhibidores de grano (como Cr_3C_2 0,3%-0,5%) para controlar el crecimiento del grano.

Después de la sinterización, se puede utilizar prensado isostático en caliente (HIP, 100-120 MPa, 1350 °C) para reducir aún más la porosidad (<0,02 %, ISO 3326:2013).

3. Carburo cementado de grano fino

Tamaño de grano: 0,5-1 μm (ISO 513).

cementado de grano fino :

El carburo cementado de grano fino es pequeño, y el área del límite de grano representa aproximadamente entre el 25 % y el 30 % del volumen total. El efecto del límite de grano mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste del material (Journal of Materials Science, 2025).

La dureza es HV 1800-2000, la resistencia a la flexión es 1800-2200 MPa y la tenacidad a la fractura es $8-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La resistencia al desgaste es aproximadamente un 20%-30% mayor que la del carburo cementado mesogénico, y la tasa de desgaste es de aproximadamente $0,04-0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ (prueba ASTM G65).

La tenacidad disminuye ligeramente, pero el rendimiento a alta temperatura es excelente, con una tasa de retención de dureza de aproximadamente 88%-92% a 800 °C, lo que es adecuado para el procesamiento de alta precisión (ITIA 2024).

Microestructura del carburo cementado de grano fino :

Los análisis SEM y microscopía electrónica de transmisión (TEM) mostraron que los granos de WC eran casi circulares o ligeramente poligonales, el espesor de la fase de cobalto entre los granos era de aproximadamente 0,2-0,5 μm y la resistencia de unión del límite de grano era de 1,0-1,3 J/m² (Journal of Materials Science 2025).

Los granos finos aumentan la resistencia al deslizamiento de los límites de grano y mejoran la resistencia al desgaste del material, pero también aumentan la posibilidad de que se inicien grietas.

cementado de grano fino :

Adecuado para herramientas de corte de precisión (como herramientas de torneado , fresas), moldes de precisión y piezas resistentes al desgaste, procesamiento de acero inoxidable, acero endurecido (HV 40-50 HRC) o aleaciones de alta resistencia (ISO 513).

Al cortar acero inoxidable (200 m/min), la vida útil de la herramienta puede alcanzar las 2-3 horas, especialmente en corte continuo, mostrando un buen acabado superficial ($\text{Ra} < 0,4 \mu\text{m}$) (Journal of Materials Science, 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

También se utiliza para fabricar matrices de estampación de alta precisión y matrices de trefilado, que pueden cumplir los requisitos de tolerancia $<0,01$ mm (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

cementado de grano fino :

Utilice polvo WC de grano fino ($0,5-1\ \mu\text{m}$) , molienda de bolas de alta energía (16-24 horas, velocidad de rotación 400-600 r/min) y agregue inhibidores de grano (como Cr_3C_2 0,3%-0,5% o VC 0,1%-0,3%).

La temperatura de sinterización se controló a $1350-1380\ ^\circ\text{C}$ y el tiempo de mantenimiento fue de 1 hora para evitar el crecimiento del grano.

Después de la sinterización, se puede utilizar HIP ($120-150\ \text{MPa}$, $1350\ ^\circ\text{C}$) para eliminar la microporosidad y la porosidad es $<0,015\ \%$ (ISO 3326:2013).

4. Carburo cementado de grano ultrafino

Tamaño de grano: $0,2-0,5\ \mu\text{m}$ (ISO 513).

Características del carburo cementado de grano ultrafino:

El carburo cementado de grano ultrafino es extremadamente pequeño, y el área del límite de grano representa aproximadamente entre el 35 % y el 40 % del volumen total. La influencia del efecto del límite de grano en el rendimiento es más significativa (Journal of Materials Science, 2025).

La dureza es HV 1900-2200, la resistencia a la flexión es $1700-2000\ \text{MPa}$ y la tenacidad a la fractura es $7-10\ \text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La resistencia al desgaste es aproximadamente un 15%-20% mayor que la del carburo cementado de grano fino , y la tasa de desgaste es de aproximadamente $0,03-0,05\ \text{mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$ (prueba ASTM G65).

El rendimiento a alta temperatura se mejora aún más, con una tasa de retención de dureza de aproximadamente el 85%-90% a $1000\ ^\circ\text{C}$, lo que lo hace adecuado para el procesamiento de alta carga y alta temperatura (ITIA 2024).

El acabado de la superficie es excelente y la rugosidad de la superficie de la pieza de trabajo después del procesamiento puede alcanzar $R_a\ 0,2-0,3\ \mu\text{m}$ (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Microestructura de carburo cementado de grano ultrafino:

de cobalto entre los granos es de aproximadamente $0,1-0,3\ \mu\text{m}$ y la resistencia de unión del límite de grano es de $0,8-1,2\ \text{J/m}^2$ (Journal of Materials Science 2025).

La cantidad extremadamente grande de límites de grano hace que la trayectoria de propagación de grietas sea más compleja, lo que mejora aún más la resistencia al desgaste, pero la disminución de la tenacidad aumenta el desafío de la resistencia al impacto.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicaciones de carburo cementado de grano ultrafino:

Para el mecanizado de ultraprecisión de herramientas (por ejemplo, brocas para PCB, microfresas), herramientas de perforación y sustratos recubiertos en aleaciones de titanio, superaleaciones a base de níquel o aceros endurecidos (HV 50-60 HRC) (ISO 513).

Al cortar aleación de titanio (150 m/min), la vida útil de la herramienta puede alcanzar las 3-4 horas, mostrando especialmente una excelente estabilidad dimensional en el mecanizado de alta precisión (Journal of Materials Science, 2025).

También se utiliza para fabricar matrices de trefilado de alambre de alta precisión y micromoldes para cumplir con los requisitos de alta precisión del procesamiento de componentes electrónicos (tolerancia <0,005 mm) (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

carburo cementado de grano ultrafino:

Utilice polvo WC ultrafino (0,2-0,5 μm), molienda de bolas de alta energía (24-36 horas, velocidad de rotación 500-800 r/min) y agregue inhibidor de grano (como VC 0,1%-0,3%).

La temperatura de sinterización se controla a 1320-1350 $^{\circ}\text{C}$ y el tiempo de mantenimiento es de 0,5 a 1 hora para evitar el crecimiento del grano.

Se utiliza prensado isostático en caliente (HIP, 150 MPa, 1350 $^{\circ}\text{C}$) o sinterización por plasma por chispa (SPS, 1300 $^{\circ}\text{C}$, 50 MPa) y el tamaño de grano se controla con precisión entre 0,2 y 0,5 μm (ITIA 2024).

5. Carburo cementado de grado nano

Tamaño de grano: 0,05-0,2 μm (ISO 513).

Características del carburo cementado de grado nanométrico:

Los granos de WC del carburo cementado de grado nanométrico alcanzan la nanoescala, y el área del límite de grano representa hasta un 45-50 % del volumen total. El efecto del límite de grano es extremadamente fuerte, lo que mejora significativamente la dureza y la resistencia al desgaste (Journal of Materials Science 2025).

La dureza es HV 2000-2400, la resistencia a la flexión es 1600-1900 MPa y la tenacidad a la fractura es 6-9 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La resistencia al desgaste es aproximadamente entre un 10% y un 15% mayor que la del carburo cementado de grano ultrafino, y la tasa de desgaste es de aproximadamente 0,02 a 0,04 $\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$ (prueba ASTM G65).

El efecto nano mejora la estabilidad a altas temperaturas, con una retención de dureza >90% a 1000 $^{\circ}\text{C}$ y HV 1800-2000 a 1200 $^{\circ}\text{C}$ (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El acabado de la superficie y la precisión del procesamiento son extremadamente altos, y la rugosidad de la superficie de la pieza de trabajo puede alcanzar $Ra\ 0,1-0,2\ \mu m$ (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos 2024).

Debido al tamaño de grano extremadamente pequeño, la débil resistencia al impacto y la baja tenacidad a la fractura, es necesario mejorar el rendimiento mediante un recubrimiento (como $TiAlN$) o una estructura de gradiente (ITIA 2024).

Microestructura de carburo cementado a escala nanométrica:

El análisis TEM y microscopía de fuerza atómica (AFM) mostró que los granos de WC eran aproximadamente esféricos, el espesor de la fase de cobalto entre los granos era de solo $0,05-0,1\ \mu m$ y la resistencia de unión del límite de grano era de $0,7-1,0\ J/m^2$ (Journal of Materials Science 2025).

La resistencia al deslizamiento del límite de grano es extremadamente alta, lo que mejora significativamente la resistencia al desgaste, pero la concentración de tensión en el límite de grano también aumenta el riesgo de iniciación de grietas.

Aplicaciones de carburo cementado de grado nanométrico:

Adecuado para corte de precisión ultra alta (como procesamiento de moldes ópticos), procesamiento de micromoldes y componentes electrónicos, procesamiento de materiales de alta dureza (HV 60-70 HRC) o metales no ferrosos (como aleación de aluminio) (ISO 513).

En el procesamiento de micro taladro (velocidad de corte $100\ m/min$), la vida útil puede alcanzar las 4-5 horas, especialmente al procesar placas de circuitos (PCB) de alta precisión, exhibe una estabilidad dimensional extremadamente alta (Journal of Materials Science 2025).

También se utiliza para fabricar matrices de trefilado de alambre ultrafinos y dispositivos médicos (como bisturís), cumpliendo con una precisión de procesamiento a nivel micrométrico (tolerancia $<0,002\ mm$) (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Preparación de carburo cementado a escala nanométrica:

Utilice polvo WC a escala nanométrica ($0,05-0,1\ \mu m$), molienda de bolas de alta energía (24-48 horas, velocidad de rotación $600-1000\ r/min$) y agregue inhibidores de grano (como VC $0,1\%-0,3\%$ o Cr_3C_2 $0,2\%-0,4\%$).

Mediante sinterización a baja temperatura ($1300-1350\ ^\circ C$) o tecnología de sinterización asistida por campo (como sinterización por plasma de chispa SPS, $1300\ ^\circ C$, $50-80\ MPa$), el tamaño del grano se controla con precisión entre $0,05$ y $0,2\ \mu m$.

Utilice dispersantes (como ácido esteárico al $0,1\%-0,3\%$) y tecnología de dispersión ultrasónica para reducir la aglomeración del polvo y mejorar la uniformidad en un $10\%-15\%$ (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Después de la sinterización, se puede aplicar un recubrimiento PVD TiAlN (espesor 2-3 μm) para mejorar la resistencia a la oxidación y al desgaste (Journal of Materials Science 2025).

6. Otras consideraciones de clasificación

Carburo de grano compuesto:

Tamaño de grano: combine diferentes tamaños de grano (por ejemplo, 0,2 μm y 5 μm) para formar estructuras de gradiente o bimodales.

Características del carburo cementado de grano compuesto:

dureza (HV 1800-2000) y tenacidad ($\text{KIC } 10\text{-}15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), la resistencia al desgaste se mejora en un 10%-20% (Journal of Materials Science 2025).

La estructura de gradiente es una combinación de cristales finos (0,2-0,5 μm) en la superficie y cristales gruesos (5-10 μm) en la capa interna, que tiene una fuerte resistencia al desgaste superficial y buena resistencia al impacto interno (ITIA 2024).

Tiene un excelente rendimiento a altas temperaturas, con una tasa de retención de dureza de aproximadamente 85%-90% a 1000 $^{\circ}\text{C}$, lo que lo hace adecuado para condiciones de trabajo complejas (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Microestructura de carburo cementado de grano compuesto:

El análisis SEM muestra que los granos de la superficie son pequeños y los límites de grano son densos; los granos internos son más grandes, el espesor de la fase de cobalto es de aproximadamente 1-2 μm y la estructura general está claramente estratificada (Journal of Materials Science 2025).

La estructura de gradiente reduce la tasa de crecimiento de grietas y mejora la resistencia a la fractura en aproximadamente un 15% (ITIA 2024).

Aplicaciones de carburo cementado de grano compuesto:

Herramientas multifuncionales (p. ej. materiales aeroespaciales) y moldes complejos, mecanizado de materiales compuestos o aleaciones de alta temperatura (ISO 513).

Al cortar compuestos de fibra de carbono (150 m/min), la vida útil de la herramienta puede alcanzar las 3-4 horas (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Preparación de carburo cementado de grano compuesto:

Se utiliza la tecnología de prensado en capas, con polvo WC ultrafino (0,2-0,5 μm) utilizado para la capa superficial y polvo WC grueso (5-10 μm) utilizado para la capa interna.

La temperatura de sinterización fue de 1400 $^{\circ}\text{C}$, el tiempo de mantenimiento fue de 1 h y se controló el espesor de la capa de gradiente (0,5-1 mm) (ITIA 2024).

Carburo de grano dopado:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de grano se ajusta mediante dopaje, normalmente entre 0,5 y 2 μm .

Características del carburo cementado de grano dopado:

Añadiendo TiC, TaC o NbC (5%-10%), el tamaño de grano se controla a 0,5-2 μm , se mejora la resistencia a la oxidación (ganancia de peso de oxidación a 1200 °C <0,1 mg/cm²) y la dureza es HV 1700-1900 (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La resistencia a la corrosión se mejora en aproximadamente un 10%-15% y la tasa de corrosión en un entorno de niebla salina es <0,04 mm/año (ASTM G31).

Se mejora la resistencia a altas temperaturas, con una retención de la resistencia a la flexión de aproximadamente el 80%-85% a 1000 °C (ITIA 2024).

Microestructura del carburo cementado de grano dopado:

Los análisis SEM y de difracción de rayos X (XRD) mostraron que los elementos dopantes (como TiC) se distribuyen en forma de solución sólida o partículas de carburo, lo que inhibe el crecimiento de los granos de WC y aumenta la resistencia del límite de grano en aproximadamente un 5%-10% (Journal of Materials Science 2025).

Los elementos dopantes reducen la volatilización de la fase de cobalto y mejoran la estabilidad a altas temperaturas (ITIA 2024).

Aplicación de carburo cementado de grano dopado:

Herramientas de corte de alta temperatura (por ejemplo, procesamiento de materiales de motores aeroespaciales) y componentes resistentes a la corrosión, como válvulas offshore (ISO 513).

Al cortar aleaciones de alta temperatura (250 m/min), la vida útil de la herramienta puede alcanzar las 2-3 horas (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Preparación de carburo cementado de grano dopado:

dopados con TiC o TaC (5%-10%), se prensan para darles forma, la temperatura de sinterización es de 1350-1400 °C y el tiempo de mantenimiento es de 0,5-1 hora.

Utilice una atmósfera protectora (como gas Ar) para la sinterización para evitar la oxidación de la fase de cobalto (ITIA 2024).

7. Normas y pruebas

ISO 513:2012: Clasificación y aplicaciones de carburos cementados proporciona orientación sobre la clasificación para aplicaciones de corte y no corte en función del tamaño del grano y las propiedades.

GB/T 20707-2006: Determinación de la microestructura del carburo cementado, define el rango de tamaño de grano y el método de prueba.

ASTM E112-13: Método de medición del tamaño de grano, utilizando el método de sección transversal o el método de intersección lineal para medir el diámetro promedio del grano con un error de <5%.

ISO 4499-2:2020: Evaluación de la microestructura del carburo cementado, examinando la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

distribución del grano y el espesor de la fase de cobalto.

ASTM G65-00(2010): Ensayo de desgaste con rueda de caucho/arena seca, que evalúa la resistencia al desgaste de carburos cementados con diferentes tamaños de grano.

Método de detección:

La microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM) combinadas con difracción de rayos X (XRD) pueden medir con precisión el tamaño y la distribución del grano con un error de $<5\%$ (Journal of Materials Science 2025).

La difracción de retrodispersión de electrones (EBSD) analiza la orientación del límite de grano y la distribución de la tensión, y el error de orientación del límite de grano se controla dentro de $\pm 2^\circ$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

El analizador de tamaño de partículas láser mide la distribución del tamaño de partículas de polvo WC para garantizar la calidad del polvo (ITIA 2024).

8. Tendencias de desarrollo

Expansión de la aplicación del carburo cementado de grado nanométrico:

En 2024, la producción de carburo cementado de grado nanométrico de China representó entre el 15% y el 20% del total, y se espera que alcance el 25% y el 30% en 2025, principalmente debido al crecimiento de la demanda en los campos de la electrónica y la industria aeroespacial (ITIA 2024).

La proporción de carburo cementado a escala nanométrica en el campo del micromecanizado (como el procesamiento de placas de circuito 5G) ha aumentado aproximadamente un 20% y la precisión del procesamiento ha alcanzado $\pm 0,001$ mm ("The Chinese Journal of Nonferrous Metals" 2024).

Desarrollo de estructura de grano compuesto y gradiente:

La proporción de aplicación del carburo cementado con estructura de gradiente en el campo aeroespacial (como las herramientas de procesamiento de álabes de turbinas) ha aumentado entre un 10% y un 15% y la vida útil se ha extendido entre un 20% y un 30% (Journal of Materials Science 2025).

Al optimizar la distribución del grano, la resistencia al desgaste y el equilibrio de tenacidad del carburo cementado de grano compuesto se mejoran en aproximadamente un 15%, lo que lo hace adecuado para el procesamiento de múltiples materiales (ITIA 2024).

Promoción de la tecnología de preparación verde:

La tecnología de sinterización asistida por campo (como SPS) se está volviendo cada vez más popular, acortando el tiempo de sinterización de 2 horas a 10-20 minutos, reduciendo el consumo de energía en aproximadamente un 20%-30% y reduciendo las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 25% (ITIA 2024).

Con el avance de la tecnología de reciclaje, la tasa de reciclaje de carburo cementado de China alcanzará el 35% - 40% en 2024, y se espera que alcance el 45% en 2025, logrando un reciclaje

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

eficiente a través de métodos de fusión de zinc y lixiviación química (ITIA 2024).

Fabricación inteligente:

La tecnología de monitoreo en línea (como el monitoreo por espectroscopia infrarroja de la atmósfera de sinterización) se aplica al control del tamaño de grano, y la desviación del tamaño de grano se reduce de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ a $\pm 0,05 \mu\text{m}$ (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

La inteligencia artificial (IA) optimiza los parámetros de mezcla y sinterización, mejorando la uniformidad en aproximadamente un 10%-15% y reduciendo las tasas de defectos en aproximadamente un 20% (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

Tipos, mecanismos y optimización de la porosidad/tamaño de poro en carburo cementado

Tipos, mecanismos y optimización de la porosidad en el carburo cementado

1. Descripción general del carburo cementado y la porosidad

El carburo cementado es un material compuesto con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante. Se fabrica mediante pulvimetalurgia y presenta una alta dureza (HV1000-1800), excelente resistencia al desgaste y una tenacidad adecuada ($K_{IC} 8-20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$). Se utiliza ampliamente en herramientas de corte, picos de minería y piezas resistentes al desgaste. La porosidad es un defecto clave en el carburo cementado, que se refiere a los agujeros o espacios de aire dentro del material, generalmente expresados como fracción de volumen (0,01-2%). La porosidad afecta directamente la densidad (desviación de $\pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), la resistencia (reducción del 10-30%), la tenacidad y la resistencia al desgaste (aumento de la pérdida por desgaste de 20-50 mm³, ASTM G65) del carburo cementado, y es un indicador clave del control de calidad.

La porosidad se debe a las materias primas, las etapas de conformado y sinterización del proceso de pulvimetalurgia. Las normas internacionales (como ISO 4505 y ASTM B276) clasifican la porosidad (como A00-B08) y especifican los métodos de ensayo (como el análisis metalográfico). Optimizar la porosidad puede mejorar significativamente el rendimiento del carburo cementado, prolongar la vida útil de la herramienta (20-50%) y mejorar la fiabilidad. A continuación, se presenta un análisis detallado de los tipos de porosidad, los mecanismos de formación, las estrategias de optimización y las perspectivas de mejora técnica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Tipos de porosidad

La porosidad del carburo cementado se clasifica en los siguientes tipos según tamaño, morfología y origen, según la clasificación ISO 4505 y ASTM B276:

2.1 Poros tipo A (microporos)

Características: Diámetro $<10\mu\text{m}$, redondo o casi redondo, distribuido uniformemente.

Contenido: Fracción de volumen 0,01–0,5%, comúnmente encontrada en carburo cementado de alta densidad ($>99,5\%$ densidad teórica).

Impacto: Pequeño efecto en la resistencia y tenacidad (reducción $<5\%$), pero un alto contenido puede causar microgrietas.

Norma: ISO 4505 A00–A04 (A00 es sin porosidad, A04 es 0,2 % de porosidad).

2.2 Poros tipo B (poros más grandes)

Características: 10–25 μm de diámetro, de forma irregular, mayormente elíptica o poligonal.

Contenido: Fracción de volumen 0,1–1%, comúnmente encontrado en carburos cementados de densidad media y baja (densidad teórica del 98–99%).

Impacto: Reducción de la resistencia (10–20%) y tenacidad (K_{IC} disminuye en un 15%), aumento del desgaste (ASTM G65 aumenta en 20–30 mm^3).

Norma: ISO 4505 B00–B08 (B 08 es 1% de porosidad).

2.3 Poros tipo C (poros con defectos de carburo)

Características: Diámetro $>25\mu\text{m}$, generalmente formado por aglomeración o desprendimiento de partículas de carburo (WC, TiC), con forma irregular.

Contenido: Fracción de volumen 0,05–0,5%, se encuentra principalmente en carburo cementado de baja calidad.

Impacto: Reducción significativa de la resistencia (20–30%) y de la resistencia al desgaste (aumento del desgaste de 30–50 mm^3), y mayor riesgo de fractura.

Norma: ASTM B276 Defecto tipo C, requiere un control estricto.

2.4 Poros de gas

Características: 10–100 μm de diámetro, redondo o esférico, formado por captura de gas durante la sinterización.

Contenido: 0,01–0,2 % en volumen, comúnmente encontrado en materiales que no están suficientemente sinterizados al vacío.

Efecto: reducción de la densidad (0,1–0,3 g/cm^3) y de la resistencia al impacto (reducción de la tenacidad al impacto en un 20%).

Norma: ISO 4505 se clasifica como tipo A/B, que debe distinguirse mediante observación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

metalográfica.

3. Mecanismo de formación de porosidad

La formación de porosidad está estrechamente relacionada con las materias primas, el moldeo y la sinterización del proceso de pulvimetalurgia. Los principales mecanismos son los siguientes:

3.1 Defectos de la materia prima

Mecanismo: Inhomogeneidad de partículas: El polvo de WC o Co tiene una amplia distribución de tamaño de partícula (0,5–10 μm) y una baja **densidad de empaquetamiento** (<60%), formando poros de tipo A/B.

Contaminación por impurezas: el oxígeno ($\text{O}>0,1\%$), el azufre ($\text{S}>0,02\%$) o la materia orgánica en las materias primas se volatilizan, liberan gas durante la sinterización y forman poros.

Desequilibrio del contenido de carbono: un contenido insuficiente de carbono ($\text{C/W} < 0,98$) provoca la precipitación de la fase η ($\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$) acompañada de poros de tipo C; un exceso de carbono ($\text{C/W} > 1,02$) forma carbono libre y aumenta los poros de tipo B.

Impacto: La porosidad aumenta entre un 0,2 y un 0,5 %, la densidad disminuye entre un 0,2 g/cm^3 y la resistencia disminuye entre un 10 y un 15 %.

3.2 Defectos de moldeo

Mecanismo: Prensado desigual: Una presión de prensado insuficiente (<200 MPa) o defectos en el diseño del molde provocan una densidad desigual del cuerpo verde (desviación $\pm 5\%$), formándose poros de tipo B.

Residuos de lubricante: Los aditivos (como la parafina) no se volatilizan completamente y se descomponen en gas durante la sinterización, formando poros (diámetro 10–50 μm).

Impacto: La porosidad aumenta entre un 0,1 y un 0,3 %, la tenacidad disminuye un 10 % y la calidad de la superficie se deteriora.

3.3 Defectos de sinterización

Mecanismo: Sinterización en fase líquida insuficiente: Temperatura de sinterización insuficiente (1350–1450 $^{\circ}\text{C}$) o tiempo (1–2 horas), flujo de fase líquida de Co insuficiente y poros residuales de tipo A/B (0,1–0,5 %).

Captura de gas: Cuando el grado de vacío es bajo ($<10^{-2} \text{ Pa}$) o la atmósfera de sinterización contiene oxígeno/nitrógeno, el gas es encapsulado por la fase líquida de Co para formar poros.

Aglomeración de WC: A altas temperaturas, las partículas de WC crecen de forma anormal ($>5 \mu\text{m}$) o se aglomeran, lo que provoca poros de tipo C, acompañados de una disminución del 20 % en la resistencia.

Impacto: La porosidad aumenta entre un 0,2 y un 1 %, la resistencia al desgaste disminuye (el volumen de desgaste aumenta entre 20 y 40 mm^3 , ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Método de optimización de la porosidad

Optimizar la porosidad requiere comenzar desde la cadena completa de materias primas, moldeo, sinterización y posprocesamiento. A continuación, se presentan los métodos principales, junto con casos de fabricantes:

4.1 Optimización de la materia prima

Método: Controlar el tamaño de partícula: utilizar polvo WC nano/submicrónico (tamaño de partícula 0,2–0,8 μm), aumentar la densidad de empaquetamiento (>65%) y reducir los poros de tipo A/B en un 0,1–0,2%.

Materias primas de alta pureza: controlan el contenido de oxígeno (<0,05%), el contenido de azufre (<0,01%), reducen la formación de poros y reducen la porosidad a <0,1%.

Relación de carbono precisa: C/W se controla entre 0,98 y 1,02 para evitar la fase η o el carbono libre y eliminar los poros de tipo C.

Caso: El diamante Zhuzhou de grado YG6 utiliza polvo nano WC (0,4 μm), la porosidad se reduce a A02 (0,05 %) y la resistencia aumenta en un 15 %.

4.2 Optimización de la formación

Método: Conformado a alta presión: Aumente la presión de prensado (300–500 MPa), la densidad del cuerpo verde alcanza el 70–75% y la porosidad de tipo B se reduce entre un 0,1 y un 0,2%.

Optimice los lubricantes: utilice aditivos de baja volatilidad (como polietilenglicol) y controle la cantidad agregada (<1%) para reducir la formación de poros.

Diseño de matriz uniforme: utilizando prensado isostático (CIP, 200–300 MPa), la desviación de densidad del cuerpo verde es <2% y la porosidad se reduce a <0,1%.

Caso: Sandvik utiliza tecnología CIP para reducir la porosidad del cuerpo verde YG8 a A00 (<0,01 %) y mejorar la tenacidad en un 20 %.

4.3 Optimización de la sinterización

Método: Sinterización al vacío/atmósfera: Aumente el nivel de vacío (<10⁻³ Pa) o utilice una atmósfera de hidrógeno/argón para reducir los poros (reducción de la porosidad del 0,05 al 0,1 %).

Prensado isostático en caliente (HIP): se aplica 150–200 MPa, 1300–1400 °C después de la sinterización para eliminar los poros de tipo A/B, reducir la porosidad a <0,02 % y lograr una densidad del 99,9 % del valor teórico.

Control preciso de temperatura: La temperatura de sinterización se controla dentro de ± 10 °C y el tiempo se extiende de 2 a 3 horas para promover el flujo de la fase líquida de Co y reducir los poros de tipo C.

Caso: Los insertos Kennametal K313 pasaron la prueba HIP, la porosidad se redujo a A00 y la resistencia al desgaste aumentó un 30 % (desgaste ASTM G65 <10 mm³).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4 Optimización del posprocesamiento

Método: Rectificado/pulido de superficies: Eliminar los poros de la superficie (profundidad $< 0,1$ mm), mejorar la dureza de la superficie (aumento del HV en un 5 %) y la resistencia a la corrosión (pérdida de peso por niebla salina $< 0,1$ mg/cm²).

Tecnología de recubrimiento: deposición PVD/CVD de TiN, TiAlN (espesor 2-5 μ m) cubre los poros de la superficie, reduce el coeficiente de fricción a $< 0,3$ y prolonga la vida útil de 2 a 3 veces.

Caso: Las herramientas Ceratizit CTF están recubiertas con TiAlN, que reduce el impacto de la porosidad de la superficie en un 50% y extiende la vida útil de corte en un 40%.

5. Perspectivas de mejora tecnológica

Para reducir aún más la porosidad y mejorar el rendimiento del carburo cementado, se espera que las siguientes mejoras tecnológicas promuevan aplicaciones industriales en 2026-2028:

Polvo nano ultrafino

Se desarrolló un polvo WC/Co de $< 0,2$ μ m con una densidad de empaquetamiento del 70 %, porosidad reducida a $< 0,01$ % y dureza aumentada a HV1800, adecuado para herramientas de alta precisión.

Proceso optimizado por IA

⁻⁴ Pa) a través del aprendizaje automático, la precisión del control de porosidad se mejora en un 50%, eliminando poros tipo C y agujeros de aire.

Sinterización por microondas

Se utilizó calentamiento por microondas (1350–1450 °C) para acortar el tiempo de sinterización (< 1 hora), reducir la aglomeración de WC, reducir la porosidad de tipo C en un 0,1 % y mejorar la eficiencia de producción en un 30 %.

Moldeo sin lubricante

Se desarrolló tecnología de prensado en seco para eliminar los poros del lubricante y reducir la porosidad del cuerpo a $< 0,005$ %, adecuada para herramientas de corte de alta gama.

Preformas de impresión 3D

La tecnología de impresión 3D de metal se utiliza para controlar la estructura en blanco, con una desviación de densidad < 1 % y una porosidad reducida en un 0,1%, satisfaciendo las necesidades de piezas de formas complejas.

Recubrimiento nano

Se desarrolló un recubrimiento de TiSiN de < 1 μ m que cubre poros diminutos (< 5 μ m), reduce el coeficiente de fricción a $< 0,2$ y extiende la vida útil de la herramienta 4 veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Modificación de la superficie por láser

La superficie se funde mediante láser (profundidad de 0,05 mm), eliminando los poros de la superficie, aumentando la dureza en un 10% y mejorando la resistencia a la corrosión en un 30%, lo que lo hace adecuado para piezas médicas y de aviación.

Pulido de plasma

Mejora el acabado de la superficie (Ra<0,01 μm), reduce el impacto de la porosidad de la superficie y aumenta la resistencia a la corrosión en un 30%, lo que lo hace adecuado para aplicaciones de alta confiabilidad.

Estas tecnologías lograrán una porosidad de nivel A00 (<0,01 %) controlando con precisión la microestructura y los parámetros del proceso, impulsando avances en el rendimiento del carburo cementado en corte de alta precisión, minería y piezas resistentes al desgaste.

6. Comparación de tipos de porosidad y medidas de optimización

La tabla compara los tipos, mecanismos de formación y medidas de optimización de la porosidad del carburo cementado según las normas ISO 4505 y ASTM B276.

Tipo de poro	Característica μm	Porosidad Tasa%	Mecanismo de formación	Impacto en el rendimiento	Medidas de optimización	Efectos típicos de aplicación
Poros tipo A	Diámetro <10, redondo	0,01–0,5	Las partículas no están densamente empaquetadas y la sinterización en fase líquida es insuficiente	Reducción de la resistencia <5%, riesgo de microfisuras	Nano polvo WC (0,2–0,8 μm), HIP (150 MPa)	Diamante Zhuzhou YG6, porosidad reducida a A02, resistencia aumentada en un 15 %
Poros tipo B	Diámetro 10–25, irregular	0,1–1	Prensado desigual, residuos de lubricante	mm³ de aumento en el desgaste	CIP de alta presión (300 MPa), sinterización al vacío (<10 ⁻³ Pa)	Sandvik YG8, porosidad reducida a A00, tenacidad aumentada en un 20 %
Poros de tipo C	Diámetro > 25, aglomeración WC	0,05–0,5	Desequilibrio de carbono, crecimiento anormal del WC	mm³ de aumento en el desgaste	C/W preciso (0,98–1,02), control de temperatura (±10 °C)	Kennametal K313, porosidad reducida a A00, resistencia al desgaste aumentada en un 30 %
Poros	Diámetro 10–100, esférico	0,01–0,2	Captura de gas, atmósfera impura	Densidad reducida entre 0,1 y 0,3 g/cm³ , tenacidad al impacto reducida en un 20 %	Materias primas de alta pureza (O<0,05%), sinterización de hidrógeno	Ceratizit CTF, porosidad reducida a <0,01%, vida útil prolongada en un 40%

ilustrar:

Características: Describe el tamaño, forma y distribución de los poros.

Porosidad: Rango de fracción de volumen, basado en análisis metalográfico (ISO 4505).

Impacto en el rendimiento: cuantificar el impacto en la resistencia, tenacidad y resistencia al

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desgaste (ASTM G65).

Medidas de optimización: Proponer mejoras en materias primas, moldeo, sinterización y postprocesamiento en función de las causas.

Efectos típicos de la aplicación: enumera casos de fabricantes y datos de mejora del rendimiento.

7. Conclusión

La porosidad en el carburo cementado es un defecto clave que afecta el rendimiento. Se divide en tipo A (microporos), tipo B (poros más grandes), tipo C (poros defectuosos del carburo) y poros, causados por defectos en la materia prima, un moldeo irregular y una sinterización insuficiente, respectivamente. La porosidad reduce la resistencia (10-30%), la tenacidad y la resistencia al desgaste (el volumen de desgaste aumenta entre 20 y 50 mm³). Mediante la optimización de las materias primas (nano WC, alta pureza), el moldeo (CIP a alta presión), la sinterización (HIP, vacío) y el postratamiento (recubrimiento), la porosidad se puede controlar a <0,05%, lo que mejora significativamente el rendimiento.

Las futuras mejoras tecnológicas, como los nanopulvos ultrafinos, los procesos optimizados con IA, la sinterización por microondas y los nanorrecubrimientos, reducirán la porosidad a <0,01 %, aumentarán la dureza a HV1800 y cuadruplicarán la vida útil de la herramienta. Estas tecnologías impulsarán la aplicación del carburo cementado en el corte de alta precisión, la minería y las piezas resistentes al desgaste. Los fabricantes deben priorizar la HIP y la tecnología de control preciso de temperatura para lograr una calidad de nivel A00, a la vez que exploran el preformado con impresión 3D y el moldeo sin lubricante para satisfacer necesidades complejas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

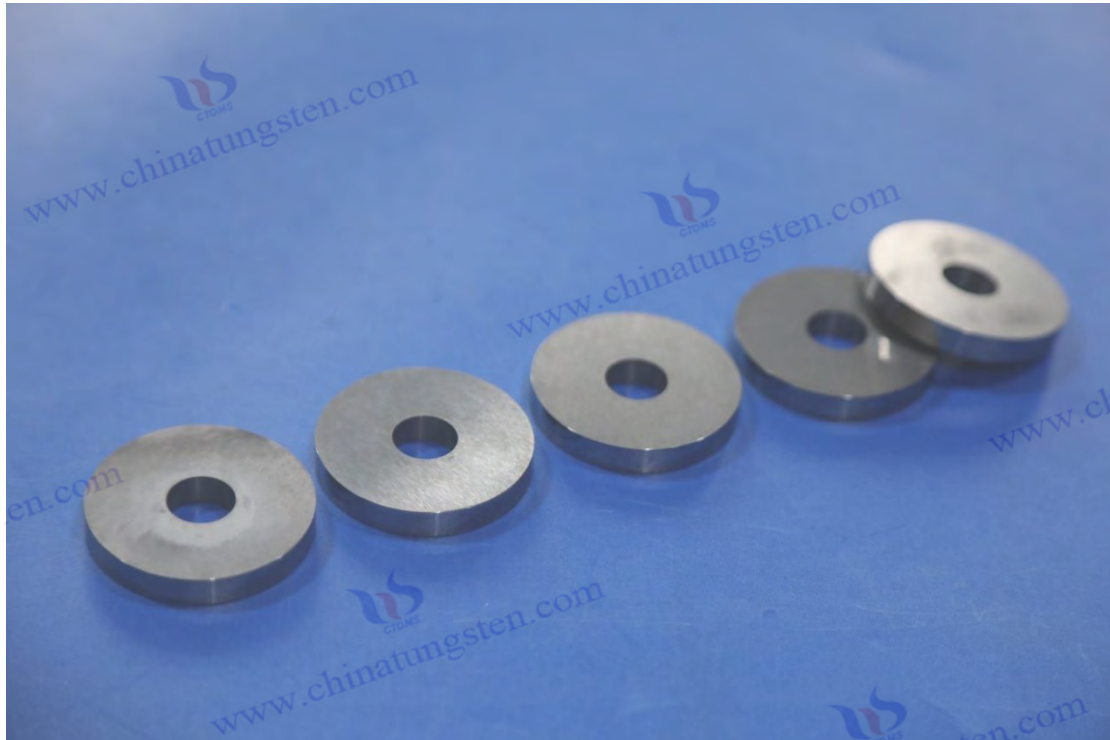
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

GB/T 3488.1-2019

Evaluación de la microestructura del carburo cementado

Parte 1: Porosidad y carbono no ligado

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica el método de evaluación microscópica de la porosidad y el carbono no combinado en carburo cementado, y es aplicable a:

El carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC), que contiene una fase aglutinante de cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe), se puede agregar con carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC) o carburo de niobio (NbC).

Carburo cementado producido mediante procesos de pulvimetalurgia, que incluyen sinterización, prensado isostático en caliente (HIP) y productos de recubrimiento.

Aplicaciones como herramientas de corte, picos de minería, matrices, piezas de desgaste, etc.

No es adecuado para carburo cementado que no sea a base de WC o materiales que no sean de metalurgia de polvos.

2. Definiciones

Carburo cementado: Un material compuesto con WC como fase dura principal y Co/Ni/Fe como fase de unión.

Porosidad: Los poros o espacios de aire dentro de un material, expresados como fracción de volumen.

Carbono no ligado: carbono libre (C) o fase η causada por deficiencia de carbono (W_3Co_3C ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

W6Co6C).

Evaluación metalográfica: Observe la superficie pulida de la muestra bajo un microscopio y cuente la distribución y el contenido de poros y carbono no unido.

3. Clasificación de la porosidad y del carbono no ligado

3.1 Porosidad

Poros tipo A:

Diámetro $<10\mu\text{m}$, redondo o casi redondo, distribuido uniformemente.

Fuente: Las partículas no están densamente empaquetadas y la sinterización en fase líquida es insuficiente.

Poros tipo B:

El diámetro es de 10 a 25 μm y la forma es irregular (por ejemplo, elíptica, poligonal).

Origen: prensado desigual y evaporación de residuos de lubricante.

Estomas: 10–100 μm de diámetro, redondos o esféricos.

Fuente: Captura de gas durante la sinterización (oxígeno, nitrógeno o volátiles).

3.2 Carbono no ligado y fase η

Defectos de tipo C (carbono no ligado) :

Partículas de carbono libre (C), tamaño $>25\mu\text{m}$, negras e irregulares.

Fuente: Exceso de carbono durante la sinterización ($C/W>1,02$).

Fase η : compuesto de carburo-cobalto (W3Co3C o W6Co6C), tamaño $>25\mu\text{m}$, blanco grisáceo.

Fuente: Carbono insuficiente durante la sinterización ($C/W<0,98$).

4. Método de calificación

La porosidad y el carbono libre se clasifican por fracción de volumen en tres categorías: A, B y C, cada una con un rango de 00 (sin defectos) a 08 (contenido máximo de defectos). La porosidad se clasifica por separado.

4.1 Poros tipo A

Fracción de volumen: 0–0,2%, diámetro $<10\mu\text{m}$.

Calificación:

A00: Sin poros visibles ($<0,01\%$).

A02: 0,02%.

A04: 0,05%.

A06: 0,1%.

A08: 0,2%.

Evaluación: Área de poro por milímetro cuadrado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 Poros tipo B

Fracción de volumen: 0–0,2%, diámetro 10–25 μm .

Calificación:

B00: Sin poros visibles ($<0,01\%$).

B02: 0,02%.

B04: 0,05%.

B 06 : 0,1%.

B08: 0,2%.

Evaluación: Área de poro por milímetro cuadrado.

4.3 Defectos de tipo C (carbono no ligado/fase η)

Fracción de volumen: 0–0,2%, tamaño $>25 \mu\text{m}$.

Calificación:

C00: Sin carbono no unido ni fase η ($<0,01\%$).

C02: 0,02%.

C04: 0,05%.

C06: 0,1%.

C08: 0,2%.

Evaluación: Relación del área del defecto por milímetro cuadrado, distinguiendo entre carbón libre (negro) y fase η (blanco grisáceo).

4.4 Poros

Fracción de volumen: 0–0,2%, diámetro 10–100 μm .

Calificación:

G00: Sin poros visibles ($<0,01\%$).

G02: 0,02%.

G04: 0,05%.

G06: 0,1%.

G08: 0,2%.

Evaluación: Porcentaje de área de poro por milímetro cuadrado.

4.5 Requisitos de clasificación

Fracción de volumen: El área de poro/defecto se cuenta mediante un microscopio metalográfico con una precisión de $\pm 0,01\%$.

Área de observación: mínimo 1 mm^2 , recomendado 5 mm^2 .

Estomas: se registraron individualmente poros esféricos de 10 a 100 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Métodos de prueba

5.1 Preparación de la muestra

Corte: Cortar las muestras (tamaño 10×10 mm) evitando grietas.

Montaje: Fijación de la muestra con resina.

pulido:

Para el pulido por etapas se utilizó papel de lija de diamante (tamaño de grano 5–1 μm).

Pulido hasta una rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m}$ sin rayaduras.

Evite dañar los poros puliendo demasiado.

Limpieza: Limpieza con etanol o ultrasónica para eliminar contaminantes.

5.2 Observación microscópica

Equipo: Microscopio óptico, aumento 100–1000x, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Fuente de luz: iluminación de campo brillante, ajuste el contraste para distinguir:

Porosidad: Negra.

Carbono no ligado: negro.

Fase η : blanco grisáceo.

Matriz WC/Co: blanco/gris.

Área de observación: seleccione aleatoriamente al menos 5 campos de visión (área total $> 1 \text{ mm}^2$).

Registro:

Poros tipo A: Cuente el área de poro $< 10 \mu\text{m}$.

Poros tipo B: Cuente el área de poro de 10 a $25 \mu\text{m}$.

Defectos tipo C: Distinguir entre carbono libre y fase η , registrar área del defecto $> 25 \mu\text{m}$.

Se registró el área de poros esféricos con un tamaño de $10\text{--}100 \mu\text{m}$.

5.3 Análisis de datos

Análisis de imágenes: utilice un software de análisis de imágenes para calcular la relación área poro/defecto (precisión $\pm 0,01\%$).

Análisis manual: Cuente el área de poros/defectos a través de la rejilla del ocular del microscopio para ayudar en la evaluación.

Calificación: Las calificaciones se determinan de acuerdo con A00–A08, B00–B08, C00–C08, G00–G08.

5.4 Condiciones de prueba

Error de porosidad: $< 0,01\%$.

Error de defecto tipo C: $< 0,01\%$.

Ambiente: Temperatura $20 \pm 5^\circ\text{C}$, humedad $< 60\%$, sin vibraciones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Operador: Se requiere capacitación en análisis microscópico.

6. Requisitos de aceptación

6.1 Herramientas de corte

Requisitos: A02/B00/C00/G00 (porosidad <0,02%, sin poros tipo B, defectos y poros tipo C).

6.2 Picos de minería

Requisitos: A04/B04/C00/G04 (porosidad <0,1%, sin defectos tipo C, poros traza).

6.3 Molde

Requisitos: A04/B04/C00/G04 (porosidad <0,1%, sin defectos tipo C, poros traza).

6.4 Piezas resistentes al desgaste

Requisitos: A06/B06/C02/G06 (porosidad <0,2%, trazas libres de carbono y poros).

7. Resumen de los puntos clave de la norma

elementos	Contenido μm	Clasificación	Calificación	Método de prueba	Requisitos de aceptación
Porosidad	Tipo A (<10), Tipo B (10–25), Estomático (10–10)	Tipo A, Tipo B, poros	A00–A08 (0–0,2%), B00–B08 (0–0,2%), G00–G08 (0–0,2%)	Microscopio metalográfico (100–1000 aumentos), análisis de imágenes (precisión ±0,01%)	Herramienta: A02/B00/G00; Selección/Molde: A04/B04/G04
Fase de Tipo C carbono/η no ligada	Carbono libre o fase η, >25	Tipo C	C00–C08 (0–0,2%)	Observación metalográfica, distinguiendo entre carbono libre/negro y fase η/blanco grisáceo	Herramienta/pica/matriz: C00; piezas resistentes al desgaste: C02
Requisitos de prueba	Muestra pulida (Ra<0,1), área de observación >1 mm²	Tipo A/B/C, orificio de aire	Fracción de volumen	Resolución del microscopio <0,5 μm, ambiente 20 ± 5 °C	Error de porosidad/defecto tipo C <0,01 %

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ASTM B276-05 (2021) Método de prueba para la porosidad del carburo cementado

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica el método de ensayo para porosidad y microdefectos en carburo cementado y es aplicable a:

El carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC), que contiene una fase aglutinante de cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe), se puede agregar con carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC) o carburo de niobio (NbC).

Carburo cementado producido mediante procesos de pulvimetalurgia, que incluyen sinterización, prensado isostático en caliente (HIP) y productos de recubrimiento.

Aplicaciones como herramientas de corte, picos de minería, matrices, piezas de desgaste, etc.

No es adecuado para carburo cementado que no sea a base de WC o materiales que no sean de metalurgia de polvos.

2. Definiciones

Carburo cementado: Un material compuesto con WC como fase dura principal y Co/Ni/Fe como fase de unión.

Porosidad: Los agujeros o espacios de aire dentro de un material, expresados como fracción de volumen o número de poros por unidad de área.

Microdefectos: poros, carbono no combinado o fase η (W_3Co_3C , W_6Co_6C).

Análisis metalográfico: Observar la superficie pulida de la muestra a través de un microscopio y contar la distribución y contenido de poros y defectos.

Medición de la densidad: La porosidad se estimó indirectamente midiendo la densidad de la muestra utilizando el método de Arquímedes.

3. Clasificación de la porosidad y defectos microscópicos

3.1 Porosidad

Poros tipo A:

Diámetro $< 10\mu m$, redondo o casi redondo, distribuido uniformemente.

Fuente: Las partículas no están densamente empaquetadas y la sinterización en fase líquida es insuficiente.

Poros tipo B:

El diámetro es de 10 a 25 μm y la forma es irregular (por ejemplo, elíptica, poligonal).

Origen: Prensado desigual y evaporación de residuos de lubricante.

Poros:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

De 10 a 100 μm de diámetro, redondos o esféricos.

Fuente: Captura de gas durante la sinterización (oxígeno, nitrógeno o volátiles).

3.2 Defectos microscópicos

Defectos de tipo C (fase carbono/ η no ligada):

Carbono no unido: Partículas de carbono libre (C), tamaño $> 25 \mu\text{m}$, negras y de forma irregular, originadas a partir del exceso de carbono ($C/W > 1,02$).

Fase η : compuesto de carburo-cobalto ($\text{W}_3\text{Co}_3\text{C}$ o $\text{W}_6\text{Co}_6\text{C}$), tamaño $> 25 \mu\text{m}$, blanco grisáceo, originado por deficiencia de carbono ($C/W < 0,98$).

4. Método de calificación

La porosidad y los defectos microscópicos se clasifican por fracción de volumen o número de poros/unidad de área en tres categorías: A, B y C, y cada categoría va de 1 (menor contenido de defectos) a 5 (mayor contenido de defectos).

4.1 Poros tipo A

Fracción de volumen: 0–0,5%, diámetro $< 10 \mu\text{m}$.

Calificación:

A1: Fracción de volumen $< 0,01\%$ o < 5 poros/ mm^2 .

A2: Fracción de volumen 0,01–0,05% o 5–10 poros/ mm^2 .

A3: Fracción de volumen 0,05–0,1% o 10–20 poros/ mm^2 .

A4: Fracción de volumen 0,1–0,3% o 20–50 poros/ mm^2 .

A5: Fracción de volumen 0,3–0,5% o > 50 poros/ mm^2 .

Evaluación: Número de poros por milímetro cuadrado ($< 10 \mu\text{m}$) o porcentaje de área.

4.2 Poros tipo B

Fracción de volumen: 0–1%, diámetro 10–25 μm .

Calificación:

B1: Fracción de volumen $< 0,01\%$ o < 2 poros/ mm^2 .

B2: Fracción de volumen 0,01–0,1% o 2–5 poros/ mm^2 .

B3: Fracción de volumen 0,1–0,3% o 5–10 poros/ mm^2 .

B4: Fracción de volumen 0,3–0,6% o 10–20 poros/ mm^2 .

B5: Fracción de volumen 0,6–1,0% o > 20 poros/ mm^2 .

Evaluación: Número de poros por milímetro cuadrado (10–25 μm) o porcentaje de área.

4.3 Defectos de tipo C (carbono no ligado/fase η)

Fracción de volumen: 0–0,5%, tamaño $> 25 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Calificación:

C1: Fracción de volumen $<0,01\%$ o sin defectos visibles.

C2: Fracción de volumen $0,01-0,05\%$ o <1 defecto/ mm^2 .

C3: Fracción de volumen $0,05-0,1\%$ o $1-2$ defectos/ mm^2 .

C4: Fracción de volumen $0,1-0,3\%$ o $2-5$ defectos/ mm^2 .

C5: Fracción de volumen $0,3-0,5\%$ o >5 defectos/ mm^2 .

Evaluación: Relación del área del defecto por milímetro cuadrado, distinguiendo entre carbón libre (negro) y fase η (blanco grisáceo).

4.4 Requisitos de clasificación

Fracción de volumen: El área de poro/defecto se cuenta mediante un microscopio metalográfico con una precisión de $\pm 0,01\%$.

Área de observación: mínimo 1 mm^2 , recomendado 5 mm^2 .

Se registraron individualmente poros esféricos de 10 a $100 \mu\text{m}$ y se clasificaron como tipo A/B.

5. Métodos de prueba

5.1 Análisis metalográfico

5.1.1 Preparación de la muestra

Corte: Cortar las muestras (tamaño $10 \times 10 \text{ mm}$) evitando grietas.

Montaje: Fijación de la muestra con resina.

pulido:

Para el pulido por etapas se utilizó papel de lija de diamante (tamaño de grano $5-1 \mu\text{m}$).

Pulido hasta una rugosidad superficial $Ra < 0,05 \mu\text{m}$, sin rayones.

Evite dañar los poros puliendo demasiado.

Limpieza: Limpieza con etanol o ultrasónica para eliminar contaminantes.

5.1.2 Observación microscópica

Equipo: Microscopio óptico o microscopio electrónico de barrido (SEM), aumento $200-1500\times$, resolución $< 0,5 \mu\text{m}$.

Fuente de luz: iluminación de campo brillante, ajuste el contraste para distinguir:

Porosidad: Negra.

Carbono no ligado: negro.

Fase η : blanco grisáceo.

Matriz WC/Co: blanco/gris.

Área de observación: seleccione aleatoriamente al menos 5 campos de visión (área total $> 1 \text{ mm}^2$).

Registro:

Poros tipo A: cuente el número o área de poros $< 10 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Poros tipo B: Cuente el número o área de poros con un tamaño de 10 a 25 μm .

Defectos tipo C: Distinguir entre carbono libre y fase η , registrar área del defecto $>25 \mu\text{m}$.

5.1.3 Análisis de datos

Análisis manual: Cuente el número de poros/defectos a través de la rejilla del ocular del microscopio y calcule la fracción de volumen o el número/unidad de área.

Análisis de imágenes: utilice un software de análisis de imágenes para calcular la relación área poro/defecto (precisión $\pm 0,01\%$).

Calificación: Las calificaciones se determinan en función de A1 a A5, B1 a B5 y C1 a C5.

5.2 Medición de densidad

Principio: El método de Arquímedes mide la densidad de la muestra y la compara con la densidad teórica (12–15,6 g/cm^3 para WC- Co) para estimar la porosidad.

paso:

Mida el peso seco de la muestra (precisión $\pm 0,001 \text{ g}$) y el peso en agua.

Densidad = peso seco / (peso seco - peso en agua) $\times$ densidad del líquido.

Porosidad = (densidad teórica - densidad medida) / densidad teórica $\times 100\%$.

Requisitos: Precisión: $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, repita la medición 3 veces y tome el valor promedio.

5.3 Condiciones de prueba

Error de porosidad: $<0,02\%$.

Error de defecto tipo C: $<0,01\%$.

Ambiente: Temperatura $23\pm 2^\circ\text{C}$, humedad $<60\%$, sin vibraciones.

Operador: Se requiere capacitación en análisis metalográfico o medición de densidad.

6. Requisitos de aceptación

6.1 Herramientas de corte de aviación

Requisitos: A1/B1/C1 (porosidad $<0,01\%$, sin defectos significativos).

6.2 Picos de minería

Requisitos: A3/B3/C1 (porosidad $<0,2\%$, sin defectos tipo C).

6.3 Piezas resistentes al desgaste

Requisitos: A4/B4/C2 (porosidad $<0,6\%$, trazas libres de carbono).

6.4 Piezas militares

Requisitos: A1/B1/C1 (porosidad $<0,01\%$, sin defectos significativos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Resumen de los puntos clave de la norma

elementos	contenido	Clasificación	Calificación	Método de prueba	Requisitos de aceptación
Porosidad	Tipo A (<10 μm), Tipo B (10–25 μm), Estomático (10–100 μm)	Tipo A Tipo B	A1–A5 (0–0,5%), B1–B5 (0–1,0%)	Microscopio metalográfico (200–1500x), precisión de análisis de imagen ±0,01 %; medición de densidad ±0,01 g/cm³	Herramienta de aviación: A1/B1; selección: A3/B3
Defectos microscópicos	Tipo C (carbono no unido o fase η, >25 μm)	Tipo C	C1–C5 (0–0,5%)	Observación metalográfica, distinguiendo entre carbono libre (negro) y fase η (blanco grisáceo)	Aviación/Militar: C1; Piezas resistentes al desgaste: C2
Requisitos de prueba	Muestra pulida (Ra<0,05 μm), área de observación >1 mm²	Tipo A/B/C	Fracción de volumen o número de poros por unidad de área	Resolución del microscopio <0,5 μm, ambiente 23 ± 2 °C	Error de porosidad <0,02%, error de defecto tipo C <0,01%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

ISO 4505:1978

Evaluación microscópica de la porosidad y el carbono no unido en carburo cementado

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica el método de evaluación microscópica de la porosidad y el carbono no combinado en carburo cementado, y es aplicable a:

El carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC), que contiene una fase aglutinante de cobalto (Co), níquel (Ni) o hierro (Fe), se puede agregar con carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC) o carburo de niobio (NbC).

Carburo cementado producido mediante procesos de pulvimetalurgia, que incluyen sinterización, prensado isostático en caliente (HIP) y productos de recubrimiento.

Aplicaciones como herramientas de corte, picos de minería, matrices, piezas de desgaste, etc.

No es adecuado para carburo cementado que no sea a base de WC o materiales que no sean de metalurgia de polvos.

2. Definiciones

Carburo cementado: Un material compuesto con WC como fase dura principal y Co/Ni/Fe como fase de unión.

Porosidad: Los poros o espacios de aire dentro de un material, expresados como fracción de volumen.

Carbono no ligado: carbono libre (C) o fase η causada por deficiencia de carbono (W_3Co_3C , W_6Co_6C).

Evaluación metalográfica: Observe la superficie pulida de la muestra bajo un microscopio y cuente la distribución y el contenido de poros y carbono no unido.

3. Clasificación de la porosidad y del carbono no ligado

3.1 Porosidad

Poros tipo A:

Diámetro $<10\mu m$, redondo o casi redondo, distribuido uniformemente.

Fuente: Las partículas no están densamente empaquetadas y la sinterización en fase líquida es insuficiente.

Poros tipo B:

El diámetro es de 10 a $25\mu m$ y la forma es irregular (por ejemplo, elíptica, poligonal).

Origen: prensado desigual y evaporación de residuos de lubricante.

Poros:

Diámetro $10-100\mu m$, redondo o esférico, clasificado como tipo A/B.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Fuente: Captura de gas durante la sinterización (oxígeno, nitrógeno o volátiles).

3.2 Carbono no ligado y fase η

Defectos tipo C (carbono no ligado):

Partículas de carbono libre (C), tamaño $> 25 \mu\text{m}$, negras e irregulares.

Fuente: Exceso de carbono durante la sinterización ($C/W > 1,02$).

fase η :

Carburos - compuestos de cobalto (W_3Co_3C o W_6Co_6C), tamaño $> 25 \mu\text{m}$, de color blanquecino.

Fuente: Carbono insuficiente durante la sinterización ($C/W < 0,98$).

4. Método de calificación

La porosidad y el carbono no unido se clasifican por fracción de volumen o número de poros y se clasifican en tres categorías: A, B y C, y cada categoría va de 00 (sin defectos) a 08 (mayor contenido de defectos).

4.1 Poros tipo A

Fracción de volumen: 0–0,2%, diámetro $< 10 \mu\text{m}$.

Calificación:

A00: Sin poros visibles ($< 0,01\%$).

A02: 0,02%.

A04: 0,05%.

A06: 0,1%.

A08: 0,2%.

Evaluación: Número de poros por milímetro cuadrado ($\leq 10 \mu\text{m}$) o porcentaje de área.

4.2 Poros tipo B

Fracción de volumen: 0–0,2%, diámetro 10–25 μm .

Calificación:

B00: Sin poros visibles ($< 0,01\%$).

B02: 0,02%.

B04: 0,05%.

B06: 0,1%.

B08: 0,2%.

Evaluación: Número de poros por milímetro cuadrado (10–25 μm) o porcentaje de área.

4.3 Defectos de tipo C (carbono no ligado/fase η)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fracción de volumen: 0–0,2%, tamaño $>25\ \mu\text{m}$.

Calificación:

C00: Sin carbono no unido ni fase η ($<0,01\%$).

C02: 0,02%.

C04: 0,05%.

C06: 0,1%.

C08: 0,2%.

Evaluación: Relación del área del defecto por milímetro cuadrado, distinguiendo entre carbón libre (negro) y fase η (blanco grisáceo).

4.4 Requisitos de calificación

Fracción de volumen: El área de poro/defecto se cuenta mediante un microscopio metalográfico con una precisión de $\pm 0,01\%$.

Área de observación: mínimo $1\ \text{mm}^2$, recomendado $5\ \text{mm}^2$.

Poros: Contabilizados como tipo A/B, los poros esféricos de 10 a $100\ \mu\text{m}$ se registraron por separado.

5. Métodos de prueba

5.1 Preparación de la muestra

Corte: Cortar las muestras (tamaño $10\times 10\ \text{mm}$) evitando grietas.

Montaje: Fijación de la muestra con resina.

pulido:

Para el pulido por etapas se utilizó papel de lija de diamante (tamaño de grano $5\text{--}1\ \mu\text{m}$).

Pulido hasta una rugosidad superficial $R_a < 0,1\ \mu\text{m}$ sin rayaduras.

Evite dañar los poros puliendo demasiado.

Limpieza: Limpieza con etanol o ultrasónica para eliminar contaminantes.

5.2 Observación microscópica

Equipo: Microscopio óptico, aumento $100\text{--}1000\times$, resolución $<0,5\ \mu\text{m}$.

Fuente de luz: iluminación de campo brillante, ajuste el contraste para distinguir:

Porosidad: Negra.

Carbono no ligado: negro.

Fase η : blanco grisáceo.

Matriz WC/Co: blanco/gris.

Área de observación: seleccione aleatoriamente al menos 5 campos de visión (área total $> 1\ \text{mm}^2$).

Registro:

Poros tipo A: cuente el número o área de poros $<10\ \mu\text{m}$.

Poros tipo B: Cuente el número o área de poros con un tamaño de 10 a $25\ \mu\text{m}$.

Defectos tipo C: Distinguir entre carbono libre y fase η , registrar área del defecto $>25\ \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.3 Análisis de datos

Análisis manual: Cuente el número de poros/defectos a través de la rejilla del ocular del microscopio y calcule la fracción de volumen.
Análisis de imágenes: utilice un software de análisis de imágenes para calcular la relación área poro/defecto (precisión $\pm 0,01\%$).
Calificación: Las calificaciones se determinan en función de A00–A08, B00–B08 y C00–C08.

5.4 Condiciones de prueba

Error de porosidad: $<0,02\%$.
Error de defecto tipo C: $<0,01\%$.
Ambiente: Temperatura $20\pm 5^{\circ}\text{C}$, humedad $<60\%$, sin vibraciones.
Operador: Se requiere capacitación en análisis microscópico.

6. Requisitos de aceptación

6.1 Herramientas de corte

Requisitos: A02/B00/C00 (porosidad $<0,02\%$, sin poros tipo B ni defectos tipo C).

6.2 Picos de minería

Requisitos: A04/B04/C00 (porosidad $<0,1\%$, sin defectos tipo C).

6.3 Piezas resistentes al desgaste

Requisitos: A06/B06/C02 (porosidad $<0,2\%$, trazas de carbono libre).

6.4 Cuchillos médicos

Requisitos: A00/B00/C00 (porosidad $<0,01\%$, sin defectos).

7. Resumen de los puntos clave de la norma

elementos	Contenido (μm)	Clasificación	Calificación	Método de prueba	Requisitos de aceptación
Porosidad	Tipo A (<10), Tipo B (10–25), Estomático (10–100)	Tipo A Tipo B	A00–A08 (0–0,2%), B00–B08 (0–0,2%)	Microscopio metalográfico (100–1000 aumentos), análisis de imágenes (precisión $\pm 0,01\%$)	Herramienta: A02/B00; Selección: A04/B04; Médico: A00/B00
Fase de carbono/ η no ligada	Tipo C (carbono libre o fase η , >25)	Tipo C	C00–C08 (0–0,2%)	Observación metalográfica, distinguiendo entre carbono libre (negro) y fase η (blanco grisáceo)	Dientes de herramienta/corte: C00; piezas de desgaste: C02
Requisitos de prueba	Muestra pulida ($R_a<0,1$), área de observación $>1\text{ mm}^2$	Tipo A/B/C	Fracción de volumen o número de poros por unidad de área	Resolución del microscopio $<0,5\text{ }\mu\text{m}$, ambiente $20\pm 5^{\circ}\text{C}$	Error de porosidad $<0,02\%$, error de defecto tipo C $<0,01\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

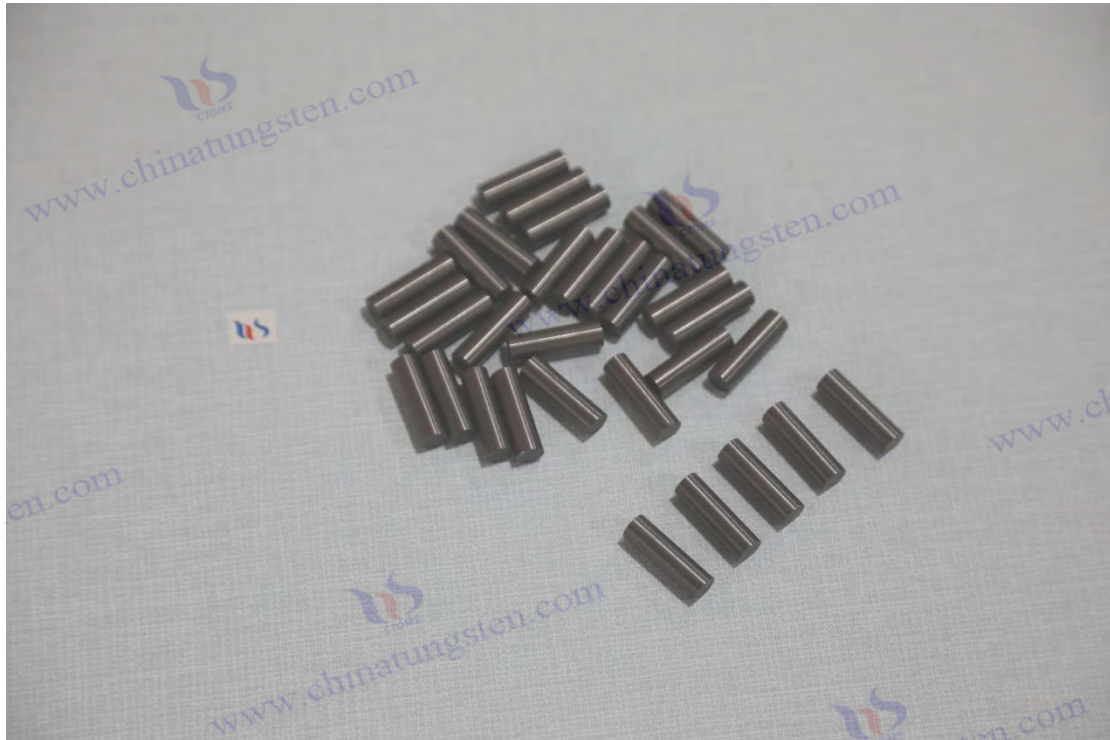
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

Efectos y comparación de carburos auxiliares de carburo cementado (TiC , TaC , NbC)

1. Descripción general del carburo cementado y carburos auxiliares

El carburo cementado es un material compuesto con carburo de tungsteno (WC) como fase dura principal y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase aglutinante. Se fabrica mediante un proceso de pulvimetalurgia. Presenta una alta dureza (HV1000-1800) y una excelente resistencia al desgaste. Se utiliza ampliamente en herramientas de corte, picos de minería y piezas resistentes al desgaste. Para optimizar el rendimiento, el carburo cementado se suele añadir con carburos auxiliares, como el carburo de titanio (TiC), el carburo de tántalo (TaC) y el carburo de niobio (NbC), y el contenido suele ser del 5-20% (fracción másica). Estos carburos auxiliares amplían el rango de aplicación del carburo cementado al mejorar la dureza, la resistencia al desgaste, la dureza roja y la resistencia a la oxidación.

El papel de los carburos auxiliares depende de sus propiedades físicas y químicas (como dureza, punto de fusión, estructura cristalina) y del efecto sinérgico con el WC y la fase aglutinante. TiC , TaC y NbC son carburos cúbicos con alta dureza (HV2000-3000) y mejor estabilidad térmica que el WC (sistema hexagonal, HV1500-2000). Mejoran el rendimiento del carburo cementado mediante un mecanismo de refuerzo por solución sólida o partículas. A continuación , se presenta un análisis detallado de la función de cada carburo auxiliar y una comparación de sus características mediante una tabla.

2. El papel de los carburos auxiliares

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.1 Carburo de titanio (TiC)

El papel de los carburos auxiliares

Mejorar la dureza

El TiC tiene una dureza mayor (HV2800–3200) que el WC. Añadir un 5–15 % puede aumentar la dureza del carburo cementado a HV1400–1600, lo que lo hace adecuado para el mecanizado de materiales de alta dureza (como acero endurecido, HV600–800).

Mayor resistencia al desgaste

de TiC (1–5 μm) son pequeñas y uniformes, lo que reduce el desgaste (10–20 mm^3 en la prueba ASTM G65) y prolonga la vida útil de la herramienta.

Propiedades antioxidantes mejoradas

El TiC forma una capa protectora de TiO_2 a altas temperaturas ($>800^\circ\text{C}$), que retrasa el desgaste por oxidación y es adecuada para el corte a alta velocidad.

Reducir la densidad: la densidad del TiC (4,9 g/cm^3) es mucho menor que la del WC (15,6 g/cm^3), lo que reduce el peso del carburo cementado (se reduce en un 10–15 %) y es adecuado para componentes aeroespaciales ligeros.

Limitaciones de los carburos auxiliares

Tenacidad reducida: cuando la adición de TiC es $>15\%$, la tenacidad a la fractura (K_{IC}) cae a 8–10 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, lo que lo hace propenso a fracturas frágiles.

Mayor costo: el precio del TiC es más alto que el del WC, lo que aumenta el costo de producción.

Aplicaciones: El TiC se utiliza comúnmente en herramientas de corte de alta velocidad (como Kennametal K313), recubrimientos resistentes al desgaste y componentes aeroespaciales.

2.2 Carburo de tantalio (TaC)

El papel del carburo de tantalio (TaC)

Mejora la dureza en rojo: El TaC tiene un punto de fusión más alto (3880°C) que el WC (2870°C). Añadir entre un 3 % y un 10 % puede mantener la dureza del carburo cementado a 1000°C (HV1200–1400), lo que lo hace adecuado para el procesamiento a alta temperatura (como acero inoxidable y aleaciones a base de níquel).

Mayor resistencia al choque térmico: TaC reduce el coeficiente de expansión térmica ($6,3 \times 10^{-6}/\text{K}$ frente a WC $5,2 \times 10^{-6}/\text{K}$), reduce las grietas térmicas y es adecuado para cortes intermitentes.

Antiadherencia mejorada: TaC tiene una energía superficial baja, lo que reduce la adhesión de los materiales de la pieza de trabajo durante el corte, reduce el coeficiente de fricción (0,2–0,3) y mejora la calidad de la superficie.

Limitaciones del carburo de tantalio (TaC)

Caro: el TaC es mucho más caro que el WC y el TiC, lo que limita su aplicación a gran escala.

Ganancia de dureza limitada: la dureza de TaC (HV1800–2000) es menor que la de TiC y el aumento de dureza es pequeño (aproximadamente entre el 5 y el 10 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación: TaC se utiliza principalmente en herramientas de corte de alta gama (como insertos recubiertos de PVD Sandvik), procesamiento de álabes de turbinas de aviación y forjado en caliente.

2.3 Carburo de niobio (NbC)

Función del carburo de niobio (NbC)

Refinamiento de grano: NbC (tamaño de partícula 0,5–2 μm) inhibe el crecimiento del grano WC (controlado a 1–3 μm), mejora la resistencia del carburo cementado (la resistencia a la tracción aumentó en un 10–15 %) y la tenacidad (K_{IC} aumentó a 12–15 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$).

Mayor resistencia a la corrosión: el NbC forma una capa protectora de Nb_2O_5 en un entorno ácido (pH 2-4), con una pérdida de peso por niebla salina de $<0,1 \text{ mg/cm}^2$, lo que lo hace adecuado para equipos químicos e ingeniería marina.

Resistencia mejorada al desgaste abrasivo: NbC forma una solución sólida con WC, aumentando la resistencia del límite de fase y reduciendo la pérdida por desgaste en 15-25 mm^3 (ASTM G65).

Limitaciones del carburo de niobio (NbC)

Dureza roja insuficiente: aunque el NbC tiene un punto de fusión alto (3600 $^{\circ}\text{C}$), su oxidación se acelera a $>900^{\circ}\text{C}$, lo que limita sus aplicaciones a alta temperatura.

Recursos escasos: Las reservas de mineral de niobio son limitadas (alrededor de 4,3 millones de toneladas en todo el mundo, 70% en Brasil) y los precios fluctúan.

Aplicación: NbC se utiliza comúnmente en picos de minería, piezas resistentes al desgaste y moldes resistentes a la corrosión (como el grado Zhuzhou Diamond YN8).

2.4 Sinergia

Añadir combinación

TiC, El TaC y el NbC se utilizan a menudo en combinación (por ejemplo, TiC 5% + TaC 3% + NbC 2%) para mejorar sinérgicamente la dureza, la resistencia al desgaste y la dureza en rojo. Por ejemplo, las plaquitas Sandvik GC2030 incorporan un compuesto de TiC-TaC-NbC, con una dureza de HV1500 y una prolongación de la vida útil del 30%.

Fortalecimiento de la solución sólida

TiC, TaC, NbC y WC forman una solución sólida (W, Ti, Ta, Nb)C y la distorsión reticular mejora la dureza y la resistencia a la deformación (el límite elástico aumenta en un 20%).

Estructura de gradiente

Al controlar la distribución de TiC / TaC / NbC, se forma un carburo cementado en gradiente con alta dureza superficial y alta tenacidad en el medio, y la resistencia al impacto se mejora en un 25%.

3. Comparación del rendimiento de los carburos auxiliares

La siguiente tabla compara el rendimiento y la aplicación del TiC, TaC y NbC en carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cementado, según datos de pruebas estándar como ASTM G65 e ISO 513:

Carburo auxiliar	Dureza HV	Punto de fusión (°C)	densidad (g/cm³)	Tenacidad (K _{1c} , MPa·m ^{1/2})	Resistencia a la abrasión (ASTM G65, mm³)	Dureza del rojo (°C)	Resistencia a la corrosión (pérdida de peso por niebla salina, mg/cm²)	Costo (USD/kg)	Aplicaciones típicas
Tic	2800–3200	3160	4.9	8–10	10–20	≤900	0,2–0,3	30–50	Herramientas de corte de alta velocidad, piezas de aviación
Tc	1800–2000	3880	14.3	10–12	15–25	≤1000	0,1–0,2	100–150	Herramientas de alta temperatura, forja en caliente
Nótese bien	2000–2400	3600	7.8	12–15	15–25	≤900	<0,1	50–80	Picas de minería, moldes resistentes a la corrosión

ilustrar:

Parámetros de rendimiento: dureza (dureza Vickers HV), tenacidad (tenacidad a la fractura K_{1c}), resistencia al desgaste (pérdida por desgaste ASTM G65), dureza en rojo (temperatura de mantenimiento de dureza a alta temperatura), resistencia a la corrosión (pérdida de peso en prueba de niebla salina).

Aplicaciones típicas: Según las características del TiC, TaC y NbC, enumeran los principales escenarios industriales.

Fuente de datos: Referencia Sandvik, Kennametal, Zhuzhou Diamond Technology White Paper, ASTM G65, normas de prueba ISO 513.

4. Ventajas, desventajas y principios de selección de carburos auxiliares

4.1 Resumen de ventajas y desventajas

Tic

Ventajas: Máxima dureza, menor densidad, adecuado para corte liviano y de alta velocidad, buena resistencia a la oxidación.

Desventajas: menor tenacidad, mayor costo que el WC y propenso a fracturas frágiles debido a la alta adición.

Tc

Ventajas: Excelente dureza en rojo, fuerte resistencia al choque térmico y adhesión, adecuado para alta temperatura y corte intermitente.

Desventajas: costoso, ganancia de dureza limitada y la aplicación está limitada por el costo.

Nótese bien

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Ventajas: granos refinados, óptima resistencia a la corrosión, buena tenacidad y resistencia al desgaste abrasivo.

Desventajas: dureza roja insuficiente, escasos recursos de niobio y grandes fluctuaciones de precios.

4.2 Principios de selección

Corte de alta velocidad (como aleación de aluminio de aviación, acero endurecido)

El TiC es la mejor opción para mejorar la dureza y la resistencia a la oxidación. Los grados típicos incluyen K313 (TiC 10%).

Procesamiento a alta temperatura (como aleaciones a base de níquel, forjado en caliente)

Elija TaC para optimizar la dureza en rojo y la resistencia al choque térmico. Los grados típicos incluyen GC2030 (TaC 5%).

Entorno minero o resistente a la corrosión (como moldes químicos)

el NbC para mejorar la tenacidad y la resistencia a la corrosión. Los grados típicos incluyen YN8 (NbC 3%).

Rendimiento integral

La combinación de TiC-TaC-NbC equilibra la dureza, la tenacidad y la dureza al rojo, y se encuentra comúnmente en herramientas de alta gama y piezas resistentes al desgaste.

Escenarios sensibles a los costos

Controle la cantidad agregada de TaC y NbC (<5%), concéntrese en TiC y reduzca el costo en un 10-20%.

5. Mercado y tendencias futuras

Estado del mercado

En 2025, el mercado del carburo cementado alcanzará un valor aproximado de 18 000 millones de dólares, y los carburos auxiliares representarán entre el 20 % y el 30 % del coste de la materia prima. El TiC es el más utilizado (representa el 60 %), mientras que el TaC y el NbC representan el 15 % y el 10 %, respectivamente, debido a las limitaciones de coste y recursos .

Tendencias futuras

Nanocarburo

El TiC / NbC a escala nanométrica (<0,5 μm) aumenta la dureza a HV1600–1800 y la tenacidad en un 20%, y se espera que represente el 15% del mercado en 2027.

Fabricación ecológica

Reciclar TiC / TaC / NbC (tasa de reciclaje > 80%), reducir costes en un 15% y reducir la huella de carbono en un 25%.

Diseño inteligente

La IA optimiza las relaciones de carburo (error <2%) y mejora el rendimiento de la herramienta en un 30%. Por ejemplo, Sandvik lanzará el diseño de herramientas asistido por IA en 2024.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicaciones emergentes

El uso de TiC / TaC / NbC en nuevas energías (como el procesamiento de palas de turbinas eólicas), en la medicina (brocas dentales) y en perforaciones en aguas profundas (componentes resistentes a la corrosión) está creciendo a un ritmo del 10 % anual.

6. Conclusión

TiC , El TaC y el NbC en el carburo cementado han ampliado significativamente el rango de aplicación de los materiales al mejorar la dureza, la resistencia al desgaste, la dureza al rojo, la resistencia a la oxidación y la resistencia a la corrosión. El TiC es adecuado para el corte a alta velocidad debido a su alta dureza y baja densidad; el TaC es adecuado para el procesamiento a alta temperatura debido a su excelente dureza al rojo y resistencia al choque térmico; y el NbC es superior en las industrias minera y química debido a sus granos refinados y su resistencia a la corrosión. La adición combinada y el reforzamiento por solución sólida optimizan aún más el rendimiento, pero se requiere un equilibrio entre costo y rendimiento. En el futuro, los nanocarburos , la fabricación ecológica y el diseño inteligente promoverán la aplicación de carburos auxiliares en industrias de alta precisión y sostenibles. Al seleccionar carburos auxiliares, el TiC ... TaC y NbC deben combinarse razonablemente según las condiciones de procesamiento, los requisitos ambientales y las limitaciones de costos para lograr un rendimiento óptimo .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

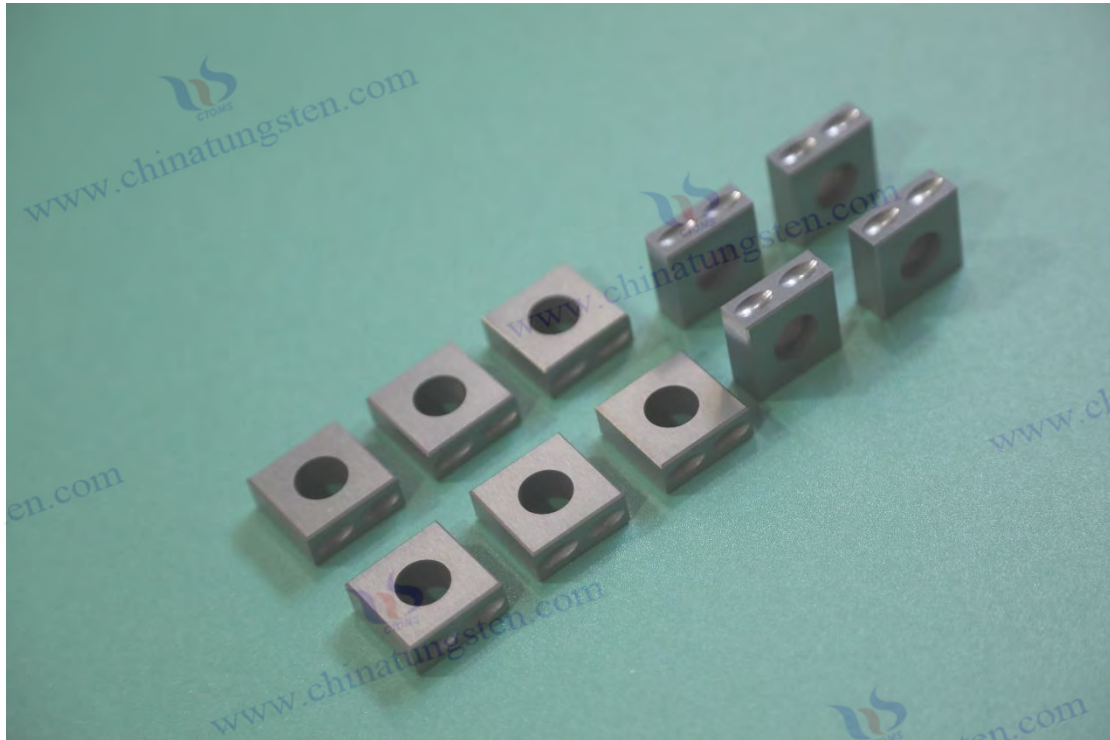
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

Tipos y funciones de la fase aglutinante de carburo cementado

1. Descripción general

Gracias a su alta dureza (1400-2200 HV), resistencia al desgaste y resistencia a la flexión (1,5-2,5 GPa), el carburo cementado se ha convertido en la piedra angular de herramientas de corte, moldes y herramientas de minería. Su rendimiento se debe a la sinergia entre la fase dura (como el WC) y la fase aglutinante. La fase aglutinante actúa como "aglutinante" y "afinador", conectando las partículas de la fase dura, lo que proporciona tenacidad, resistencia a la corrosión y propiedades de procesamiento. Desde la invención del carburo cementado en Alemania en 1923, la fase aglutinante se ha expandido desde el cobalto simple hasta el níquel, el hierro, las aleaciones de cobalto-níquel, etc. En los últimos años, las nanofases aglutinantes, las aleaciones multielemento (como Co+Mo+Ni) y la optimización de recubrimientos han mejorado significativamente el rendimiento. Este artículo analiza los tipos, funciones, microestructuras, comparaciones de grados, interacciones de recubrimientos, medidas de optimización y aplicaciones de las fases aglutinantes, en combinación con normas (como GB/T 3849 e ISO 4499).

2. Tipo de fase de enlace

2.1 Cobalto (Co)

Características: más del 90%, contenido 620%, estructura FCC, ángulo de humectación <10°, punto de fusión 1495°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Propiedades: Dureza 1300-1500 HV, KIC 812 MPa·m^{1/2}, resistencia a la flexión 22,5 GPa.

Aplicaciones: Herramientas de corte (YG6), moldes (YG15), minería (YG8).

Ventajas y desventajas: alta tenacidad, porosidad <0,01%, pero tasa de corrosión 0,01 mm/año, alto costo (\$3040/kg).

2.2 Níquel (Ni)

Características: resistencia a la corrosión, contenido 515%, ángulo de humectación ~15°, punto de fusión 1455°C.

Rendimiento: Tasa de corrosión <0,005 mm/año, dureza ~1350 HV, KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Aplicaciones: herramientas de corte húmedo, moldes químicos, herramientas marinas.

Ventajas y desventajas: fuerte resistencia a la corrosión, bajo costo (US\$ 1520/kg), resistencia de unión ligeramente débil.

2.3 Hierro (Fe)

Características: bajo costo, contenido 510%, ángulo de humectación ~20°, punto de fusión 1538°C, fácil de formar la fase η .

Rendimiento: Dureza ~1300 HV, resistencia a la flexión 1,82,2 GPa, tasa de corrosión 0,02 mm/año.

Aplicación: Herramientas de minería de bajo costo.

Pros y contras: 20% menos de coste, 10% menos de rendimiento.

2.4 Aleación de cobalto y níquel (Co + Ni)

Características: Combinando la tenacidad del cobalto y la resistencia a la corrosión del níquel, el contenido es del 615% y la proporción es ajustable.

Rendimiento: Dureza 1350-1450 HV, Tasa de corrosión 0,007 mm/año, KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Aplicación: herramientas de aviación, moldes químicos.

Ventajas y desventajas: Excelente rendimiento general, pero es necesario optimizar la relación.

2.5 Otros (Mo, Cu)

Características: Mo es resistente al calor (2623 °C), Cu es resistente a la corrosión (1085 °C) y el contenido es <5%.

Rendimiento: dureza 1200-1300 HV, resistencia a la flexión 1,52 GPa.

Aplicación: herramientas de alta temperatura (Mo), piezas de baja carga (Cu).

Progreso: la resistencia al calor de Co+Mo+Ni aumentó en un 20%, la tenacidad del nanocobalto aumentó en un 10%.

3. Efecto de la fase adhesiva

3.1 Fase dura de unión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mecanismo: Sinterización en fase líquida, humectación WC, energía de enlace $\sim 2 \text{ J/m}^2$.

Efecto: resistencia a la compresión 46 GPa, porosidad $< 0,01\%$, ahorro de energía 10%.

3.2 Mejorar la dureza y la resistencia

Mecanismo: Deformación plástica, evitando la propagación de grietas.

Efecto: el cobalto aumentó del 6% al 15%, el KIC aumentó en un 50% y la resistencia a la flexión aumentó en un 25%.

3.3 Ajuste de la dureza

Mecanismo: La dureza de la fase de unión es baja y un alto contenido reduce la dureza general.

Efecto: 6% Co (1500 HV), 15% Co (1300 HV).

3.4 Mejorar la resistencia a la corrosión

Mecanismo: El níquel forma una capa de pasivación.

Efecto: Tasa de corrosión a base de níquel $< 0,005 \text{ mm/año}$, 50% mejor que el cobalto.

3.5 Mejorar el rendimiento del procesamiento

Mecanismo: La fase líquida promueve la densificación.

Efecto: Densidad a base de cobalto $> 99,9\%$, tasa de contracción 1520%.

3.6 Interacción con fases duras

Mecanismo: Energía de enlace del cobalto WC $\sim 2 \text{ J/m}^2$, Cr_3C_2 inhibe el crecimiento del grano.

Efecto: La tenacidad del nanocobalto aumenta en un 10%.

4. Microestructura de la fase de enlace

4.1 Estructura cristalina

Cobalto: FCC (alta ductilidad) + HCP parcial (alta dureza), el enfriamiento rápido retiene la FCC y la tenacidad aumenta en un 10%.

Níquel: estabiliza el FCC, excelente resistencia a la corrosión.

Hierro: BCC, poca ductilidad, fácil formación de fase η .

SEM/TEM: La fase de cobalto es reticular ($0,52 \mu\text{m}$) y la fase de níquel es relativamente delgada ($0,31,5 \mu\text{m}$).

4.2 Características de la interfaz

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cobalto WC: Energía de enlace $\sim 2 \text{ J/m}^2$, resistencia a la flexión aumentada en un 15%.

Níquel WC: Energía de enlace $\sim 1,5 \text{ J/m}^2$, resistencia reducida en un 510%.

Hierro WC: Fácil formación de fase η , resistencia reducida en un 1015%.

Optimización: Cr3C2 aumenta la fuerza de unión en un 10%.

4.3 Características de distribución

Distribución uniforme: resistencia al agrietamiento aumentada en un 20%.

Piscina de cobalto: fuerza reducida en 1015%.

SEM: Uniformidad YG6 >95%, reserva de cobalto YG15 510%.

Optimización: molienda de bolas + Cr3C2, uniformidad aumentada en un 15%.

4.4 Defectos microscópicos

Porosidad: Porosidad > 0,1% reducción de resistencia en un 20%.

Fase η : dureza reducida en un 510%.

Carbono libre: resistencia reducida en un 10%.

TEM: fase η en forma de aguja ($15 \mu\text{m}$), con forma de grupo de carbono libre ($0,52 \mu\text{m}$).

Optimización: La fuerza de la cadera aumentó en un 15%.

5. Comparación de marcas

Marca	Fase adhesiva	contenido	Dureza (HV)	Resistencia a la flexión (GPa)	Dureza (KIC)	Tasa de corrosión (mm/año)	solicitud
YG6	cobalto	6%	1500	2.0	8	0.01	Herramientas de corte
YG8	cobalto	8%	1450	2.2	9	0.01	Herramientas de minería
YG15	cobalto	15%	1300	2.5	12	0.01	Troquel de estampación
YN10	níquel	10%	1350	2.0	10	<0,005	Corte húmedo
YNC8	Co+Ni	8%	1400	2.3	11	0.007	herramientas de aviación
YF10	Hierro + Cobalto	10%	1300	1.9	8	0.02	Herramientas de bajo costo

6. Interacción entre la fase aglutinante y el recubrimiento

6.1 Tipo de recubrimiento

TiN : Dureza 2000-2500 HV, resistente al desgaste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrN : Dureza 18002200 HV, resistente a la corrosión.

Al₂O₃: Dureza 2000 HV, resistencia al calor >1000°C.

Recubrimiento multicapa: TiN+Al₂O₃+TiCN, excelente rendimiento integral.

6.2 Mecanismo de interacción

Unión de interfaz: la adhesión a base de cobalto + TiN aumenta en un 20% y la vida a base de níquel + CrN aumenta en un 50%.

Adaptación de la expansión térmica: Cobalto + TiN aumenta la estabilidad en un 15%.

Estabilidad química: Base níquel + CrN, tasa de corrosión <0,003 mm/año.

6.3 Efecto

Resistencia al desgaste: YG6+TiN aumenta la vida útil 3 veces.

Resistencia a la corrosión: YN10+CrN duplica la vida útil.

Resistencia al calor: Temperatura de corte YNC8+Al₂O₃>1000°C.

7. Medidas de optimización

Elección de la fase aglutinante: cobalto (tenacidad), níquel (resistencia a la corrosión), Co+Ni (combinado).

Contenido controlado: 6% de cobalto (cuchillos), 15% de cobalto (moldes).

Distribución mejorada: tenacidad Cr₃C₂ +5%.

Sinterización optimizada: Resistencia HIP +15%.

Recubrimiento: CrN resistencia a la corrosión +2 veces.

8. Casos de aplicación

Herramienta YG6: dureza 1500 HV, vida útil 2 horas (+ TiN 6 horas).

Molde YG15: resistencia a la flexión 2,5 GPa, vida útil 120.000 veces.

Molde YN10: tasa de corrosión <0,005 mm/año, vida útil 1 año (+ CrN 2 años).

Herramienta YNC8: dureza 1400 HV, vida útil 3 horas (+Al₂O₃ 4 horas).

9. Normas

GB/T 3849: Prueba magnética de cobalto.

ISO 4499: Microestructura.

ASTM B406: Resistencia a la flexión.

ASTM G31: Resistencia a la corrosión.

ASTM C633: Adhesión de recubrimientos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

Tipos y selección de aplicaciones de aglutinantes en el proceso de mezcla de carburo cementado

1. Descripción general

En el proceso de mezcla de carburo cementado, la fase dura (WC), la fase aglutinante (Co) y los aditivos se mezclan mediante molienda húmeda o mezcla seca, y se añade un aglutinante para preparar una suspensión uniforme para el secado por pulverización, la granulación y el prensado. El aglutinante mejora la unión de las partículas (resistencia en verde > 5 MPa), mejora la fluidez (< 30 s/50 g), controla la morfología de las partículas (D50 50200 μm) y se descompone antes de la sinterización (carbono residual < 0,1%). Los aglutinantes comunes incluyen polietilenglicol (PEG), alcohol polivinílico (PVA), parafina (PW) y caucho (SBR/BR). La selección debe considerar las características de la suspensión, el proceso y la aplicación.

2. Tipos y características de los adhesivos

2.1 Polietilenglicol (PEG)

Propiedades químicas: $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$, peso molecular 200-20.000, soluble en agua/etanol, temperatura de descomposición 250-400 °C, carbono residual <0,05 %.

Propiedades físicas: viscosidad 100500 mPa·s, resistencia en verde 510 MPa, fluidez <25 s/50 g.

Ventajas: buena solubilidad, descomposición limpia, bajo costo (1015 yuanes/kg).

Desventajas: Higroscópico, la estabilidad de la suspensión se reduce en un 10%.

Proceso: Añadir 12%, remover durante 12 horas, descomponer a 300-400°C.

2.2 Alcohol polivinílico (PVA)

Propiedades químicas: $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$, peso molecular 20.000-200.000, soluble en agua, temperatura de descomposición 200-350°C, carbono residual <0,1%.

Propiedades físicas: viscosidad 2001000 mPa·s, resistencia en verde 812 MPa, fluidez <28 s/50 g.

Ventajas: Alta fuerza de unión, adecuado para formas complejas.

Desventajas: La solubilidad del etanol es baja y el costo de secado aumenta entre un 10 y un 15%.

Proceso: Añadir 0,5-1,5%, remover durante 23 horas, descomponer a 250-350°C.

2.3 Cera de parafina (PW)

Propiedades químicas: hidrocarburos, peso molecular 3001000, punto de fusión 5070°C, temperatura de descomposición 200500°C, carbono residual 0,10,2%.

Propiedades físicas: viscosidad 1050 mPa·s, resistencia en verde 48 MPa, fluidez <30 s/50 g.

Ventajas: bajo costo (510 yuanes/kg), buena lubricidad.

Desventajas: mucho residuo de carbono, requiriendo disolvente orgánico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Proceso: Cantidad agregada 23%, calentamiento 6080°C, descomposición 400500°C.

2.4 Caucho (SBR/BR)

Propiedades químicas: peso molecular 50.000-500.000, temperatura de descomposición 300-600°C, carbono residual 0,2-0,3%.

Propiedades físicas: viscosidad 500-2000 mPa·s, resistencia en verde 610 MPa, fluidez <30 s/50 g.

Ventajas: Alta elasticidad, resistencia al agrietamiento incrementada en un 15%.

Desventajas: mucho carbono residual y alto costo (2030 yuanes/kg).

Proceso: Cantidad agregada 12%, calentamiento 5070°C, descomposición 400600°C.

2.5 Otros

PMMA: temperatura de descomposición 300-450°C, carbono residual <0,1%, adecuado para herramientas de alta precisión.

CMC: temperatura de descomposición 250-350°C, carbono residual <0,05%, adecuado para investigación y desarrollo.

Progreso: Nano aglutinante base agua, residuo de carbono <0,03%, fluidez aumentada en un 15%.

3. Selección de aplicaciones

3.1 Base de selección

Lodo: contenido sólido 60-80%, etanol es PEG/PW, agua es PVA/CMC.

Proceso: PVA para prensado húmedo, PW para prensado en seco.

Aplicación: Elija PEG/PVA para herramientas de corte, SBR para moldes y PW por un bajo costo.

Costo: PW (510 yuanes/kg), PEG (1015 yuanes/kg).

3.2 Escenarios aplicables

PEG: herramienta YG6/YG8, D50 80150 μm, fluidez <25 s/50 g.

PVA: Herramienta de grano ultrafino, resistencia en verde 812 MPa.

PW: Herramientas de minería YG8, costo reducido en un 20%.

SBR: Molde YG15, resistencia a las grietas aumentada en un 15%.

PMMA/CMC: I+D de herramientas de aviación, D50 5080 μm.

3.3 Proceso de selección

Determinar la aplicación y las características de la suspensión.

Adhesivo a juego.

Verificar fluidez, resistencia en verde, residuos de carbón.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Optimizar el proceso.

4. Factores influyentes

Contenido: 12% (PEG/PVA), 23% (PW/SBR).

Lodo: contenido de sólidos 70%, viscosidad 200 mPa·s.

Mezcla: Remover a 500-1000 rpm durante 12 horas.

Sinterización: vacío, 350-400°C, residuo de carbono <0,1%.

Ambiente: humedad <40%, temperatura 2030°C.

5. Medidas de optimización

Seleccionar aglutinante: PEG/PVA (cuchillo), SBR (molde).

Contenido controlado: Resistencia verde 512 MPa.

Lodo optimizado: contenido sólido 7075%.

Mezcla mejorada: Molino de bolas planetario, 15% más de uniformidad.

Sinterización optimizada: HIP, porosidad <0,01%.

6. Casos de aplicación

Herramienta YG6: 1,5% PEG, fluidez 23 s/50 g, dureza 1500 HV.

Herramienta de grano ultrafino: 1% PVA, resistencia en verde 10 MPa, dureza 2000 HV.

Herramientas de minería YG8: 2,5 % PW, resistencia a la flexión 2,2 GPa.

Molde YG15: 1,5 % SBR, vida útil de 120 000 veces.

7. Conclusión

Los aglutinantes utilizados en la mezcla de carburo cementado incluyen polietilenglicol (PEG), alcohol polivinílico (PVA), cera de parafina (PW), caucho (SBR/BR) y otros (como PMMA, CMC). El PEG tiene buena fluidez (<25 s/50 g) y es adecuado para herramientas de uso general; el PVA tiene alta resistencia en verde (812 MPa) y es adecuado para herramientas de grano ultrafino; el PW tiene bajo costo y es adecuado para herramientas de minería; el SBR tiene una fuerte resistencia al agrietamiento y es adecuado para moldes grandes. La selección debe considerar las características de la suspensión (contenido de sólidos 6080%), los requisitos del proceso, los escenarios de aplicación y los costos. Las medidas de optimización pueden aumentar la fluidez en un 20%, la resistencia en verde en un 20%, la dureza en un 5% y reducir los costos en un 20%. En el futuro, los nanoaglutinantes a base de agua y los aglutinantes duales mejorarán el rendimiento y la protección ambiental.

Tabla comparativa de características y rendimiento del aglutinante de carburo cementado

Aglutinante	Propiedades químicas	descomponer	Residuos	verde	fluir	costo	ventaja	defecto	Aplicaciones
-------------	----------------------	-------------	----------	-------	-------	-------	---------	---------	--------------

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		temperatura ℃	de carbono %	fortaleza MPa	Sexo s/50 g	Yuan/kg			principales
CLAVIJA	HO(CH ₂ CH ₂ O) nH , peso molecular 20020.000, soluble en agua/etanol	250400	<0,05	510	<25	1015	Buena fluidez, descomposición limpia, bajo costo.	Absorción de humedad, residuo de carbono de alto peso molecular.	Herramientas generales (YG6, YG8), moldes (YG15)
PVA	(C ₂ H ₄ O)n , peso molecular 20.000-200.000, soluble en agua	200350	<0,1	812	<28	1520	Alta resistencia de unión, adecuado para formas complejas.	Baja solubilidad en etanol y elevado coste de secado.	Herramientas de corte de grano ultrafino, moldes de complejos
Contraseña	Hidrocarburos, peso molecular 300-1000, solubles en disolventes orgánicos.	200500	0.10.2	48	<30	510	Bajo costo, buena lubricidad.	Mucho carbono residual, se necesita disolvente orgánico.	Herramientas de minería (YG8), moldes de bajo costo
SBR/BR	Peso molecular 50.000-500.000, soluble en disolventes orgánicos.	300600	0.20.3	610	<30	2030	Alta elasticidad y fuerte resistencia al agrietamiento.	Gran cantidad de residuos de carbono, alto costo.	Moldes grandes (YG15), herramientas de minería
PMMA	Peso molecular 50.000-100.000, soluble en disolventes orgánicos.	300450	<0,1	812	<28	~50	Alta precisión, bajo residuo de carbono	Alto costo, poca solubilidad	Desarrollo de herramientas de alta precisión
CMC	Derivados de celulosa, solubles en agua	250350	<0,05	46	<25	2025	Buena solubilidad en agua, bajo residuo de carbono.	Intensidad verde baja	Investigación y desarrollo de laboratorio, herramientas de aviación

Temperatura de descomposición: afecta el proceso de sinterización, <400 °C es más adecuado para la sinterización al vacío.

Residuos de carbono: <0,1% Garantizar una porosidad de sinterización <0,1%.

Resistencia en verde: >5 MPa cumple con los requisitos de prensado, 812 MPa es adecuado para formas complejas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Fluidez: <30 s/50 g, de acuerdo con los requisitos de secado por aspersión (GB/T 1482).

Costo: PW es el más económico, PMMA es el más alto.

Selección de aplicaciones: PEG/PVA para alto rendimiento, PW para bajo costo, SBR para palanquillas grandes.

8. Normas

GB/T 3849: Ensayo magnético de cobalto. ISO 4499: Microestructura.

GB/T 1482: Fluidez. ISO 3326:2013: Porosidad.

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



apéndice:

Concepto, causa y mejora de la descarburación y carburación del carburo cementado

1. Descripción general

El carburo cementado es un material compuesto con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de unión. Su rendimiento depende en gran medida del control preciso del contenido de carbono. El contenido teórico de carbono de WC es 6,13 % en peso y debe controlarse en el rango de 6,08-6,18 % en peso en la producción real (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024). Las desviaciones en el contenido de carbono pueden conducir a descarburación o defectos de carburación, que afectan significativamente la microestructura y las propiedades del material. La descarburación se refiere al contenido insuficiente de carbono, que hace que el WC se descomponga o forme una fase η frágil ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ o $\text{Co}_6\text{W}_6\text{C}$), reduciendo así la dureza y la resistencia; la carburación se refiere al contenido excesivo de carbono, que precipita el carbono libre (fase de grafito), lo que afecta la resistencia al desgaste y la adhesión del recubrimiento. Este artículo combina normas nacionales chinas (GB/T 3849), normas internacionales (ISO 4499) y datos de la industria para analizar en detalle los conceptos, causas, efectos y medidas de mejora de la descarburación y la carburación.

2. El concepto de descarburación y carburación.

2.1 Descarbonización

Definición de descarbonización

El contenido de carbono en el carburo cementado es menor que la relación estequiométrica de 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

(6,13 % en peso) . %) , lo que resulta en la descomposición de WC en W_2C o la formación de la fase η (Co_3W_3C , Co_6W_6C) .

Microestructura

La fase η tiene forma de aguja o granular, con un tamaño de 5-25 μm , una dureza de aproximadamente HV 1800-2000 y una tenacidad a la fractura (KIC) de 4-6 $MPa \cdot m^{1/2}$, muy inferior a los 8-15 $MPa \cdot m^{1/2}$ del carburo cementado en general (Journal of Materials Science 2025). La fragilidad de la fase η provocará la propagación de grietas y reducirá la fiabilidad del material.

Impacto de la descarbonización

La dureza disminuye entre un 5% y un 10% (por ejemplo, de HV 1800 a HV 1620-1710, ITIA 2024). La resistencia a la flexión (TRS) disminuye entre un 10% y un 15% (de 2200 MPa a 1870-1980 MPa, prueba ASTM B406).

La resistencia a la corrosión disminuye y la tasa de corrosión aumenta entre un 15 % y un 20 % (la tasa de corrosión en un entorno de niebla salina aumenta de 0,05 mm/año a 0,06-0,07 mm/año, ASTM G31).

Ejemplo: En condiciones de corte a alta velocidad (200 m/min), la descarburación reduce la resistencia al desgaste de las herramientas de carburo cementado y acorta la vida útil de corte entre un 20 % y un 30 % (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

2.2 Carburación

definición

El contenido de carbono en el carburo cementado es mayor que la relación estequiométrica y se precipita carbono libre (fase de grafito)

El carbono libre se presenta en forma de cúmulos o escamas, con un tamaño de 0,5-3 μm y una dureza extremadamente baja (<HV 100). Se distribuye principalmente en la fase de cobalto o en los límites de grano, lo que aumenta la porosidad (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

La dureza disminuye entre un 3% y un 5% (de HV 1800 a HV 1710-1740, ITIA 2024).

La resistencia a la flexión disminuyó entre un 8% y un 10% (de 2200 MPa a 1980-2020 MPa).

El carbono libre aumenta el ángulo de humectación (de 5° a 15°-25°), lo que resulta en una disminución del 15% al 20% en la adhesión del recubrimiento (prueba ASTM C633).

Ejemplo: En aplicaciones de troqueles de estampación, la carburación aumenta la rugosidad superficial de los troqueles de carburo cementado (R_a de 0,2 μm a 0,3-0,4 μm) , aumenta la tasa de desprendimiento del recubrimiento en aproximadamente un 15% y reduce la vida útil del troquel en un 10%-15% (Journal of Materials Science 2025).

3. Causas de descarburación y carburación

3.1 Descarbonización

Factores de la materia prima:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido de carbono insuficiente ($<6,10\%$ en peso), por ejemplo, el contenido de carbono en el polvo de WC es inferior al valor teórico ($6,13\%$)

Las materias primas contienen altos niveles de óxidos (como WO_3 o CoO_3) ($0,03\%-0,1\%$), que reaccionan con el carbono para producir CO/CO_2 durante la sinterización, consumiendo carbono (Journal of Materials Science, 2025).

La calidad del negro de carbón es inestable y contiene impurezas (como azufre y oxígeno) que resultan en una pérdida de carbono de aproximadamente $0,05\%-0,1\%$ (ITIA 2024).

Factores atmosféricos:

El contenido de oxígeno en la atmósfera de sinterización es $>0,1\%$, lo que conduce a la oxidación del carbono para generar CO/CO_2 y la tasa de descarburación aumenta en aproximadamente un $10\%-15\%$.

El contenido de hidrógeno (H_2) es demasiado alto ($>5\%$), reaccionará con el carbono para formar CH_4 , eliminando el elemento carbono (ITIA 2024).

H_2O en la atmósfera es $>0,05\%$, que reacciona con el carbono para producir CO y H_2 , lo que agrava aún más la descarburación (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Factores de temperatura:

Temperatura de sinterización $>1450^\circ C$, WC se descompone en W_2C o fase η (reacción: $2WC + Co \rightarrow Co_3W_3C + C$).

Las fluctuaciones de temperatura ($\pm 10^\circ C$) provocan una descarburación local y un aumento de la tasa de formación de la fase η del 10% al 15% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Si el tiempo de aislamiento es demasiado largo (>2 horas), la volatilización del carbono aumenta y el riesgo de descarbonización aumenta en aproximadamente un 8% (Journal of Materials Science 2025).

Factores de mezcla:

La mezcla es desigual y la desviación de la distribución local de carbono es $>0,1\%$ en peso, lo que da como resultado una descarbonización regional.

La tasa de carbono residual de los aglutinantes orgánicos (como la parafina PW o SBR) es $>0,1\%$ y no se descomponen completamente en la etapa inicial de sinterización, lo que afecta el equilibrio de carbono (ITIA 2024).

Los equipos de mezcla (como los molinos de bolas) están contaminados (por ejemplo, con limaduras de hierro), lo que introduce óxidos y consume alrededor del $0,02\%$ al $0,05\%$ de carbono (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

3.2 Carburación

Factores de la materia prima:

El contenido de carbono es demasiado alto ($>6,15\%$ en peso), como por ejemplo una adición excesiva de negro de carbono ($>0,5\%$ en peso).

Las partículas de negro de carbón no tienen un tamaño uniforme ($>10\mu m$), lo que genera un exceso de carbono local (ITIA 2024).

Las partículas de carburo (como WC) en la materia prima son demasiado finas ($<0,1\mu m$), con alta actividad superficial y adsorción de exceso de carbono (Journal of Materials Science 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Factores atmosféricos:

El contenido de CH₄ en la atmósfera de sinterización (>1%) conduce a la deposición de carbono y aumenta la tasa de carburación en aproximadamente un 10%-15%.

Un vacío insuficiente (>10⁻² Pa) inhibe la volatilización del carbono y provoca que el carbono libre restante precipite (ITIA 2024).

Cuando el potencial de carbono en la atmósfera es demasiado alto (por ejemplo, potencial de carbono > 1,2), los átomos de carbono se difunden a la superficie del material y precipitan la fase de grafito (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Factores de temperatura:

Cuando la temperatura de sinterización es <1350 °C, la reacción del carbono es incompleta y el carbono libre restante precipita.

Las fluctuaciones de temperatura (±10 °C) provocan una carburación local y la proporción de volumen de carbono libre aumenta entre un 5 % y un 10 % (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Si la velocidad de enfriamiento es demasiado lenta (<5 °C/min), el carbono precipitará durante el proceso de enfriamiento y la velocidad de carburación aumentará aproximadamente un 5 % (Journal of Materials Science 2025).

Factores de mezcla:

La tasa de carbono residual de la cera de parafina (PW) o SBR en la mezcla es del 0,15% al 0,3% y el contenido de carbono aumenta después de la descomposición.

Un tiempo de mezcla insuficiente (<10 horas) da como resultado una distribución desigual del carbono y un aumento en la tasa de carburación local de aproximadamente el 8%-12% (ITIA 2024).

El negro de carbón se aglomera durante el proceso de mezcla (partículas aglomeradas > 20 μm), lo que genera un exceso local de carbono (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Mecanismo microscópico:

Durante la descarburación, la fase η reduce la energía de enlace de la interfaz WC-Co (de 1,2 J/m² a 0,8-1,0 J/m²) y aumenta la tendencia a la propagación de grietas (Journal of Materials Science 2025).

Durante la carburación, el carbono libre aumenta el ángulo de humectación (de 5° a 15°-25°), reduce la mojabilidad del cobalto en relación con el WC y afecta la adhesión del recubrimiento (ITIA 2024).

Una pequeña desviación en el contenido de carbono (±0,1 % en peso) provocará que la tensión interfacial aumente en aproximadamente un 10 %-15 %, agravando aún más los microdefectos (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

4. Efectos de la descarburación y la carburación

4.1 Microestructura

Descarbonización:

de cobalto aumenta entre un 5% y un 10% y los granos crecen de forma anormal (de 0,5 μm a 1-2 μm).

Aumento de la porosidad 0,05%-0,1% (ISO 3326:2013).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un aumento de aproximadamente el 10% en la tensión interfacial conduce a un aumento del 15% al 20% en la probabilidad de iniciación de microfisuras (Journal of Materials Science 2025).

carburación:

El carbono libre se acumula en los límites de los granos, aumentando la porosidad entre un 0,1% y un 0,15%.

La fase de cobalto se distribuye de manera desigual, la mojabilidad local disminuye entre un 10% y un 15% y la resistencia del límite del grano disminuye aproximadamente un 5% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals 2024).

Las partículas de carbono libres inducen concentración de tensiones y aumentan la tendencia de formación de poros en aproximadamente un 8% (ITIA 2024).

4.2 Rendimiento

dureza:

Descarbonización: disminución del 5%-10% (de HV 1800 a HV 1620-1710).

Carburación: disminución de 3%-5% (HV 1800 a HV 1710-1740).

fortaleza:

Descarburación: La resistencia a la flexión disminuye entre un 10% y un 15% (de 2200 MPa a 1870-1980 MPa).

Carburación: disminuida en un 8%-10% (2200 MPa a 1980-2020 MPa).

tenacidad:

Descarburación: La tenacidad a la fractura (KIC) disminuye entre un 20% y un 25% (de $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $7,5\text{-}8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Carburación: aumentada ligeramente entre un 5% y un 8% (de $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ a $10,5\text{-}10,8 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$).

Resistencia a la corrosión:

Descarburación: La tasa de corrosión aumenta entre un 15% y un 20% (de 0,05 mm/año a 0,06-0,07 mm/año, ASTM G31).

Carburación: La tasa de corrosión aumenta aproximadamente un 5% (0,05 mm/año a 0,0525 mm/año).

Adherencia del recubrimiento:

Carburación: La adhesión disminuye entre un 15% y un 20% (de 50 MPa a 40-42,5 MPa, ASTM C633).

Descarburación: La adhesión disminuye aproximadamente un 5% (50 MPa a 47,5 MPa).

Resistencia a la abrasión:

Descarburación: La tasa de desgaste aumenta en un 20%-25% (de $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ a $0,072\text{-}0,075 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, ASTM G65).

Carburación: La tasa de desgaste aumenta en un 10%-15% (de $0,06 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ a $0,066\text{-}0,069 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$).

4.3 Aplicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cuchillo:

La descarbonización reduce la resistencia al desgaste de la herramienta y la vida útil de corte entre un 20 % y un 30 %. Por ejemplo, en cortes a alta velocidad (200 m/min), la vida útil se reduce de 2 horas a 1,4-1,6 horas (Journal of the Chinese Society of Nonferrous Metals, 2024).

La carburación aumenta la tasa de pelado del revestimiento entre un 15% y un 20% y reduce su vida útil entre un 10% y un 15% (Journal of Materials Science 2025).

Moho :

La descarbonización reduce la resistencia al impacto del molde y su vida útil entre un 15 % y un 20 %. Por ejemplo, la vida útil de un molde de estampación se reduce de 120 000 a 96 000-102 000 veces.

La carburación aumenta la rugosidad de la superficie del molde (Ra aumenta de 0,2 μm a 0,3-0,4 μm) y reduce su vida útil entre un 10% y un 15% (Journal of Materials Science 2025) .

Herramientas de minería:

La descarbonización aumenta el riesgo de fractura en aproximadamente un 25%-30%, por ejemplo, la vida útil de una broca de minería en la perforación de granito se reduce de 2000 m a 1400-1500 m (ITIA 2024).

La carburación hace que la resistencia al desgaste disminuya entre un 10% y un 15% y la vida útil de la broca disminuya entre un 10% y un 12% (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

5. Medidas de mejora

5.1 Control de materia prima

El contenido de carbono se controló estrictamente entre 6,10 y 6,15 % en peso ($\pm 0,05$ %) y se utilizó polvo WC de alta pureza (contenido de carbono entre 6,12 y 6,14 % en peso, óxido $< 0,02$ %). La adición de inhibidores de grano como Cr_3C_2 (0,3 % -0,8 %) o VC (0,1 %-0,5 %) inhibe la formación de la fase η y reduce la proporción de volumen de la fase η en un 8 %-12 % (ITIA 2024) . El negro de carbón de alta pureza (pureza $> 99,9$ %) se utiliza para reducir la interferencia de impurezas (como azufre y oxígeno) en el contenido de carbono, y la tasa de pérdida de carbono se controla entre el 0,01 % y el 0,03 % (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

5.2 Optimización de la mezcla

Utilizando un molino de bolas planetario para mezclar (12-18 horas, 300-500 r/min), la uniformidad mejora en un 10%-15% y la desviación de la distribución de carbono es $< 0,05$ % en peso .

Utilice aglutinantes con bajo contenido de residuos de carbono, como PEG o PVA (tasa de residuos de carbono $< 0,03$ %), para reemplazar la cera de parafina tradicional (tasa de residuos de carbono 0,1 %-0,2 %).

La optimización de los medios de molienda de bolas (como bolas de WC en lugar de bolas de acero)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

puede reducir la contaminación por hierro y reducir el consumo de carbono en aproximadamente un 0,02 % (Journal of Materials Science, 2025).

La adición de dispersantes (como ácido esteárico, 0,1%-0,3%) puede reducir la aglomeración de negro de humo y mejorar la uniformidad entre un 5% y un 8% (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

5.3 Optimización de la sinterización

Se adopta la sinterización al vacío (grado de vacío $<10^{-3}$ Pa), y el oxígeno en la atmósfera se controla para que sea $<0,05\%$, $H_2 <2\%$ y $H_2O <0,03\%$ para evitar la oxidación o volatilización del carbono.

La temperatura de sinterización se controla a $1380-1420\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) y el tiempo de retención es de 1 a 1,5 horas para evitar la descomposición del WC o la precipitación de carbono libre.

La velocidad de enfriamiento se controla a $5-10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, lo que reduce el riesgo de precipitación de carbono libre en aproximadamente un 5 % (Journal of Materials Science 2025).

El prensado isostático en caliente (HIP, 100-150 MPa, $1350-1400\text{ }^{\circ}\text{C}$) elimina la porosidad, con una porosidad de $<0,01\%$ (ISO 3326:2013).

Utilizando un sistema de monitoreo de la atmósfera (detección en tiempo real del contenido de CO/CH_4) para garantizar que el potencial de carbono sea $<1,0$, la tasa de carburación se reduce en aproximadamente un 10% (ITIA 2024).

5.4 Retroalimentación de detección

La prueba magnética de cobalto (GB/T 3849) se utiliza para detectar la desviación del contenido de carbono ($\pm 0,05\%$ en peso) y controlar con precisión la fase η y el carbono libre.

Al combinar la difracción de rayos X (DRX) y la microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la microestructura, la tasa de detección de la fase η /carbono libre aumentó entre un 15% y un 20%.

La espectroscopia de energía dispersiva (EDS) se utiliza para analizar la distribución de carbono, con una desviación controlada de $\pm 0,03\%$ en peso y una tasa de defectos reducida entre un 10 % y un 15 % (The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2024).

Implementar el monitoreo de espectroscopia infrarroja en línea para detectar el contenido de CO/CO_2 en la atmósfera de sinterización y ajustar el proceso en tiempo real, reduciendo la tasa de defectos en aproximadamente un 8% (ITIA 2024).

5.5 Tratamiento de superficies

La capa de carbono libre (espesor $0,01-0,03\text{ mm}$) se eliminó mediante pulido y la rugosidad de la superficie R_a fue $<0,2\text{ }\mu\text{m}$.

Utilizando PVD TiN, Recubrimiento de TiAlN o CrN (espesor $2-5\text{ }\mu\text{m}$), la adhesión del recubrimiento mejora en un 15%-20% (ASTM C633).

La limpieza con plasma se utiliza para eliminar el carbono residual de la superficie y la adhesión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del revestimiento mejora en aproximadamente un 10 % (Journal of Materials Science 2025).

El tratamiento de nitruración a baja temperatura (500-600 °C) aumenta la dureza de la superficie en aproximadamente un 5% y la resistencia a la corrosión en un 10%-15% (ASTM G31).

Efecto:

La proporción de volumen de la fase η y el carbono libre se reduce entre un 10% y un 15%.

La dureza aumentó entre un 5% y un 8% (de HV 1710 a HV 1800-1850).

La resistencia a la flexión aumentó entre un 10% y un 15% (de 1980 MPa a 2200-2300 MPa).

La resistencia al desgaste se mejora entre un 15% y un 20% y la vida útil de las herramientas y los moldes se extiende entre un 20% y un 30%.

6. Casos de aplicación

Herramientas de carburo cementado con bajo contenido de Co (WC-6 % Co): mediante sinterización al vacío (1400 °C, grado de vacío 10^{-3} Pa) y agregando 0,5 % Cr_3C_2 , la fase η se reduce en un 10 %-12 %, la dureza alcanza HV 1850 y la vida útil aumenta de 1,5 horas a 1,8-2 horas al cortar acero al carbono medio (200 m/min) (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

Molde de carburo cementado de alto Co (WC-15%Co): contenido de carbono controlado con precisión (6,12 % en peso) y pulido, el carbono libre se reduce en un 10 %-15 %, la resistencia a la flexión alcanza 2,4-2,5 GPa y la vida útil del molde de estampación aumenta de 100 000 veces a 115 000-120 000 veces (ITIA 2024).

Molde de carburo cementado a base de Ni (WC-10 % Ni): utilizando HIP (150 MPa, 1400 °C) y revestimiento de CrN, la porosidad es $<0,01$ %, la tasa de corrosión es $<0,005$ mm/año y la vida útil de los componentes de ingeniería marina aumenta de 0,8 años a 1,1-1,2 años (Journal of Materials Science 2025).

de grano WC 0,2 μm) : Utilizando nanopolvo WC y recubierto con Al_2O_3 (3 μm) , la dureza alcanza HV 1950-2000 y la vida útil aumenta de 3 horas a 3,8-4 horas al cortar aleaciones de alta temperatura (250 m/min) (Revista de la Sociedad China de Metales No Ferrosos, 2024).

7. Normas

GB/T 3849-2015: Método de prueba para propiedades magnéticas de cobalto en carburo cementado, detección de desviación del contenido de carbono.

ISO 4499-2:2020: Evaluación de la microestructura de carburos cementados, análisis de la fase η y carbono libre.

ASTM B406-96(2021) : Método de prueba para la resistencia a la flexión del carburo cementado.

ASTM G31-21: Método de ensayo para resistencia a la corrosión de materiales metálicos.

ASTM C633-13(2021): Método de prueba para la adhesión de recubrimientos.

ISO 3326:2013: Método para la determinación de la porosidad en carburos cementados.

ASTM G65-00(2010): Ensayo de abrasión con rueda de caucho/arena seca, que evalúa la resistencia al desgaste.

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