

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

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

CTIA GROUP LTD

Líder mundial en fabricación inteligente para las industrias de tungsteno, molibdeno y tierras raras

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

INTRODUCCIÓN A CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, una subsidiaria de propiedad absoluta con personalidad jurídica independiente establecida por CHINATUNGSTEN ONLINE, se dedica a promover el diseño y la fabricación inteligentes, integrados y flexibles de materiales de tungsteno y molibdeno en la era de Internet industrial. CHINATUNGSTEN ONLINE, fundada en 1997 con www.chinatungsten.com como punto de partida (el primer sitio web de productos de tungsteno de primer nivel de China), es la empresa de comercio electrónico pionera del país centrada en las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Aprovechando casi tres décadas de profunda experiencia en los campos del tungsteno y el molibdeno, CTIA GROUP hereda las excepcionales capacidades de diseño y fabricación, los servicios superiores y la reputación comercial global de su empresa matriz, convirtiéndose en un proveedor integral de soluciones de aplicación en los campos de productos químicos de tungsteno, metales de tungsteno, carburos cementados, aleaciones de alta densidad, molibdeno y aleaciones de molibdeno.

En los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha creado más de 200 sitios web profesionales multilingües sobre tungsteno y molibdeno, disponibles en más de 20 idiomas, con más de un millón de páginas de noticias, precios y análisis de mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras. Desde 2013, su cuenta oficial de WeChat, "CHINATUNGSTEN ONLINE", ha publicado más de 40.000 artículos, atendiendo a casi 100.000 seguidores y proporcionando información gratuita a diario a cientos de miles de profesionales del sector en todo el mundo. Con miles de millones de visitas acumuladas a su sitio web y cuenta oficial, se ha convertido en un centro de información global y de referencia para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, ofreciendo noticias multilingües, rendimiento de productos, precios de mercado y servicios de tendencias del mercado 24/7.

Basándose en la tecnología y la experiencia de CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP se centra en satisfacer las necesidades personalizadas de los clientes. Utilizando tecnología de IA, diseña y produce en colaboración con los clientes productos de tungsteno y molibdeno con composiciones químicas y propiedades físicas específicas (como tamaño de partícula, densidad, dureza, resistencia, dimensiones y tolerancias). Ofrece servicios integrales de proceso completo que abarcan desde la apertura del molde y la producción de prueba hasta el acabado, el embalaje y la logística. Durante los últimos 30 años, CHINATUNGSTEN ONLINE ha proporcionado servicios de I+D, diseño y producción para más de 500.000 tipos de productos de tungsteno y molibdeno a más de 130.000 clientes en todo el mundo, sentando las bases para una fabricación personalizada, flexible e inteligente. Con esta base, CTIA GROUP profundiza aún más en la fabricación inteligente y la innovación integrada de materiales de tungsteno y molibdeno en la era del Internet Industrial.

El Dr. Hanns y su equipo en CTIA GROUP, con más de 30 años de experiencia en la industria, han escrito y publicado análisis de conocimiento, tecnología, precios del tungsteno y tendencias del mercado relacionados con el tungsteno, el molibdeno y las tierras raras, compartiéndolos libremente con la industria del tungsteno. El Dr. Han, con más de 30 años de experiencia desde la década de 1990 en el comercio electrónico y el comercio internacional de productos de tungsteno y molibdeno, así como en el diseño y la fabricación de carburos cementados y aleaciones de alta densidad, es un reconocido experto en productos de tungsteno y molibdeno tanto a nivel nacional como internacional. Fiel al principio de proporcionar información profesional y de alta calidad a la industria, el equipo de CTIA GROUP escribe continuamente documentos de investigación técnica, artículos e informes de la industria basados en las prácticas de producción y las necesidades de los clientes del mercado, obteniendo amplios elogios en la industria. Estos logros brindan un sólido respaldo a la innovación tecnológica, la promoción de productos y los intercambios industriales de CTIA GROUP, impulsándolo a convertirse en un líder en la fabricación de productos de tungsteno y molibdeno y en servicios de información a nivel mundial.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP® | Tecnología sólida, futuro inteligente

El líder mundial en servicios digitales e inteligentes para las industrias del tungsteno, el molibdeno y las tierras raras.

Procesamiento personalizado de boquillas de carburo cementado

Las boquillas de carburo se caracterizan por su resistencia al desgaste, a la corrosión y a altas temperaturas, además de una larga vida útil. Se utilizan ampliamente en el arenado, la pulverización, el corte por chorro de agua, la perforación petrolera, la industria química, la agricultura, el procesamiento de alimentos y otros campos.

Características principales de las boquillas de carburo

Dureza: HRA 88 - 92; Precisión: tolerancia del orificio de la boquilla ±0,001 mm, rugosidad de la superficie Ra 0,10,4 μ m .

Adaptabilidad: resistencia a la temperatura 800 – 1000°C, resistencia a la corrosión pH 210.

Eficiencia: Admite inyección de alta presión (0,1500 MPa), con una eficiencia aumentada entre un 20 y un 50 %.

Vida útil: Excelente resistencia al desgaste, la vida útil es 515 veces mayor que la de los materiales comunes.

Personalización: varios tipos (chorro de arena, atomización, fabricación de leche en polvo, etc.), adecuados para diversas condiciones de trabajo.

Principales tipos de boquillas de carburo

tipo	describir	Principales usos y escenarios de aplicación	Especificaciones típicas mm
Boquilla de chorro de arena Boquilla de chorro de arena	Diseño de alta resistencia al desgaste, chorro abrasivo.	Eliminación de óxido de barcos, desbarbado de piezas de automóviles y limpieza de hormigón.	Diámetro de boquilla 2 - 12, longitud 50 - 200
Boquilla de chorro de agua Boquilla de chorro de agua	Chorro de agua a alta presión, corte de materiales duros	Corte de titanio aeroespacial, corte de material compuesto automotriz, procesamiento de piedra.	El diámetro de la boquilla es de 0,12, la longitud es de 20 a 100,
Boquilla de pulverización Boquilla de recubrimiento por pulverización	Pulverización precisa de pintura o revestimientos cerámicos	Recubrimiento de álabes de turbinas, recubrimiento de motores, pulverización de placas de circuitos electrónicos.	El diámetro de la boquilla es de 0,55, la longitud es de 30 a 150,
Boquillas para yacimientos petrolíferos Boquilla para yacimientos petrolíferos	Resistencia a altas presiones, resistencia a la corrosión, perforación por chorro de agua.	Inyección de fluidos de perforación petrolera, limpieza de fondo de pozo, inyección de lodos mineros.	Diámetro de boquilla 3 - 15, longitud 50 - 150,
Boquilla atomizadora Boquilla atomizadora	Pulverización de atomización fina, dispersión líquida.	Pulverización de pesticidas agrícolas, atomización de líquidos químicos, tratamiento de gases residuales ambientales.	El diámetro de la boquilla es de 0,23, la longitud es de 20 a 100,
Boquilla de combustión Boquilla del quemador	Diseño resistente a altas temperaturas, inyección de	Combustión de calderas de energía, reacción química a alta temperatura, inyección en horno	Diámetro de boquilla 1 - 10, longitud 30 - 120,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	combustible o gas.	metalúrgico.	
Microboquilla Microboquilla	Orificio de boquilla ultrapequeño, inyección de alta precisión.	Aerosol de medicamentos médicos, limpieza de chips electrónicos, recubrimiento de precisión de aviación.	Diámetro de la boquilla 0,05 - 0,5, longitud 10 - 50
Boquillas resistentes a la corrosión Boquilla resistente a la corrosión	Resistente a ácidos fuertes, álcalis y entornos químicos.	Inyección de soluciones químicas de ácidos y álcalis, desulfuración y desnitrificación para protección del medio ambiente, inyección de agua de mar en ingeniería marina.	Diámetro de boquilla 1 - 10, longitud 30 - 150,
Boquilla para la fabricación de leche en polvo Boquilla rociadora de leche en polvo	Especialmente diseñado para secado por aspersión para atomizar emulsiones de manera uniforme.	Producción de leche en polvo para procesamiento de alimentos, procesamiento de productos lácteos agrícolas, en cumplimiento con las normas de contacto con alimentos FDA/UE.	El diámetro de la boquilla es de 0,53 mm. Longitud 20100 mm,

GRUPO CTIA LTD.
3er piso, n.º 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008
TEL.: 05925129595 18750234579 Correo electrónico: info@ctia.group



GRUPO CTIA LTD.

Procesamiento personalizado de matrices de estampación de carburo cementado

Las matrices de estampación de carburo se caracterizan por su resistencia al desgaste, a la corrosión y a altas temperaturas, y su larga vida útil. Se utilizan ampliamente en la fabricación de automóviles, el procesamiento de componentes electrónicos, productos de hardware, la industria aeroespacial, equipos médicos y otros sectores.

Características principales de las matrices de estampación de carburo cementado

Dureza: HRA 8892. Precisión: tolerancia del molde $\pm 0,001$ mm, rugosidad superficial Ra 0,1 - 0,4 μ m .

Adaptabilidad: resistencia a la temperatura 800 – 1000°C, resistencia a la corrosión pH 210.

Eficiencia: Admite estampado de alta frecuencia, con una eficiencia aumentada en un 2050%.

Vida útil: Excelente resistencia al desgaste, la vida útil es 515 veces mayor que la de los moldes comunes.

Personalización: Varios tipos (matriz de embutición, matriz de punzonado, matriz compuesta, etc.), adecuados para diversas condiciones de trabajo.

Principales tipos de matrices de estampación de carburo cementado

tipo	describir	Principales usos y escenarios de aplicación	Especificaciones típicas
matriz de estiramiento Troquel de dibujo	Diseño de alta resistencia al desgaste, adecuado para el conformado por estiramiento de metal.	Estiramiento de paneles de carrocería de automóviles, contenedores metálicos y carcasas de aleación de aluminio.	El diámetro de la matriz es de 10200 mm, el espesor es de 20100 mm y la vida útil es de 502 millones de punzonados.
Troquel de corte Troquel de corte delgadas.	Punzonado de alta precisión, adecuado para corte de placas delgadas.	Perforación de marcos conductores de componentes electrónicos, piezas de automóviles y accesorios de hardware.	El espacio entre matrices es de 0,010,1 mm, el espesor es de 1580 mm y la vida útil es de 301,5 millones de veces de estampado.
Molde compuesto Troquel compuesto	Estampado multipaso integrado, adecuado para piezas complejas.	Conectores aeroespaciales, piezas de equipos médicos y procesamiento compuesto de hardware de precisión.	El diámetro de la matriz es de 20150 mm, el espesor es de 20100 mm y la vida útil es de 401,8 millones de punzonados.
Matrices para yacimientos petrolíferos Matriz de yacimientos petrolíferos	Resistente a altas presiones y corrosión, adecuado para estampación con cargas pesadas.	Piezas de equipos de perforación petrolera, accesorios para tuberías de gas natural, piezas de maquinaria minera.	El diámetro de la matriz es de 30200 mm, el espesor es de 30120 mm y la vida útil es de 301,2 millones de veces de estampado.
Troquel de estampación de alta velocidad	Diseño resistente a altas temperaturas y alta frecuencia, adecuado para estampado rápido.	Sujetadores automotrices, conectores electrónicos, líneas de producción de estampado continuo de alta velocidad.	La matriz tiene un diámetro de 10100 mm, un espesor de 1580 mm y una vida útil de 602,5 millones de punzonados .
Modelo de carga	Diseño de alta resistencia,	Estampado de placas gruesas de piezas de	El diámetro de la matriz es de 50300

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

pesada Troquel de alta resistencia	adecuado para estampación de placas gruesas.	maquinaria pesada, estructuras navales y herrajes para construcción.	mm, el espesor es de 30120 mm y la vida útil es de 301,2 millones de veces de estampado.
Micro molde Micro troquel	Tamaño ultrapequeño, adecuado para microestampado de alta precisión.	Micropiezas para dispositivos médicos, microconectores para electrónica y componentes para sensores de aviación.	La matriz tiene un diámetro de 550 mm, un espesor de 1040 mm y una vida útil de 20,8 millones de punzonados .
Molde resistente a la corrosión Matriz resistente a la corrosión	Resistente a ácidos fuertes y álcalis, adecuado para estampación en ambientes químicos.	Piezas de equipos químicos, accesorios de ingeniería marina y estampación de materiales corrosivos.	El diámetro de la matriz es de 15150 mm, el espesor es de 2080 mm y la vida útil es de 502 millones de punzonados.
Molde de grado alimenticio Troquel de grado alimenticio	Especialmente diseñado para la estampación de piezas relacionadas con alimentos, cumpliendo normas.	Los moldes para envasado de alimentos y las piezas de equipos de procesamiento de productos lácteos cumplen con los estándares de contacto con alimentos de la FDA/UE.	El diámetro de la matriz es de 10100 mm, el espesor es de 1580 mm y la vida útil es de 502 millones de punzonados.

GRUPO CTIA LTD.

3.er piso, n.º 25-1, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008
, 05925129595, 18750234579, correo electrónico: info@ctia.group



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GRUPO CTIA LTD.

Procesamiento personalizado de engranajes de bolas de carburo

Los dientes de bola de carburo se caracterizan por su resistencia al desgaste, a la corrosión y a altas temperaturas, además de una larga vida útil. Se utilizan ampliamente en minería, construcción de túneles, fresado de carreteras, perforación petrolera, ingeniería de la construcción, minería de carbón y otros campos.

Tipos principales de dientes de bola de carburo

tipo	Descripción práctica	Principales usos y escenarios de aplicación	Especificaciones típicas mm
Selección de corte	Diseño de alta resistencia al desgaste, corte de roca dura.	Minería de carbón, excavación de túneles y minería de roca dura.	Diámetro del diente 1050, longitud 50150
Diente tunelizado	Diseño de alta resistencia para equipos de tunelaje.	Metro, túnel ferroviario, excavación de ingeniería subterránea.	Diámetro del diente 1560 Longitud 60180
Diente de fresado	Corte de alta frecuencia resistente a altas temperaturas, planificación de carreteras	Mantenimiento de carreteras, fresado de pistas, reparación de vías urbanas.	Diámetro del diente 830, longitud 40120
Perforación de dientes	Resistente a altas presiones, corrosión y operaciones de perforación.	Perforación de petróleo, exploración de gas natural, estudios geológicos.	Diámetro del diente 1040, longitud 50140
Dientes de excavación rotatorios Diente de excavación rotatorio	Diseño de alta tenacidad, equipo de perforación rotatorio.	Cimentación de pilotes de construcción, cimentación de puentes, construcción de terminales portuarias.	Diámetro del diente 2080, longitud 70200
Diente de minería de carbón	Diseño resistente a impactos, minería de carbón.	Minas de carbón a cielo abierto, minería subterránea de carbón, equipos de lavado de carbón.	Diámetro del diente 1550, longitud 50160
Micro diente	Tamaño ultrapequeño, corte de alta precisión.	Exploración geológica de precisión, microperforaciones, componentes de aviación.	Diámetro del diente 520, longitud 2080
Dientes resistentes a la corrosión Diente resistente a la corrosión	Fuerte resistencia a ácidos y álcalis, corte en ambientes corrosivos.	Minería de fondos marinos, extracción de minerales, ingeniería de suelos ácidos.	Diámetro del diente 1050, longitud 50150
Diente de alta resistencia	Diseño de alta resistencia, material súper duro.	Minas de roca dura, extracción de mineral de hierro, trituración de ingeniería a gran escala.	Diámetro del diente 20100, longitud 80220

GRUPO CTIA LTD.

3.er piso, n.º 25, Wanghai Road, Software Park II, Xiamen, 361008
, 05925129595 18750234579
Correo electrónico: info@ctia.group

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Parte 4: Clasificación y campos de aplicación del carburo cementado

Capítulo 14: Aplicaciones emergentes y multifuncionalidad del carburo cementado

El carburo cementado de tungsteno es un material compuesto de alta dureza, resistencia al desgaste y tenacidad, fabricado mediante pulvimetalurgia, con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) u otros metales (como níquel, Ni, cromo, Cr) como fase aglutinante. Sus componentes básicos suelen incluir WC (70-94%), Co (6-15%), etc. Algunas fórmulas avanzadas pueden añadir elementos como TiC . TaC o Pt para optimizar el rendimiento. Gracias a sus excelentes propiedades físicas y químicas, el carburo cementado se ha convertido en un material importante en la industria moderna y en los campos tecnológicos emergentes.

14.0 Propiedades del carburo cementado

El rendimiento del carburo cementado proviene de su microestructura única y diseño de composición:

Alta dureza

El rango de dureza es HV 1600-2500 ± 30. Gracias a la alta dureza del WC (similar a la del diamante), mantiene una excelente resistencia a la deformación a altas temperaturas (hasta 1000 °C ± 20 °C).

Excelente resistencia al desgaste

La tasa de desgaste es <0,05 mm³/N·m ± 0,01 mm³/N·m. Su resistencia al desgaste es de 10 a 20

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

veces superior a la del acero, lo que lo hace adecuado para entornos altamente abrasivos, como herramientas de corte y procesamiento abrasivo.

Conductividad eléctrica

La resistividad es $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, que es cercana a la de los conductores metálicos y es adecuada para aplicaciones electrónicas, especialmente en escenarios donde se requiere una disipación de calor eficiente.

Biocompatibilidad

La tasa de supervivencia celular es $>95\% \pm 2\%$ y se puede utilizar para implantación in vivo después del tratamiento de superficie, mostrando baja toxicidad y buena compatibilidad tisular.

Rendimiento catalítico

Con una corriente MOR (reacción de oxidación del metanol) de $>450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, los catalizadores basados en WC funcionan bien en celdas de combustible, acercándose a la eficiencia catalítica del metal precioso Pt.

Estabilidad térmica

Mantiene la integridad estructural a $800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ y tiene un coeficiente de expansión térmica bajo (aproximadamente $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), lo que lo hace adecuado para dispositivos de procesamiento y almacenamiento de energía a alta temperatura.

tenacidad mecánica

Resistencia a la flexión $600\text{-}2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, dureza y tenacidad se equilibran ajustando el contenido de Co.

El rendimiento del carburo cementado se ha mejorado significativamente mediante la optimización de la composición (como Co 6%-15% $\pm 1\%$ para controlar la tenacidad, Pt 0,5%-2% $\pm 0,1\%$ para mejorar el rendimiento catalítico), la modificación de la superficie (como el espesor del recubrimiento PVD/CVD de $15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ para mejorar la resistencia a la corrosión) y procesos de fabricación avanzados (como la fusión selectiva por láser (SLM), potencia láser de 200-400 W $\pm 10 \text{ W}$). Por ejemplo, la conductividad se incrementa en aproximadamente un 20% $\pm 3\%$, la eficiencia catalítica se incrementa en aproximadamente un 30% $\pm 5\%$ y la porosidad se reduce a $<2\% \pm 0,1\%$, sentando las bases para aplicaciones multifuncionales.

14.0 Aplicación multifuncional del carburo cementado

El carburo cementado ha demostrado versatilidad en campos emergentes. Con su rendimiento superior (alta dureza HV 1600-2000 ± 30 , resistencia a la compresión $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, conductividad eléctrica resistividad $< 10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, resistencia a la corrosión tasa de corrosión $< 0,01 \text{ mm} / \text{año} \pm 0,001 \text{ mm} / \text{año}$), se usa ampliamente en campos de vanguardia como la electrónica, la biomedicina, el almacenamiento de energía catalítica y la fabricación aditiva. Además, con base en la búsqueda completa de la red y las últimas tendencias de la industria, la aplicación multifuncional del carburo cementado se ha expandido a más campos, incluidos, entre otros, los siguientes aspectos. Este capítulo comienza desde cinco aspectos, analizando sistemáticamente su aplicación y tendencias de desarrollo, y proporcionando una base teórica y práctica para las secciones posteriores.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Piezas electrónicas y conductoras de carburo cementado

La alta conductividad eléctrica y estabilidad térmica del carburo cementado (soporta temperaturas de hasta $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) lo convierten en una opción ideal para moldes electrónicos, sustratos de disipación de calor y materiales de contacto eléctrico, especialmente en encapsulados de semiconductores (marcos conductores de chips), equipos 5G (soportes de antenas de alta frecuencia) y conectores de baterías de vehículos eléctricos. Según datos en línea, el carburo cementado (como WC-Ni) se utiliza en herramientas de procesamiento microelectrónico y taladros de placas de circuito impreso de ultraalta densidad debido a su baja resistividad ($<8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) y excelente resistencia a la oxidación ($<0,01\text{ \%} \pm 0,001\text{ \%}$), cumpliendo con los requisitos de alta precisión y durabilidad de las estaciones base 5G (velocidades de transmisión de datos $>10\text{ Gbps} \pm 1\text{ Gbps}$) y dispositivos de computación cuántica (temperatura de funcionamiento $<4\text{ K} \pm 0,5\text{ K}$). Además, los compuestos basados en WC combinados con grafeno ($0,2\%-1\% \pm 0,01\%$) tienen una conductividad mejorada ($>150\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$) y están surgiendo en electrónica flexible (como sensores portátiles, flexibilidad $>90\% \pm 2\%$) y blindaje electromagnético (eficiencia de blindaje $>90\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$).

Aplicaciones biomédicas del carburo cementado

La biocompatibilidad (citotoxicidad $<5\% \pm 1\%$), la resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) y la alta dureza del carburo cementado respaldan el desarrollo de implantes (como prótesis de cadera y rodilla) y herramientas quirúrgicas (como sierras y taladros para huesos), combinados con tecnología de modificación de superficie (como recubrimiento de hidroxiapatita, espesor $5\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$), para cumplir con los requisitos de alta precisión ($<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y estabilidad a largo plazo ($>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$) de los dispositivos médicos. Según datos en línea, el WC-Co se utiliza cada vez más en implantes dentales (índice de integración ósea $>95\% \pm 2\%$) y fijadores espinales (resistencia a la fatiga $>1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), y la nitruración superficial (contenido de N $1\%-2\% \pm 0,1\%$) mejora las propiedades antibacterianas (índice antibacteriano $>90\% \pm 2\%$). Además, los materiales basados en WC mostraron potencial en biosensores (sensibilidad $>10^3 \pm 10^2$) y andamios de ingeniería de tejidos (porosidad $20\%-30\% \pm 1\%$) debido a su alta área superficial específica ($>50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$) y bioactividad (índice de adhesión celular $>85\% \pm 2\%$).

Catálisis y almacenamiento de energía de carburo cementado

El rendimiento catalítico de los compuestos WC-Pt (corriente MOR $>450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) es excelente en celdas de combustible (densidad de potencia $>1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$) y electrolizadores (producción de hidrógeno $>1\text{ L/min} \pm 0,1\text{ L/min}$), lo que promueve el desarrollo de tecnología de energía limpia, especialmente en la economía del hidrógeno (mercado global $>\text{US\$}200\text{ mil millones} \pm \text{US\$}20\text{ mil millones}$, 2025) con gran potencial. Los datos de investigación muestran que los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) se han aplicado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

en supercondensadores (capacidad específica $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), ánodos de baterías de iones de litio (capacidad específica $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$) y electrólisis de agua para la producción de hidrógeno (corriente OER $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), y el dopaje WC-Mo (Mo $1\%-3\% \pm 0,1\%$) mejora la eficiencia OER (corriente $> 350 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$). Además, la actividad catalítica de los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) en la reducción de CO_2 (tasa de conversión $> 80\% \pm 2\%$) y la síntesis de amoníaco (rendimiento $> 100 \text{ mg/h} \cdot \text{g} \pm 10 \text{ mg/h} \cdot \text{g}$) ha atraído la atención debido a su estructura multifásica y alta estabilidad (resistencia a la corrosión $< 0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), lo que respalda el objetivo de neutralidad de carbono (emisiones netas cero en 2040 ± 5 años).

Fabricación aditiva de carburo cementado

A través de tecnologías de impresión 3D como SLM y Binder Jetting, el carburo cementado puede lograr una producción personalizada de formas geométricas complejas (precisión $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), que se utiliza en la industria aeroespacial (álabes de turbinas, resistencia a altas temperaturas $> 800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$), fabricación de moldes (moldes de estampación resistentes al desgaste, vida útil $> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y equipos de energía (válvulas de alta temperatura, presión $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), mejorando significativamente la flexibilidad de fabricación (velocidad de impresión $> 100 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$). Según la información de toda la red, las tecnologías DED y EBM se utilizan para la reparación de piezas estructurales de gran tamaño (resistencia de interfaz $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la fabricación de materiales con gradiente (contenido de Co del 6% al $15\% \pm 1\%$ de cambio de gradiente), y la resistencia a la tracción de los materiales compuestos de WC- TiC en entornos de alta temperatura ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) es $> 1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$. La fabricación aditiva también se ha expandido a dispositivos micro-nano (tamaño de la característica $< 10 \text{ }\mu\text{m} \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$) y a la bioimpresión (porosidad del andamio del 20% al $40\% \pm 1\%$), lo que promueve la medicina personalizada y el diseño estructural ligero.

Carburo cementado para aplicaciones de defensa y entornos extremos

Los carburos cementados se utilizan cada vez más en defensa y entornos extremos. El WC-Co se utiliza en ojivas que penetran blindaje (profundidad de penetración $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$) y blindaje balístico (nivel de protección NIJ IV ± 1) gracias a su alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y resistencia al impacto (tenacidad al impacto $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$). Los compuestos de WC - TiC - WN mantienen la integridad estructural (deformación residual $< 0,1\% \pm 0,01\%$) a altas tasas de deformación ($> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$).

En equipos de aguas profundas (presión $> 1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$) y tecnología espacial (vacío $< 10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$, temperatura $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ a $200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), los materiales a base de carburo de tungsteno (WC) se utilizan como sellos y recubrimientos de protección térmica (resistencia al calor $> 1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$) debido a su bajo coeficiente de expansión térmica ($5 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$) y resistencia a la corrosión ($< 0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$). Además, el WC muestra un potencial multifuncional como material de protección y material objetivo en la industria nuclear (tolerancia a

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la radiación $> 10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$) y en experimentos de física de alta energía (estabilidad del haz de partículas $> 99 \% \pm 0,5 \%$).

Fabricación inteligente y aplicación de sensores de carburo cementado

El carburo cementado, combinado con la tecnología de fabricación inteligente, se ha expandido al campo de los sensores y el Internet de las Cosas. Según datos en línea, los materiales basados en WC se utilizan en sensores de presión (sensibilidad $> 10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), sensores de temperatura (tiempo de respuesta $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) y monitores de vibraciones (rango de frecuencia de 10 Hz a 10 kHz $\pm 1 \text{ Hz}$) debido a su alta conductividad ($> 100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) y estabilidad mecánica (resistencia a la compresión $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). Nanorrecubrimientos integrados (como SiO_2 , espesor 5-10 nm $\pm 0,1 \text{ nm}$) mejora la adaptabilidad ambiental (humedad 50 %-95 % HR $\pm 5 \% \text{ HR}$). En la Industria 4.0, las herramientas inteligentes basadas en WC (vida útil de autodiagnóstico $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) permiten la monitorización en tiempo real (precisión $\pm 1 \%$) mediante sensores integrados, optimizan el procesamiento de corte (tasa de desgaste de la herramienta $< 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) y el ajuste de parámetros de impresión 3D.

Este capítulo profundizará en casos de aplicación específicos, desafíos técnicos y perspectivas futuras en estos campos, revelando cómo el carburo cementado puede satisfacer necesidades industriales cada vez más diversas a través de la multifuncionalidad.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.1 Componentes electrónicos y conductores de carburo cementado

En el campo de la electrónica, el carburo cementado ha atraído mucha atención debido a su alta dureza ($HV\ 1800-2200 \pm 30$), baja resistividad ($<10\ \mu\Omega \cdot cm \pm 0,1\ \mu\Omega \cdot cm$), excelente conductividad térmica ($>100\ W/m \cdot K \pm 5\ W/m \cdot K$) y excelente estabilidad térmica (la temperatura de funcionamiento puede alcanzar los $800\ ^\circ C \pm 50\ ^\circ C$). Se utiliza principalmente en moldes y sustratos de disipación de calor. Los moldes se utilizan para el empaquetado de chips, el estampado de precisión y el procesamiento de componentes microelectrónicos, con una vida útil de hasta 10^6 veces $\pm 10^5$ veces; Los sustratos de disipación de calor admiten dispositivos electrónicos de alta potencia (como módulos de potencia, LED y componentes de estaciones base 5G), con una eficiencia de disipación de calor de más del $90\% \pm 2\%$ y un bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $5 \times 10^{-6} / ^\circ C \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$), lo que garantiza la estabilidad dimensional durante los ciclos térmicos. El material se basa principalmente en el sistema WC-Co (el contenido de Co del carburo cementado es del 6% al $12\% \pm 1\%$), el tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado se controla a $0,5-2\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$, y la conductividad eléctrica y la conductividad térmica se optimizan dopando Cu ($1\% - 5\% \pm 0,5\%$) o Ni ($2\% - 8\% \pm 0,5\%$). Algunas fórmulas de gama alta añaden Pt ($0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$) para mejorar las propiedades catalíticas y conductoras. El alto punto de fusión del carburo cementado (aproximadamente $2870\ ^\circ C \pm 20\ ^\circ C$) le confiere una excelente durabilidad en entornos extremos, y su resistencia a la corrosión (un índice de resistencia a la corrosión $>90\% \pm 2\%$ se puede lograr mediante recubrimiento PVD) amplía aún más su gama de aplicaciones. En 2025, a medida que la industria electrónica se desarrolla hacia la alta frecuencia, la alta potencia y la miniaturización, la demanda de carburo cementado en la fabricación de semiconductores, la gestión de energía de vehículos eléctricos y los dispositivos inteligentes seguirá creciendo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

En la industria electrónica, el carburo cementado se usa ampliamente en la fabricación de moldes y sustratos de disipación de calor debido a su excelente dureza ($HV\ 1600-2000 \pm 30$), resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$), alta conductividad térmica (conductividad térmica $>100\ W/m \cdot K \pm 5\ W/m \cdot K$) y resistencia a altas temperaturas (resistencia a la temperatura $>800\ ^\circ C \pm 50\ ^\circ C$). Estas características le permiten desempeñarse bien en escenarios de mecanizado de precisión y disipación de calor eficiente, especialmente en los campos de semiconductores, tecnología 5G y vehículos eléctricos. Con la creciente demanda de miniaturización e integración de alta densidad de dispositivos electrónicos, las perspectivas de aplicación del carburo cementado en la industria electrónica continúan expandiéndose.

14.1.1 Moldes de aleación dura para la industria electrónica

Los moldes de carburo cementado para la industria electrónica se utilizan para el mecanizado de precisión de componentes electrónicos. Requieren alta precisión (desviación de mecanizado $<0,01\ mm \pm 0,001\ mm$), excelente resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01\ mm/año \pm 0,001\ mm/año$) y larga vida útil ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) para cumplir con los altos requisitos de la fabricación de dispositivos microelectrónicos. El material es principalmente del sistema WC-Co (contenido de Co del 6 % al 10 % $\pm 1\ %$), y el tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado se controla entre $0,5$ y $1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$. Se utilizan algunos recubrimientos superficiales (como TiN, espesor $5-15\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) o CrN (espesor $10-20\ \mu m \pm 0,2\ \mu m$) para mejorar aún más la resistencia al desgaste y a la oxidación. El molde se optimiza mediante prensado isostático en caliente (HIP, $1200\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$, $150\ MPa \pm 1\ MPa$) o tratamiento superficial con láser.

En la industria electrónica, los moldes de carburo cementado se han convertido en una herramienta esencial en la fabricación de componentes electrónicos gracias a su excelente dureza ($HV\ 1600-2000\pm30$), resistencia al desgaste (índice de desgaste $<0,05\ mm^3/N \cdot m \pm 0,01\ mm^3/N \cdot m$), alta resistencia térmica (resistencia a la temperatura $>800\ ^\circ C \pm 50\ ^\circ C$), excelente precisión, conductividad y resistencia a la corrosión. Con el rápido desarrollo de la industria electrónica hacia la ultraminiaturización, el alto rendimiento, la inteligencia, la ecología y la multifuncionalidad, los escenarios de aplicación de los moldes de carburo cementado se han ampliado significativamente y la demanda del mercado ha seguido aumentando. Estos moldes se han actualizado rápidamente mediante la iteración tecnológica continua, la optimización de la formulación de materiales y la innovación en procesos de fabricación avanzados (como la fabricación aditiva, el tratamiento superficial de precisión y la tecnología de monitorización inteligente), convirtiéndose en una de las áreas de consumo de alta gama más importantes y de mayor crecimiento en la industria del carburo cementado. Los moldes de carburo cementado se utilizan ampliamente en la fabricación de semiconductores, la tecnología electrónica flexible, las comunicaciones 5G/6G, la electrónica de consumo, la electrónica automotriz de nuevas energías, los equipos del Internet de las Cosas (IoT) y campos emergentes como la computación cuántica y los equipos médicos inteligentes. Se prevé que el tamaño del mercado alcance los 5000 millones de dólares estadounidenses (aproximadamente 500 millones), con una tasa de crecimiento anual de hasta el 15 %-20 %, lo que refleja plenamente su posición clave en la promoción del progreso tecnológico y la modernización industrial de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

industria electrónica.

(1) Matriz de punzonado con marco de plomo de carburo

¿Qué es una matriz de punzonado con marco de plomo de carburo?

Las matrices de punzonado de carburo para marcos conductores son herramientas de procesamiento de alta precisión diseñadas específicamente para el sector del encapsulado de semiconductores. Se utilizan principalmente para el conformado de pines de circuitos integrados (CI), el procesamiento de soportes de LED, el conformado de conductores de módulos de potencia y la fabricación de conductores para nuevos microsensores. Su material de núcleo utiliza la fórmula WC-8Co, y el tamaño de grano se controla con precisión a $0,6 \pm 0,01 \mu\text{m}$. Se prepara mediante pulvimetalurgia y prensado isostático en caliente (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para garantizar la uniformidad del material y una alta densidad (porosidad $<0,5\% \pm 0,1\%$). El recubrimiento de TiN (espesor $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) se aplica a la superficie del molde a través de la tecnología de deposición física de vapor (PVD), que reduce significativamente el coeficiente de fricción ($<0,2 \pm 0,02$), mejora la resistencia a la oxidación (temperatura duradera hasta $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y reduce la adhesión, mejorando efectivamente la durabilidad (hasta $1,2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y la precisión de corte ($<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). Al combinar el micromecanizado láser, el recubrimiento multicapa (como TiAlN o TiSiN, espesor $10-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) y la tecnología de enfriamiento adaptativo, el molde se optimiza aún más para admitir conductores ultrafinos (ancho $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), estabilidad de alta frecuencia ($> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$) y resistencia al ciclo térmico (-40°C a $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), y a través de la tecnología de gemelo digital, se logran el monitoreo del desgaste en tiempo real (precisión $\pm 1\%$) y la optimización de parámetros para satisfacer las necesidades de producción de ultra alta precisión y ultra gran escala.

Rendimiento de la matriz de punzonado con marco de plomo de carburo

El molde tiene alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), alta durabilidad ($>1,2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y una precisión de punzonado extremadamente alta ($<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). El recubrimiento de TiN reduce significativamente la fricción ($<0,2 \pm 0,02$), mejora la resistencia a la oxidación (resistente a $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y mejora la estabilidad del ciclo térmico (de -40°C a $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) a través de un recubrimiento multicapa (como TiAlN, resistente al calor $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y tecnología de refrigeración adaptativa. Además, la integración de gemelos digitales permite la predicción del desgaste (error $<5\% \pm 0,5\%$) y la optimización del proceso.

Tipos de matrices de punzonado con marco de plomo de carburo

Molde estándar

Basado en WC-8Co, es adecuado para el procesamiento convencional de pines de IC y soportes de LED, con una precisión de $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y una durabilidad de 1×10^6 veces $\pm 10^4$ veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Molde de alta temperatura

Adición de TiC (5%-10%±0,5%) y revestimiento de TiAlN (10-15 μm ±0,2 μm) , resistencia al calor >800° C ±50°C, adecuado para módulos de potencia como encapsulado IGBT.

Molde ultrafino

de grano optimizado (<0,5 μm ± 0,01 μm) y el micromaquinado láser admiten un ancho de cable <0,01 mm ± 0,001 mm, lo que cumple con los requisitos del proceso de 5 nm/3 nm y micro LED .

Molde inteligente

Los sensores integrados y los módulos gemelos digitales monitorean el desgaste (precisión ±1%) y ajustan los parámetros en tiempo real para aplicaciones de alta frecuencia (>10 GHz ± 1 GHz).

Aplicación de matrices de punzonado con marco de plomo de carburo

Las matrices de punzonado de carburo para marcos conductores se utilizan ampliamente en diversos campos de alta tecnología, especialmente en las industrias de semiconductores y electrónica. En la producción de circuitos integrados de alta densidad, como la fabricación de chips de proceso de 5 nm y 3 nm, las matrices garantizan la máxima precisión y consistencia de los marcos conductores, lo que facilita la producción en masa de procesadores y memorias de alta gama. En el campo del encapsulado de semiconductores de potencia, las matrices se utilizan en la producción de módulos IGBT, MOSFET y dispositivos de potencia de SiC y GaN para satisfacer los altos requisitos de fiabilidad de vehículos eléctricos, inversores fotovoltaicos y controladores de motores industriales. El encapsulado de microLED es otra importante área de aplicación. La tecnología de punzonado de alta precisión de las matrices facilita la fabricación de componentes ópticos para micropantallas y dispositivos portátiles, mejorando el brillo y la resolución de las pantallas.

Además, los moldes se utilizan ampliamente en la fabricación de nuevos microsensores, incluyendo sensores MEMS (sistemas microelectromecánicos), sensores de presión y unidades de medición inercial (IMU), proporcionando un soporte clave para dispositivos inteligentes, nodos IoT y electrónica médica. En el campo de la electrónica de grado automotriz, especialmente en el empaquetado de chips de conducción autónoma, módulos de radar y unidades de computación a bordo, la resistencia al ciclo térmico del molde (-40 °C a 150 °C ± 10 °C) y la estabilidad de alta frecuencia (> 10 GHz ± 1 GHz) garantizan la estabilidad y seguridad a largo plazo de los sistemas electrónicos. Los chips de computación de alto rendimiento y los dispositivos de computación cuántica también dependen de las capacidades de procesamiento de plomo ultrafino del molde (ancho < 0,01 mm ± 0,001 mm), promoviendo el desarrollo de aceleradores de inteligencia artificial y circuitos de control de bits cuánticos.

En el campo de la electrónica de consumo, los moldes facilitan el procesamiento de marcos conductores multicapa para teléfonos inteligentes, tabletas y dispositivos de juegos, mejorando la delgadez y el rendimiento del producto. En la automatización industrial, los moldes se combinan con tecnología de fabricación inteligente para su uso en la producción en masa de piezas mecánicas de precisión y conectores, optimizando la eficiencia de la producción (aumento de >20% ± 2%). Mediante la tecnología de gemelo digital, los moldes logran un mantenimiento predictivo y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimización de los parámetros del proceso, reducen el tiempo de inactividad (reducción de $>15\% \pm 2\%$) y son adecuados para los requisitos ambientales extremos de la electrónica aeroespacial (como los módulos de comunicación por satélite) y la electrónica de defensa (como los sistemas de guiado de radares y misiles), ampliando aún más su gama de aplicaciones.

(2) Molde de embalaje de viruta de carburo

¿Qué es un molde de embalaje de chips de carburo?

Los moldes de carburo para el empaquetado de chips son herramientas de procesamiento de alta precisión diseñadas específicamente para el empaquetado de dispositivos microelectrónicos, y se utilizan principalmente para BGA (matriz de rejilla de bolas), QFN (encapsulado cuádruple plano sin plomo), SIP (sistema en paquete), apilamiento de circuitos integrados 3D y empaquetado a nivel de oblea (WLP). Su material de núcleo utiliza la fórmula WC-6Co, con un tamaño de grano con una precisión de $0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$. Alcanza una alta densidad (porosidad $<0,5\% \pm 0,1\%$) mediante procesos de molienda de bolas y sinterización de polvo ultrafino, y se combina con diseños geométricos complejos (como ancho de microcanal de $0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, profundidad de $0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, verticalidad de la pared lateral $<1^\circ \pm 0,1^\circ$). Recubrimiento de CrN (espesor de $10\text{-}15 \mu\text{m}$) $\pm 0,2 \mu\text{m}$, utilizando tecnología de recubrimiento iónico de arco múltiple) se aplica en la superficie del molde para mejorar significativamente la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la resistencia a altas temperaturas ($>350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), lo que extiende efectivamente la vida útil (aproximadamente 8×10^5 veces $\pm 10^4$ veces). Las estructuras complejas (como los canales de refrigeración internos) se personalizan combinando recubrimientos de PVD (como AlTiN o ZrN, con un espesor de $15\text{-}20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) y tecnología de fabricación aditiva (como SLM de fusión selectiva por láser). El molde se optimiza aún más para soportar una alta densidad de empaquetado ($>1000 \text{ I/O} \pm 50 \text{ I/O}$), estrés de ciclado térmico (>5000 veces ± 500 veces) y procesos de empaquetado de bajo estrés. El monitoreo en tiempo real de la distribución del estrés y los cambios de temperatura (precisión $\pm 1\%$) se logra a través de la tecnología de sensores integrados, que mejora las capacidades de gestión térmica (conductividad térmica $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y el rendimiento del empaque ($>98\% \pm 1\%$) para satisfacer las necesidades de miniaturización y alta confiabilidad.

Rendimiento del molde de embalaje de virutas de carburo

El molde tiene alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$), alta durabilidad ($>8 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y una precisión geométrica extremadamente alta (ancho de microcanal $0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, verticalidad de la pared lateral $<1^\circ \pm 0,1^\circ$). El recubrimiento de CrN reduce significativamente la tasa de corrosión ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y mejora la resistencia a altas temperaturas ($>350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), mientras que el recubrimiento multicapa de AlTiN o ZrN mejora aún más la estabilidad del ciclo térmico (resistente a >5000 veces ± 500 veces, resistencia al calor $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). El proceso de fabricación aditiva optimiza los canales de refrigeración internos y mejora la gestión térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(conductividad térmica $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), y la integración de sensores permite la monitorización del estrés (error $<5\% \pm 0,5\%$) y la optimización del proceso.

Tipos de moldes para empaquetado de chips de carburo

Molde estándar

Basado en recubrimiento WC-6Co y CrN, es adecuado para paquetes BGA y QFN convencionales, con una precisión de $0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y una durabilidad de 8×10^5 veces $\pm 10^4$ veces.

Molde de alta temperatura

Adición de TiC ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) y revestimiento de AlTiN ($15-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$), resistencia al calor $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, adecuado para apilamiento de IC SIP y 3D.

Molde miniaturizado

Granos optimizados ($<0,4 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y tecnología SLM para soportar microcanales (ancho $<0,02 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) para satisfacer las necesidades de chips WLP y neuromórficos.

Molde inteligente

Los sensores integrados y los módulos de monitoreo en tiempo real optimizan la distribución del estrés (precisión $\pm 1\%$) y la gestión térmica para empaques de alta densidad ($>1000 \text{ E/S} \pm 50 \text{ E/S}$).

Aplicación del molde de embalaje de virutas de carburo cementado

Los moldes de carburo para el empaquetado de chips se utilizan ampliamente en diversas áreas de vanguardia del empaquetado de dispositivos microelectrónicos. En el empaquetado de circuitos integrados de alta densidad, el molde es compatible con las tecnologías BGA, QFN y WLP, cumpliendo con los requisitos de alta precisión de chips de proceso de 5 nm o inferiores, aceleradores de inteligencia artificial y memorias (precisión $<0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). En el apilamiento de circuitos integrados 3D y el empaquetado a nivel de sistema (SIP), el complejo diseño geométrico y las capacidades de gestión térmica del molde (conductividad térmica $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) promueven el desarrollo de módulos multichip y la integración heterogénea, y se utilizan ampliamente en módulos de computación de borde, servidores de alto rendimiento y hardware para centros de datos.

En el campo de la electrónica de consumo, los moldes se utilizan para el empaquetado miniaturizado de teléfonos móviles con pantalla plegable y dispositivos portátiles (como relojes inteligentes). Esto garantiza la precisión de microcanales (ancho de $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y la resistencia al ciclo térmico (> 5000 veces ± 500 veces), mejorando así la fiabilidad y la vida útil de las pantallas flexibles y los dispositivos portátiles. El empaquetado de chips neuromórficos y dispositivos de computación cuántica también se basa en el proceso de moldeo de ultraalta precisión y baja tensión para facilitar el diseño miniaturizado de nuevas arquitecturas informáticas.

La electrónica automotriz es otra área de aplicación importante. Los moldes permiten el empaquetado de chips de sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), módulos de radar y unidades de computación a bordo, adaptándose a rangos de temperatura extremos (de -40°C a $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y a requisitos de alta confiabilidad (rendimiento $> 98\% \pm 1\%$). En la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

automatización industrial, los moldes se utilizan para el empaquetado de sensores y actuadores de precisión con el fin de mejorar el rendimiento y la estabilidad de los equipos de fabricación inteligente. La electrónica aeroespacial (como los módulos de comunicación por satélite) y la electrónica de defensa (como los sistemas de guiado de radares y misiles) aprovechan la resistencia a la corrosión ($< 0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la alta estabilidad térmica ($> 350 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) del molde para cumplir con los requisitos de uso a largo plazo en entornos extremos.

A través de la integración de sensores y la tecnología de gemelo digital, el molde logra un mantenimiento predictivo (reduciendo el tiempo de inactividad en $>15\% \pm 2\%$) y una optimización de los parámetros del proceso, lo que lo hace adecuado para escenarios de producción en masa (mejora de la eficiencia en $>20\% \pm 2\%$) y de densidad de empaquetado ultra alta ($>1000 \text{ E/S} \pm 50 \text{ E/S}$), ampliando aún más su potencial de aplicación en la tecnología microelectrónica futura.

(3) Matriz de punzonado de placa de circuito de carburo

¿Qué es una matriz de punzonado de placa de circuito de carburo?

Las matrices de carburo para punzonado de placas de circuito impreso (PCB) son herramientas de procesamiento de alta precisión diseñadas específicamente para el procesamiento de PCB. Se utilizan principalmente para placas multicapa, placas HDI (interconexión de alta densidad), placas de circuito flexibles (FPC), placas rígido-flexibles y nuevas placas de circuito de ondas milimétricas de alta frecuencia (HFM). Su material principal utiliza la fórmula WC-TiC-8Co (TiC $3\% \pm 0,5\%$), con un tamaño de grano de $0,8 \pm 0,01 \text{ }\mu\text{m}$. Se sinteriza a alta temperatura ($1450 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) y se trata térmicamente para mejorar la resistencia a la fatiga a alta temperatura (vida útil por fatiga $> 10^7 \text{ veces} \pm 10^5 \text{ veces}$) y se utiliza tecnología de revestimiento láser (espesor de la capa de revestimiento $20\text{-}30 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,5 \text{ }\mu\text{m}$, utilizando polvo WC-Co) para reparar los bordes desgastados, lo que garantiza que la precisión de punzonado se mantenga $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$. El molde admite punzonado de alta velocidad ($>100 \text{ veces/segundo} \pm 10 \text{ veces/segundo}$), alineación compleja entre capas (desviación $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y procesamiento de microagujeros (diámetro $0,1\text{-}0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), y optimiza la durabilidad ($>1,5 \times 10^7 \text{ veces} \pm 10^5 \text{ veces}$) y la conductividad (resistividad $<10 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \text{ }\mu\Omega \cdot \text{cm}$) a través de estructuras compuestas de múltiples materiales (como WC-TiC-TaC o WC-Co-Cr). Además, el molde introduce un nanorrecubrimiento (como WC/C, espesor $5\text{-}10 \text{ }\mu\text{m} \pm 0,1 \text{ }\mu\text{m}$) para mejorar el rendimiento antiadherente (coeficiente de fricción $<0,2 \pm 0,02$), y adopta una estructura biónica (como un soporte interno de panel) para mejorar la resistencia al impacto ($>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), optimiza la trayectoria de perforación a través del algoritmo de IA, reduce el desperdicio de material ($<2\% \pm 0,5\%$) y satisface las necesidades de procesamiento de placas de circuito de alto rendimiento.

Rendimiento de la matriz de punzonado de placas de circuito de carburo

El molde presenta una alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (índice de desgaste $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), alta durabilidad ($>1,5 \times 10^7 \text{ veces} \pm 10^5 \text{ veces}$) y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

punzonado de alta precisión ($<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$). La tecnología de revestimiento láser repara los bordes desgastados y mantiene la precisión del procesamiento de microagujeros (diámetro $0,1\text{-}0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), mientras que los nanorrecubrimientos (como WC/C) reducen el coeficiente de fricción ($<0,2 \pm 0,02$) y mejoran la resistencia a la oxidación a alta temperatura ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). La estructura compuesta de múltiples materiales optimiza la conductividad (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), la estructura biónica mejora la resistencia al impacto ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la optimización del algoritmo de IA reduce el desperdicio de material ($<2\% \pm 0,5\%$), lo que mejora la resistencia a la fatiga a alta temperatura en su conjunto (vida útil por fatiga $> 10^7$ veces $\pm 10^5$ veces).

Tipos de matrices de punzonado de carburo para placas de circuito

Molde estándar

Basado en WC-TiC-8Co, es adecuado para perforar tableros multicapa y FPC, con una precisión de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y una durabilidad de 1×10^7 veces $\pm 10^5$ veces.

Molde de alta temperatura

Al agregar TaC ($2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$) y una estructura compuesta WC-Co-Cr, tiene una resistencia térmica de $>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ y es adecuado para placas de circuitos de ondas milimétricas de alta frecuencia.

Molde de microagujeros

Optimice el revestimiento láser (espesor $20\text{-}30 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) y el procesamiento de microagujeros (diámetro $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$) para satisfacer las necesidades de las placas HDI.

Molde inteligente

Integrado con algoritmos de IA y estructuras biónicas (soporte de panel), optimiza la trayectoria de perforación (precisión $\pm 0,5\%$) y la resistencia al impacto ($>600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) en tiempo real.

Aplicación de matrices de punzonado de carburo para placas de circuito

Las matrices de punzonado de carburo para circuitos impresos se utilizan ampliamente en diversas áreas clave del procesamiento de PCB. En la fabricación de placas multicapa y placas HDI (interconexión de alta densidad), la alta precisión de punzonado ($<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y la compleja alineación entre capas (desviación $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) de las matrices satisfacen los requisitos de cableado de alta densidad de teléfonos inteligentes, tabletas y placas base de servidores. En el procesamiento de placas de circuitos flexibles (FPC) y placas rígido-flexibles, la alta resistencia a la temperatura ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y a la fatiga ($>10^7$ veces $\pm 10^5$ veces) de las matrices satisfacen los requisitos de miniaturización de teléfonos con pantalla plegable, dispositivos portátiles y pantallas flexibles.

La producción de nuevas placas de circuito impreso de ondas milimétricas de alta frecuencia depende de la conductividad del molde (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y de la capacidad de procesamiento de microagujeros (diámetro de $0,1\text{-}0,2 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), y se utiliza ampliamente en estaciones base 5G, módulos de antena y sistemas de radar. En el campo de la electrónica automotriz, los moldes respaldan la producción en masa de placas de circuito impreso para sistemas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de gestión de baterías (BMS), sistemas de entretenimiento en vehículos y sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), adaptándose a entornos de alta temperatura ($>900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) y a requisitos de alta confiabilidad (rendimiento $>98\% \pm 1\%$). La producción de placas de control para electrodomésticos inteligentes utiliza la perforación a alta velocidad del molde ($>100 \pm 10$ veces/segundo) y el ahorro de material (desperdicio $<2\% \pm 0,5\%$) para mejorar la eficiencia de fabricación de electrodomésticos como altavoces inteligentes y lavadoras.

Las placas de circuitos de aviónica (como los módulos de control de vuelo y los sistemas de navegación) y la electrónica de defensa (como los equipos de guiado y comunicación de misiles) dependen de la resistencia al impacto ($>500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) y la durabilidad ($>1,5 \times 10^7$ veces $\pm 10^5$ veces) de los moldes para garantizar su uso a largo plazo en entornos extremos. El desarrollo de dispositivos IoT y la tecnología 6G impulsa aún más la aplicación de moldes, especialmente en el empaquetado de módulos de computación de borde y placas de circuitos de ultraalta frecuencia. Los moldes garantizan un alto rendimiento y bajos costos de mantenimiento (reduciendo el tiempo de inactividad en más del $15\% \pm 2\%$) mediante la optimización con IA y el nanorrecubrimiento (WC/C), lo que impulsa el desarrollo inteligente y eficiente de la industria electrónica del futuro.

(4) Matriz de estampado de microconector de carburo

¿Qué es una matriz de estampado de microconectores de carburo ?

La matriz de estampado de microconectores de carburo es una herramienta de alta precisión diseñada para el procesamiento de microconectores. Se utiliza principalmente para microconectores como USB-C, HDMI, Lightning y nuevas interfaces de alta velocidad (como Thunderbolt 5, interfaz híbrida optoelectrónica). Su material de núcleo adopta la fórmula WC-10Co, con un tamaño de grano de $0,4 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. La tecnología de moldeo por inyección de polvo ultrafino garantiza la uniformidad del material, una precisión de estampado $<0,003 \pm 0,0005\text{ mm}$ y una durabilidad de $1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces. El recubrimiento DLC (carbono tipo diamante) (espesor $2-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, dureza HV 3000 ± 100) se aplica a la superficie del molde mediante deposición química en fase de vapor mejorada con plasma (PECVD), lo que reduce significativamente la tasa de desgaste ($<0,02\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), mejora la resistencia a la corrosión (prueba de niebla salina $>500\text{ horas} \pm 50\text{ horas}$) y la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,1 \pm 0,01$). Combinado con nano-recubrimiento (como WC/C o aC:H, espesor $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) y tecnología micro-EDM, el molde admite estructuras ultrafinas (paso $<0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), alto transporte de corriente ($>5\text{ A} \pm 0,5\text{ A}$) y estabilidad de transmisión de señal óptica (pérdida $<0,1\text{ dB/km} \pm 0,01\text{ dB/km}$), y extiende la vida útil y reduce los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$) a través de funciones autolubricantes (como aditivos MoS_2), satisfaciendo las necesidades de procesamiento de conectores de alto rendimiento.

Rendimiento de la matriz de estampado de microconectores de carburo

El molde tiene alta dureza (HV 2000 ± 50), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,02$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,005 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), alta durabilidad ($>1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y precisión de estampado ultraalta ($<0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$). El recubrimiento DLC mejora la resistencia a la corrosión (resistencia a la niebla salina >500 horas ± 50 horas) y la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,1 \pm 0,01$), y el nanorrecubrimiento (como WC/C) mejora aún más la durabilidad ($>2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y la resistencia a altas temperaturas ($>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). La función autolubrificante optimiza los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$) y la micro-EDM admite estructuras ultrafinas (paso $<0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), satisfaciendo las necesidades de alta corriente ($>5\text{A} \pm 0,5\text{A}$) y transmisión de señal óptica (pérdida $<0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$).

Tipos de matrices de estampación de microconectores de carburo

Molde estándar

Basado en WC-10Co y revestimiento DLC, adecuado para estampado USB-C y HDMI, precisión $<0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$, durabilidad $1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces.

Molde de alta velocidad

Se agregó un revestimiento nano WC/C ($5-15 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$), admite alta corriente Thunderbolt 5 ($>5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) y durabilidad $>2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces.

Molde fotoeléctrico

Optimizar el micro-EDM para cumplir con la estabilidad de la señal óptica de la interfaz híbrida optoelectrónica (pérdida $<0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$) y precisión $<0,002 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$.

Molde autolubrificante

Incorpora aditivos y sensores de MoS_2 , lo que reduce los costes de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$) y es adecuado para uso de alta frecuencia ($>10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$).

Aplicación de matrices de estampación de microconectores de carburo

Las matrices de estampado de microconectores de carburo se utilizan ampliamente en electrónica de consumo y centros de datos. En smartphones, tablets y portátiles, estas matrices facilitan la producción en masa de interfaces USB-C, HDMI y Lightning, garantizando estructuras ultrafinas (paso $<0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y un estampado de alta precisión ($<0,003 \text{ mm} \pm 0,0005 \text{ mm}$), lo que mejora la fiabilidad y la compacidad de los puertos. En centros de datos y servidores, estas matrices se utilizan en la fabricación de Thunderbolt 5 e interfaces de datos de alta velocidad para satisfacer las necesidades de alta corriente ($>5 \text{ A} \pm 0,5 \text{ A}$) y alta velocidad de transferencia de datos ($>40 \text{ Gbps} \pm 2 \text{ Gbps}$).

El desarrollo de nuevas interfaces híbridas optoelectrónicas se basa en la estabilidad de la transmisión de la señal óptica (pérdida $<0,1 \text{ dB/km} \pm 0,01 \text{ dB/km}$) y la durabilidad ($>1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) del molde, que se utiliza ampliamente en equipos de comunicación de fibra óptica y clústeres de computación de alto rendimiento. En la electrónica automotriz, el molde admite el procesamiento de conectores para sistemas de infoentretenimiento en vehículos y sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS), adaptándose a entornos de alta temperatura ($>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y altos requisitos de confiabilidad (rendimiento $>98\% \pm 1\%$). Los dispositivos domésticos inteligentes, como los altavoces y enrutadores inteligentes, también utilizan la perforación de alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

velocidad (> 100 veces/segundo ± 10 veces/segundo) y la resistencia a la corrosión (resistencia a la niebla salina > 500 horas ± 50 horas) del molde para mejorar la durabilidad del producto.

Los dispositivos de automatización industrial e IoT (como módulos de control industrial y nodos de sensores) se basan en la lubricidad (coeficiente de fricción $< 0,1 \pm 0,01$) y la función autolubrificante del molde para reducir los costes de mantenimiento ($< 5\% \pm 1\%$) y optimizar la eficiencia de producción (aumento $> 20\% \pm 2\%$). La electrónica aeroespacial (como los módulos de comunicación por satélite) y la electrónica de defensa (como los equipos de comunicación encriptados) aprovechan la resistencia al impacto (> 500 MPa ± 50 MPa) y la durabilidad del molde para satisfacer las necesidades de uso a largo plazo en entornos extremos. Mediante el nanorrecubrimiento y la optimización con IA, el molde impulsa el desarrollo de futuras interfaces de alta velocidad (como las comunicaciones 6G) y conectores miniaturizados, lo que impulsa la eficiencia y la inteligencia de la industria electrónica.

(5) Molde de embalaje de sensor de carburo

¿Qué es un molde de embalaje de sensor de carburo?

Los moldes de empaquetado de sensores de carburo cementado son herramientas de alta precisión diseñadas específicamente para el campo del empaquetado de sensores, utilizadas principalmente para MEMS (sistemas microelectromecánicos), sensores ambientales (como sensores de presión, temperatura y gas) y sensores médicos (como sensores de oxígeno en sangre y de ECG). Su material central utiliza la fórmula WC-Co-Ni (Ni $2\% \pm 0,5\%$), un tamaño de grano de $0,7 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y prensado isostático en caliente (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para mejorar la densidad (porosidad $< 0,5\% \pm 0,1\%$), soportar estructuras 3D complejas (altura $0,05\text{--}0,1 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, rugosidad de la pared lateral $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) y una vida útil de aproximadamente 7×10^5 veces $\pm 10^4$ veces. Se aplica un recubrimiento ALD (deposición de capa atómica) (como Al_2O_3 , espesor $10\text{--}20 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) a la superficie del molde para mejorar la resistencia a la humedad (resistencia a la humedad $> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) y el rendimiento antibacteriano (tasa antibacteriana $> 99\% \pm 0,5\%$), y se utilizan microcanales de enfriamiento (diámetro $0,01\text{--}0,02 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) para optimizar el proceso de envasado a alta temperatura ($> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Los sensores integrados monitorizan la tensión del embalaje ($< 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para cumplir los requisitos de miniaturización (tamaño $< 1 \text{ mm}^3 \pm 0,1 \text{ mm}^3$), alta precisión (desviación $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$) y biocompatibilidad (de acuerdo con la norma ISO 10993).

Rendimiento del molde de embalaje del sensor de carburo

El molde tiene alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), alta durabilidad ($> 7 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y empaquetado de alta precisión (desviación $< 0,001 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$). El revestimiento de Al_2O_3 mejora la resistencia a la humedad ($> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) y el rendimiento antibacteriano (tasa antibacteriana $> 99\% \pm 0,5\%$), los microcanales de enfriamiento optimizan la gestión térmica (control de temperatura $< 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), los sensores integrados monitorean el estrés ($< 10 \text{ MPa} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1 MPa) y admite estructuras 3D complejas (altura 0,05-0,1 mm $\pm$ 0,005 mm, rugosidad de la pared lateral Ra <0,2 μ m $\pm$ 0,05 μ m), cumpliendo con los requisitos de biocompatibilidad y empaquetado de alta temperatura.

Tipos de moldes de embalaje de sensores de carburo

Molde estándar

Basado en recubrimiento WC-Co-Ni y Al₂O₃, adecuado para MEMS y sensores ambientales, con precisión <0,001 mm $\pm$ 0,0002 mm y durabilidad 7×10^5 veces $\pm$ 10^4 veces.

Molde de alta temperatura

La adición de TiC (5%-10% $\pm$ 0,5%) permite un empaquetado de alta temperatura (>200 °C $\pm$ 10 °C), lo cual es adecuado para sensores IoT industriales.

Molde médico

Biocompatibilidad optimizada (ISO 10993), canales de microenfriamiento (diámetro <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm) para sensores de oxígeno en sangre y ECG.

Molde inteligente

Sensor de estrés integrado para monitoreo en tiempo real (precisión $\pm$ 1%), adecuado para empaquetado de dispositivos portátiles de alta precisión.

Aplicación del molde de embalaje de sensor de carburo

Los moldes de carburo para el empaquetado de sensores se utilizan ampliamente en hogares inteligentes, el Internet de las Cosas (IoT) industrial y la electrónica médica. En hogares inteligentes, los moldes facilitan el empaquetado de termostatos inteligentes, sensores de calidad del aire y controladores de iluminación inteligentes, garantizando la miniaturización (tamaño <1 mm³ $\pm$ 0,1 mm³) y alta precisión (desviación <0,001 mm $\pm$ 0,0002 mm), mejorando la capacidad de respuesta de los equipos y el ahorro energético. En el IoT, los moldes se utilizan para el empaquetado de sensores de presión, temperatura y vibración en fábricas inteligentes, adaptándose a entornos de alta temperatura (>200 °C $\pm$ 10 °C) y estructuras 3D complejas (altura 0,05-0,1 mm $\pm$ 0,005 mm), lo que facilita la automatización y el mantenimiento predictivo de la Industria 4.0 (reduciendo el tiempo de inactividad en >15 % $\pm$ 2 %).

La electrónica médica es un área de aplicación importante. El molde facilita el empaquetado de sensores de oxígeno en sangre, sensores de ECG (electrocardiograma) y bombas de insulina. Gracias a su biocompatibilidad (conforme a la norma ISO 10993) y propiedades antibacterianas (índice antibacteriano > 99 % $\pm$ 0,5 %), cumple con los altos requisitos de fiabilidad de los monitores cardíacos portátiles y dispositivos médicos implantables (rendimiento > 98 % $\pm$ 1 %). En electrónica de consumo, los moldes se utilizan para el empaquetado de sensores ambientales de relojes inteligentes y pulseras de actividad física, mejorando así la resistencia a la humedad (> 95 % HR $\pm$ 2 % HR) y la durabilidad (> 7×10^5 veces $\pm$ 10^4 veces).

En el campo de la electrónica automotriz, los moldes facilitan el empaquetado de sensores a bordo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(como los de monitoreo de presión de neumáticos y detección de colisiones) para adaptarse a rangos de temperatura extremos (de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y requisitos de alta precisión (desviación $<0,001\text{ mm} \pm 0,0002\text{ mm}$). La electrónica aeroespacial (como las grabadoras de datos de vuelo) y la electrónica de defensa (como los sensores de detección de agentes de guerra química) aprovechan la resistencia a la corrosión y la durabilidad de los moldes para garantizar un uso prolongado en entornos extremos. En dispositivos de IoT y edge computing, los moldes optimizan el rendimiento de los sensores mediante microcanales de refrigeración y monitoreo de tensión ($<10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$), lo que facilita el desarrollo eficiente e inteligente de futuras redes de sensores.

(6) Molde de perforación láser de carburo

¿Qué es la herramienta de perforación láser de carburo ?

La matriz de perforación láser de carburo cementado es una herramienta de alta precisión diseñada para el procesamiento de microagujeros (agujeros ciegos, agujeros enterrados) en placas HDI y circuitos impresos de alta gama (como placas base de servidores, PCB de radar y placas de comunicación por satélite). Su material principal adopta la fórmula WC-TiC-6Co con un tamaño de grano de $0,9 \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$. Su durabilidad se ha mejorado mediante sinterización a alta temperatura ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y endurecimiento superficial por láser (dureza aumentada a $\text{HV } 2000 \pm 50$). La precisión de perforación es $<0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$ y la desviación de apertura es $<0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$. El molde adopta un recubrimiento de TiCN (espesor $10\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, utilizando tecnología CVD) para mejorar la resistencia al choque térmico del láser ($>10^4$ veces $\pm 10^3$ veces), y admite perforación láser de alta densidad de energía ($>10^6\text{ W/cm}^2 \pm 10^5\text{ W/cm}^2$). Combinado con un diseño de estructura porosa (densidad de poro $>1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$) y resistencia al láser UV (longitud de onda $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, resistencia $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces), el molde optimiza el rendimiento mediante tecnología de procesamiento de ultraprecisión (como láser de femtosegundo) y recubrimiento autorreparador (como TiAlCN, espesor $15\text{-}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,3\text{ }\mu\text{m}$). La estructura de gradiente multicapa mejora la conductividad térmica ($>200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$) y reduce las grietas térmicas (longitud $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), satisfaciendo las necesidades de procesamiento de microagujeros de placas de circuito de alta gama.

Rendimiento de la matriz de perforación láser de carburo

El molde tiene alta dureza ($\text{HV } 2000 \pm 50$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$), alta durabilidad ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y perforación de alta precisión ($<0,015\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, desviación del diámetro del orificio $<0,005\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$). El recubrimiento de TiCN mejora la resistencia al choque térmico del láser ($>10^4$ veces $\pm 10^3$ veces), y los recubrimientos autorreparadores (como TiAlCN) optimizan la durabilidad ($>2 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y la estabilidad térmica ($>800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$). La estructura de gradiente multicapa mejora la conductividad térmica ($>200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), reduce las grietas térmicas ($<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), admite una alta densidad de energía ($>10^6\text{ W/cm}^2 \pm 10^5\text{ W/cm}^2$) y tolerancia al láser UV (longitud de onda $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tipos de matrices de perforación láser de carburo

Molde estándar

Basado en recubrimiento WC-TiC-6Co y TiCN , es adecuado para agujeros ciegos en tableros HDI con una precisión de $<0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ y una durabilidad de 1×10^5 veces $\pm 10^4$ veces.

Molde de alta temperatura

Agregue revestimiento autorreparador TiAlCN ($15\text{-}25 \mu\text{m} \pm 0,3 \mu\text{m}$) , resistencia al calor $> 800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, adecuado para perforación de PCB de radar.

Molde de múltiples agujeros

Estructura porosa optimizada (densidad de poros $>1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$) , admite microporos de alta densidad en placas de comunicación por satélite y es resistente a los rayos UV $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces.

Molde de ultraprecisión

El procesamiento láser de femtosegundos se utiliza para cumplir con los requisitos de microporos de los equipos AR/VR (apertura $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y conductividad térmica $> 200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Aplicación del molde de perforación láser de carburo cementado

Las matrices de perforación láser de carburo se utilizan ampliamente en el procesamiento de placas de circuito impreso de alta gama. En el procesamiento de microagujeros para placas HDI, las matrices permiten la perforación precisa de agujeros ciegos y enterrados (precisión $<0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), lo que cumple con los requisitos de cableado de alta densidad de las placas base de teléfonos inteligentes, tabletas y portátiles. En la producción de placas base para servidores y placas de circuito impreso para centros de datos, la alta tolerancia a la densidad energética ($>10^6 \text{ W/cm}^2 \pm 10^5 \text{ W/cm}^2$) y la conductividad térmica ($>200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10^5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) de las matrices garantizan una conexión fiable de procesadores de alto rendimiento.

La fabricación de PCB de radar y placas de comunicación por satélite se basa en la resistencia del molde al choque térmico del láser ($>10^4$ veces $\pm 10^3$ veces) y la estructura porosa (densidad de poro $>1000/\text{cm}^2 \pm 100/\text{cm}^2$) , lo que admite el procesamiento de microagujeros de antenas 5G, radares de ondas milimétricas y módulos de comunicación aeroespacial. En el campo de la electrónica de consumo de alta gama, como dispositivos AR/VR y gafas inteligentes, los moldes utilizan tecnología láser de femtosegundos para lograr agujeros ultramicro (apertura $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), lo que mejora la integración de componentes ópticos y electrónicos. En el campo de la electrónica automotriz, los moldes se utilizan para el procesamiento de microagujeros de sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) y placas de circuitos de radar montadas en vehículos, adaptándose a entornos de alta temperatura ($>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y requisitos de alta confiabilidad (rendimiento $>98\% \pm 1\%$).

La electrónica aeroespacial (como los módulos de control de vuelo y los sistemas de navegación) y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la electrónica de defensa (como la guía de misiles y los sistemas de contramedidas electrónicas) utilizan la resistencia al láser UV del molde (longitud de onda de $193\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y la durabilidad ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) para cumplir con los requisitos de uso a largo plazo en entornos extremos. Los dispositivos de automatización industrial e IoT (como las placas de control de fábricas inteligentes) se basan en el control de grietas térmicas del molde ($<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) y el recubrimiento autorreparador para optimizar la eficiencia de la producción (aumento $>20\% \pm 2\%$) y reducir los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$). Con el desarrollo de la tecnología de ondas milimétricas y 6G, el molde respalda aún más el procesamiento eficiente de futuras placas de circuitos de alta frecuencia a través de estructuras de gradiente multicapa y optimización de IA.

El desarrollo y las perspectivas de los moldes de carburo cementado en la industria electrónica

Con la creciente demanda de miniaturización de dispositivos microelectrónicos (procesos de 5 nm y menores) , electrónica flexible (circuitos estirables, OLED y textiles electrónicos), comunicaciones 5G/6G, electrónica de vehículos de nueva energía (como sistemas de gestión de baterías y placas de control de pilas de carga), dispositivos IoT y equipos médicos inteligentes, el alcance de aplicación y los requisitos de optimización del rendimiento de los moldes de la industria electrónica de carburo cementado han aumentado significativamente.

El rápido desarrollo de la industria electrónica ha promovido la iteración de la tecnología de moldes de carburo cementado. Se han añadido nuevos recubrimientos avanzados (como ZrN , AlCrN , WC/C , espesor $15\text{-}25\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$) y tecnologías de fabricación aditiva (como SLM, EBM) para mejorar la vida útil del molde ($>2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces), la precisión ($<0,002\text{ mm} \pm 0,0005\text{ mm}$) y la versatilidad (como la conductividad térmica $>150\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, el aislamiento $>10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$). Como campo de consumo de alta gama, los moldes de carburo cementado han tenido un rendimiento sobresaliente en los campos de los chips de IA, la computación cuántica, la electrónica de vehículos eléctricos, las pantallas flexibles y los dispositivos médicos inteligentes. En el futuro, los moldes se desarrollarán con inteligencia, integrando sensores para monitorizar el desgaste (precisión en tiempo real $<0,001\text{ mm} \pm 0,0001\text{ mm}$), funciones de ajuste adaptativo (compensación de tensión $<5\text{ MPa} \pm 0,5\text{ MPa}$) y un diseño ecológico (reducción del uso de metales pesados $<1\text{ }\% \pm 0,1\text{ }\%$) para afrontar los dobles retos de alta fiabilidad, bajo coste y desarrollo sostenible en la industria electrónica. Al mismo tiempo, la adaptación de la cadena de suministro global y la producción regional (como en el este de China y el sudeste asiático) impulsarán aún más la optimización del diseño de la industria de moldes.

En la industria electrónica, los sustratos de carburo cementado para disipadores de calor se han convertido en componentes esenciales de las soluciones de disipación de calor para dispositivos electrónicos de alta potencia gracias a su excelente conductividad térmica, resistencia a altas temperaturas, bajo coeficiente de expansión térmica y excelente aislamiento eléctrico. A medida que la industria electrónica evoluciona rápidamente hacia un alto rendimiento, compacidad e inteligencia, la demanda de sustratos de carburo cementado para disipadores de calor ha aumentado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

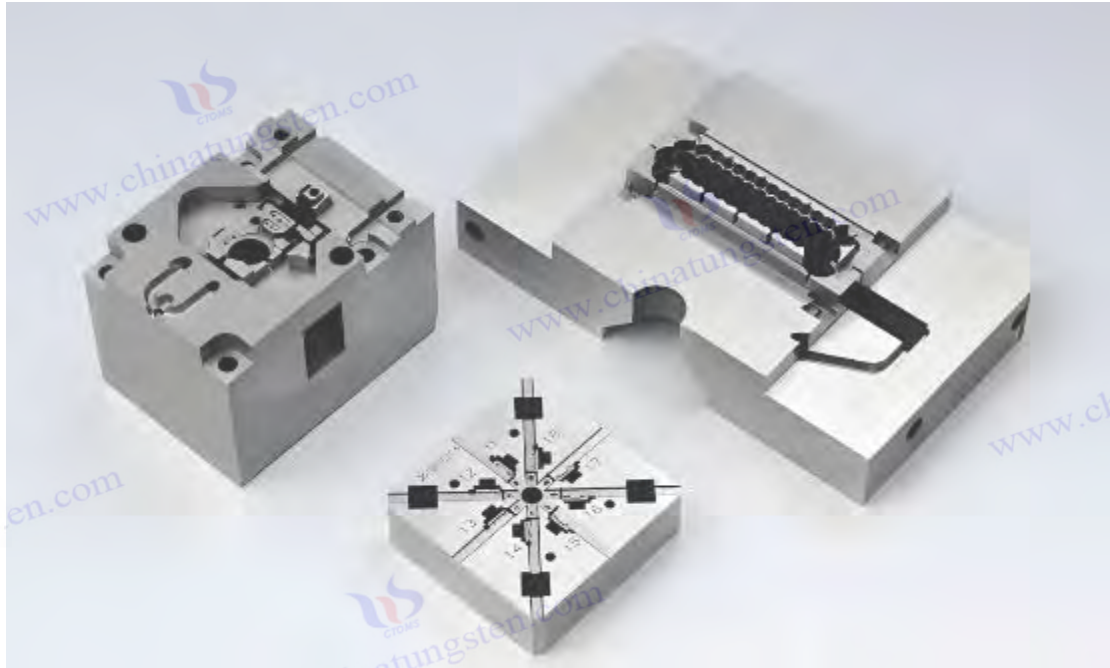
significativamente. Estos sustratos deben tener una alta conductividad térmica ($>200 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), un coeficiente de expansión térmica bajo (aproximadamente $4\text{-}6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y un excelente aislamiento (resistividad volumétrica $> 10^{12} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{11} \Omega\cdot\text{cm}$), para abordar de manera eficaz los desafíos de disipación de calor de los LED, las estaciones base 5G/6G, los módulos de energía de vehículos eléctricos, los chips de inteligencia artificial y los campos emergentes como los dispositivos de computación cuántica. El material se prepara combinando WC (carburo de tungsteno) con partículas de Cu (cobre), diamante, AlN (nitruro de aluminio), SiC (carburo de silicio) o BN (nitruro de boro) (tamaño de partícula $10\text{-}50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), y utilizando procesos avanzados como sinterización por prensado en frío ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), difusión por prensado en caliente ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 2 \text{ MPa}$) o prensado isostático (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para garantizar una distribución uniforme, densidad (porosidad $<1\% \pm 0,1\%$) y estabilidad microestructural (tamaño de grano $<1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$). Estos sustratos se mejoran aún más en cuanto a eficiencia de disipación de calor y confiabilidad a través del procesamiento de precisión (como pulido químico mecánico CMP, rugosidad de superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) y modificación de superficie (como recubrimiento CVD, pulverización de plasma).

Con la integración de alta densidad de dispositivos electrónicos ($>10^6$ transistores/ $\text{mm}^2 \pm 10^5$ transistores/ mm^2), mayor densidad de potencia ($>100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$) y mayor temperatura de funcionamiento ($>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), se espera que el tamaño del mercado de sustratos de disipación de calor de carburo cementado alcance los 3000 millones de dólares ± 300 millones de dólares, con una tasa de crecimiento anual del 20 %-25 %, convirtiéndose en un campo de aplicación de alta gama en la industria del carburo cementado, especialmente en la próxima generación de comunicaciones, vehículos de nueva energía, automatización industrial y electrónica de defensa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.1.2 Sustrato de disipación de calor de aleación dura para la industria electrónica

(1) Sustrato de disipación de calor compuesto de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu)

¿Qué es el disipador de calor compuesto de carburo de tungsteno y cobre (WC-Cu) ?

El sustrato de disipación de calor compuesto de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu) es un material de alto rendimiento diseñado para una gestión térmica eficiente. Se utiliza principalmente en módulos de iluminación LED, módulos electrónicos de potencia (como controladores IGBT y MOSFET), unidades de gestión de energía para electrónica de consumo, inversores para vehículos eléctricos y fuentes de alimentación para servidores de centros de datos. Está hecho de un compuesto de WC y Cu (relación de volumen $70:30 \pm 1\%$) y se prepara mediante sinterización por prensado en frío ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) con un tratamiento térmico posterior ($1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, recocido durante $2 \pm 0,1$ horas, protección con nitrógeno) para garantizar la uniformidad del material y la densidad microestructural (porosidad $< 0,8\% \pm 0,1\%$). El sustrato tiene una conductividad térmica de $220\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, un coeficiente de expansión térmica de $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, un espesor de $0,5\text{--}1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, es ligero (densidad $12\text{--}13\text{ g/cm}^3 \pm 0,1\text{ g/cm}^3$) y tiene una alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 2500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$). La superficie está galvanizada con una capa de Ni/Au (espesor $0,1\text{--}0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) para mejorar la soldabilidad y la resistencia a la oxidación (resistencia a altas temperaturas $> 300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, resistencia a la humedad $> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) y una capa de Ni-P revestida químicamente (espesor $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para mejorar la resistencia a la corrosión (prueba de niebla salina $> 500\text{ horas} \pm 50\text{ horas}$).

Combinando una estructura multicapa (espesor $0,3\text{--}0,7\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y un sistema de enfriamiento de microcanal (diámetro $0,02\text{--}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, caudal $> 0,1\text{ L/min} \pm 0,01\text{ L/min}$),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

el sustrato utiliza nanopartículas de Cu (tamaño de partícula $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$) para mejorar la fuerza de unión de la interfaz (fuerza de adhesión $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) y tecnología de micromaquinado láser para lograr una microtextura superficial. (rugosidad $Ra < 0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), optimiza la eficiencia de disipación de calor ($> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), la tensión térmica ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) y la uniformidad térmica (gradiente de temperatura $< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$), y cumple con los requisitos de disipación de calor de alto rendimiento.

Rendimiento del sustrato de disipación de calor compuesto de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu)

El sustrato tiene una alta conductividad térmica ($220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, optimizada a $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), un bajo coeficiente de expansión térmica ($5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 2500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y diseño liviano (densidad $12-13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$). La fase Cu mejora la conductividad eléctrica ($> 10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$), reduce el calentamiento resistivo ($< 0,5^\circ\text{C/W} \pm 0,05^\circ\text{C/W}$) y optimiza el rendimiento del ciclo térmico (-40°C a $150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, número de ciclos > 5000 veces ± 500 veces). La capa de recubrimiento de Ni/Au mejora la soldabilidad (resistencia a altas temperaturas $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, resistencia a la humedad $> 95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$), y la capa de Ni-P mejora la resistencia a la corrosión (resistencia a la niebla salina > 500 horas ± 50 horas). El sistema de refrigeración por microcanales y las nanopartículas de Cu mejoran aún más la eficiencia de disipación de calor y la unión de la interfaz (fuerza de adhesión $> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), y la simulación térmica impulsada por IA reduce la tensión térmica ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) y el gradiente de temperatura ($< 3^\circ\text{C} \pm 0,3^\circ\text{C}$).

Tipos de sustratos de disipadores de calor compuestos de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu)

Sustrato estándar

Basado en WC-Cu 70:30 y recubrimiento Ni/Au, adecuado para módulos de iluminación LED, espesor $0,5-1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, conductividad térmica $220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Sustrato de alta temperatura

Adición de capa de Ni-P ($1-3 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), resistencia al calor $> 300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, adecuado para controladores IGBT y MOSFET.

Sustrato miniaturizado

Estructuras multicapa optimizadas (espesor $0,3-0,7 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y microcanales (diámetro $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) para dispositivos micro-LED y AR/VR.

Sustrato inteligente

Integra simulación térmica de IA y partículas nano-Cu (tamaño de partícula $< 10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), con una eficiencia de disipación de calor $> 250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, adecuada para fuentes de alimentación de centros de datos.

Aplicación de sustrato compuesto de disipación de calor de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los sustratos de disipación de calor compuestos de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu) se utilizan ampliamente en iluminación, electrónica y vehículos eléctricos. En módulos de iluminación LED, el sustrato admite matrices de LED de alto brillo (densidad de potencia $>50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$, brillo $>200 \text{ lm/W} \pm 10 \text{ lm/W}$), que se utilizan para farolas inteligentes, LED montados en vehículos e iluminación interior, mejorando la eficiencia lumínica y el rendimiento de disipación de calor (conductividad térmica $220 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). En módulos electrónicos de potencia, el sustrato se utiliza para controladores IGBT y MOSFET, optimizando el rendimiento del ciclo térmico (>5000 veces ± 500 veces) y la conductividad eléctrica ($>10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$), satisfaciendo las necesidades de los controladores de motores industriales y los inversores de energía renovable.

Las unidades de gestión de energía de electrónica de consumo, como los adaptadores de corriente para portátiles y los cargadores de alta potencia, se basan en la ligereza (densidad de $12\text{-}13 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) y la resistencia a la corrosión (resistencia a la niebla salina >500 horas ± 50 horas) del sustrato para mejorar la fiabilidad y la vida útil del equipo. En los inversores para vehículos eléctricos, la alta resistencia mecánica del sustrato ($>2500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la refrigeración por microcanales (caudal $>0,1 \text{ L/min} \pm 0,01 \text{ L/min}$) favorecen una disipación térmica eficiente ($>250 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y una uniformidad térmica ($<3 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$) para satisfacer los altos requisitos de potencia de los vehículos de nueva energía. Las fuentes de alimentación del servidor del centro de datos utilizan el diseño optimizado por IA del sustrato y partículas nano-Cu (fuerza de adhesión $>60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para reducir el estrés térmico ($<15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) y mejorar la eficiencia de disipación de calor, lo que respalda el funcionamiento estable de la computación de alto rendimiento y los aceleradores de IA.

En el campo de micro-LED, el sustrato admite pantallas con densidad de píxeles $>1000 \text{ PPI} \pm 100 \text{ PPI}$ y LED automotrices (durabilidad $>10^5$ horas $\pm 10^4$ horas), que se utilizan en dispositivos AR / VR y sistemas de iluminación automotriz. La electrónica médica, como los dispositivos médicos de alta potencia y la electrónica aeroespacial (como los módulos de energía satelital), dependen de la alta resistencia a la temperatura del sustrato ($>300 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) y la resistencia a la humedad ($>95\% \text{ RH} \pm 2\% \text{ RH}$) para cumplir con los requisitos de disipación de calor en entornos extremos. Los módulos de automatización industrial y computación de borde utilizan la microtextura de la superficie del sustrato (rugosidad $R_a < 0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) y la estructura multicapa para optimizar la eficiencia de producción (aumento $>20\% \pm 2\%$) y reducir los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$), promoviendo la aplicación generalizada de la tecnología de disipación de calor de alto rendimiento en el futuro.

(2) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)

¿Qué es un sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)?

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El sustrato compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond) para disipación de calor es un material de alta gama diseñado para una gestión térmica de alto rendimiento. Se utiliza principalmente en módulos de radiofrecuencia de estaciones base 5G/6G, electrónica de potencia para vehículos eléctricos (inversores, controladores de carga), servidores informáticos de alto rendimiento y sistemas de radar militar. Está hecho de WC y diamante (tamaño de partícula: $20\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, relación de volumen: $60:40 \pm 1\%$) y se prepara mediante procesos de difusión por prensado en caliente ($1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$) y prensado isostático (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) para garantizar la densidad del material (porosidad $<0,6\% \pm 0,1\%$) y la uniformidad del grano ($<0,8\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$). La conductividad térmica del sustrato es de $320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, y el aislamiento es $>10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, espesor $0,3\text{--}0,8\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, resistencia a la temperatura $>400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ (estabilidad térmica $>500\text{ horas} \pm 50\text{ horas}$), alta resistencia mecánica (resistencia a la flexión $>3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$).

de diamante CVD (espesor $1\text{--}3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para mejorar la resistencia al desgaste (dureza HV 8000 ± 500) y la uniformidad de la disipación de calor (gradiente de temperatura $<5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), y se utiliza tecnología de limpieza de plasma para optimizar la adhesión de la interfaz ($>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). Combinado con la estructura compuesta de gradiente (contenido de WC $30\% - 60\% \pm 1\%$) y la capa de disipación de calor nano (espesor $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), el sustrato se optimiza mediante tecnología de micromaquinado láser. La microestructura de la superficie (porosidad $1\% - 2\% \pm 0,1\%$) aumenta el área de disipación de calor ($>300\text{ cm}^2 \pm 20\text{ cm}^2$) y reduce la resistencia térmica ($<0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$). El módulo de gestión térmica adaptativa (tiempo de respuesta $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) monitorea la temperatura mediante la incorporación de termopares (precisión $<0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$) para satisfacer las necesidades de disipación de calor de alta frecuencia y corriente ultra grande.

Rendimiento de disipación de calor del sustrato compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)

El sustrato tiene una conductividad térmica ultra alta ($320\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), después de la optimización ($>350\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), un excelente aislamiento ($>10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$), alta resistencia mecánica (resistencia a la flexión $>3000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) y resistencia a altas temperaturas ($>400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, estabilidad térmica $>500\text{ horas} \pm 50\text{ horas}$). El recubrimiento de diamante mejora la resistencia al desgaste (dureza HV 8000 ± 500) y la uniformidad de la disipación térmica (gradiente de temperatura $<5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), la nanocapa de disipación térmica reduce la resistencia térmica ($<0,2\text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C/W}$) y la estructura de gradiente optimiza la conducción térmica ($>350\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$). El módulo de gestión térmica adaptativa monitoriza la temperatura mediante termopares (precisión $<0,2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$, tiempo de respuesta $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$), compatible con dispositivos de potencia de alta frecuencia ($>10\text{ GHz} \pm 1\text{ GHz}$) y aplicaciones de alta densidad de potencia ($>200\text{ W/cm}^2 \pm 20\text{ W/cm}^2$).

Tipos de sustratos de disipación de calor compuestos de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sustrato estándar

Basado en WC-Diamond 60:40 y revestimiento CVD, es adecuado para módulos RF de estación base 5G con un espesor de $0,3-0,8 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y una conductividad térmica de $320 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Sustrato de alta temperatura

Estructura de gradiente agregada (WC 30%-60% $\pm 1\%$), resistencia al calor $> 400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$, adecuada para inversores de vehículos eléctricos.

Sustrato de alta frecuencia

Disipador de calor nano integrado (espesor $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), compatible con dispositivos $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$ y resistencia térmica $< 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Sustrato inteligente

Módulo de gestión térmica adaptativa integrado y termopar, área de disipación de calor $> 300 \text{ cm}^2 \pm 20 \text{ cm}^2$, adecuado para sistemas de radar militares.

Aplicación de sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)

Los sustratos de disipación de calor compuestos de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond) se utilizan ampliamente en comunicaciones, vehículos eléctricos y campos militares. En los módulos RF de la estación base 5G/6G, el sustrato admite dispositivos de potencia de alta frecuencia (como GaN HEMT, $> 10 \text{ GHz} \pm 1 \text{ GHz}$) y alta densidad de potencia ($> 200 \text{ W/cm}^2 \pm 20 \text{ W/cm}^2$), y se utiliza para la disipación de calor de antenas y amplificadores de RF, cumpliendo con la conductividad térmica ultra alta ($320 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y el aislamiento ($> 10^{13} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{12}$). En la electrónica de potencia de vehículos eléctricos, el sustrato se utiliza en inversores y controladores de pilas de carga para optimizar el rendimiento del ciclo térmico ($> 5000 \text{ veces} \pm 500 \text{ veces}$) y la resistencia a altas temperaturas ($> 400 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$), admitir una potencia de carga rápida ($> 350 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$) y un funcionamiento eficiente del sistema de gestión de la batería.

Los servidores informáticos de alto rendimiento se basan en la estructura de gradiente y la nanocapa de disipación de calor del sustrato (resistencia térmica $< 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C/W} \pm 0,02 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$) para reducir la tensión térmica ($< 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) y aumentar el área de disipación de calor ($> 300 \text{ cm}^2 \pm 20 \text{ cm}^2$), lo que respalda el rendimiento estable de los aceleradores de IA y los centros de datos. Los sistemas de radar militares utilizan la resistencia mecánica (resistencia a la flexión $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la resistencia al desgaste (dureza HV 8000 ± 500) del sustrato para cumplir con el uso a largo plazo de módulos de radar y sistemas de contramedidas electrónicas en entornos extremos (estabilidad térmica $> 500 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$). Los equipos de aviónica (como los módulos de control de vuelo y las fuentes de alimentación de los satélites) dependen de la resistencia a altas temperaturas y la uniformidad de disipación de calor del sustrato (gradiente de temperatura $< 5 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) para mejorar la confiabilidad y la vida útil del equipo.

En el campo de la electrónica de consumo, los sustratos satisfacen las necesidades de disipación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

térmica de dispositivos de RA/RV y consolas de videojuegos de alto rendimiento, y se adaptan a aplicaciones de alta frecuencia y corriente ultraalta ($>100\text{ A} \pm 5\text{ A}$). Los dispositivos de automatización industrial e IoT (como los paneles de control de fábricas inteligentes) utilizan la gestión térmica adaptativa del sustrato (tiempo de respuesta $<0,1\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) y la superficie micromecanizada por láser (optimización de la rugosidad) para mejorar la eficiencia de producción ($>20\% \pm 2\%$) y reducir los costes de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$). Con el desarrollo de la tecnología de ondas milimétricas 6G, los sustratos pueden afrontar aún más los retos de disipación térmica de las futuras comunicaciones de alta frecuencia y la electrónica de potencia mediante la optimización basada en IA y el diseño de microestructuras.

(3) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN)

de calor compuesto de carburo de tungsteno-nitruro de aluminio (WC- AlN) ?

de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN) es un material de alto rendimiento diseñado para la gestión térmica de equipos electrónicos y médicos de alta frecuencia. Se utiliza principalmente en dispositivos electrónicos de alta frecuencia (como módulos de radiofrecuencia, radares de microondas y equipos de comunicación por satélite), electrónica médica (como amplificadores de potencia de resonancia magnética y equipos ultrasónicos) y sensores industriales. Está hecho de un compuesto de WC y AlN (relación de volumen $50:50 \pm 1\%$) y se prepara mediante sinterización por prensado en frío ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) y recocido a alta temperatura ($1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, protección con nitrógeno) para garantizar la densidad del material (porosidad $<0,7\% \pm 0,1\%$) y la adaptación térmica. La conductividad térmica del sustrato es de $160\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$, y el aislamiento es $>10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$, espesor $0,4\text{-}0,6\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, coeficiente de expansión térmica adaptado al silicio ($4,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, desviación $<0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$).

El sustrato combina el alto aislamiento de AlN y la resistencia mecánica de WC (resistencia a la flexión $>400\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$), lo que lo hace adecuado para circuitos de alta frecuencia (frecuencia de operación $>20\text{ GHz} \pm 2\text{ GHz}$) y entornos de alta temperatura ($>250\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), y tiene una alta durabilidad mecánica ($>10^6\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$). La superficie está recubierta con Si_3N_4 (espesor $0,5\text{-}1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) para mejorar la resistencia a la humedad (resistencia a la humedad $>95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) y la resistencia al choque térmico ($>1000\text{ veces} \pm 100\text{ veces}$), y se utiliza la tecnología de oxidación por microarco para optimizar la resistencia de unión de la interfaz (resistencia de adhesión $>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). Al combinar un diseño de gradiente multicapa (contenido de AlN $40\%\text{-}60\% \pm 1\%$) y una capa de separación termoeléctrica (espesor $0,02\text{-}0,05\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$), el sustrato utiliza tecnología de dispersión de partículas a nanoescala (tamaño de partícula $<10\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$) para mejorar la uniformidad de la conductividad térmica ($<2\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y reducir el estrés térmico ($<10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$), satisfaciendo las necesidades de disipación de calor eficiente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rendimiento del sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN)

El sustrato tiene una alta conductividad térmica ($160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), un excelente aislamiento ($>10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$), una alta resistencia mecánica (resistencia a la flexión $>400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$) y adaptación térmica (desviación $<0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$). El revestimiento de Si_3N_4 mejora la resistencia a la humedad ($>95 \% \text{ RH} \pm 2 \% \text{ RH}$) y la resistencia al choque térmico ($>1000 \text{ veces} \pm 100 \text{ veces}$), la estructura de gradiente multicapa optimiza la uniformidad de la conductividad térmica ($<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$) y la capa de separación termoelectrica reduce la tensión térmica ($<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$). La tecnología de dispersión de partículas a nanoescala mejora la durabilidad ($>2 \times 10^6 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$), admite entornos de alta temperatura ($>250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) y aplicaciones de alta frecuencia ($>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$).

Sustratos de disipadores de calor compuestos de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN)

Sustrato estándar

Basado en WC- AlN 50:50 y recubrimiento Si_3N_4 , adecuado para módulos RF, espesor $0,4\text{-}0,6 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, conductividad térmica $160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Sustrato de alta temperatura

Capa de separación termoelectrica añadida ($0,02\text{-}0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), resistencia al calor $>250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, adecuada para amplificador de potencia de resonancia magnética.

Sustrato de alta frecuencia

Estructura de gradiente optimizada (AlN 40%-60% $\pm 1\%$), compatible con circuitos $>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$, con uniformidad $<2^{\circ}\text{C} \pm 0,2^{\circ}\text{C}$.

Sustratos nano-mejorados

Nanopartículas integradas (tamaño de partícula $<10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$), estrés térmico $<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, adecuadas para radar de microondas.

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN)

de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC- AlN) para disipación de calor se utilizan ampliamente en los sectores de la electrónica de alta frecuencia, la medicina y la aviación. En dispositivos electrónicos de alta frecuencia, el sustrato soporta circuitos de alta frecuencia ($>20 \text{ GHz} \pm 2 \text{ GHz}$) de módulos de RF, radares de microondas y equipos de comunicación por satélite. Con un alto aislamiento ($>10^{14} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{13} \Omega\cdot\text{cm}$) y una conductividad térmica ($160 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), cumple con los requisitos de disipación de calor de estaciones base y antenas de comunicación 5G/6G. En electrónica médica, los sustratos se utilizan en amplificadores de potencia de resonancia magnética y equipos ultrasónicos para optimizar la adaptación térmica (desviación $<0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$) y la resistencia a altas temperaturas ($>250^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$), y mejorar la precisión y confiabilidad del equipo (rendimiento $>98 \% \pm 1 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los sensores industriales, como los de temperatura y presión para fábricas inteligentes, se basan en la durabilidad mecánica ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y la resistencia al choque térmico (>1000 veces ± 100 veces) del sustrato para facilitar la automatización y el mantenimiento predictivo de la Industria 4.0 (reduciendo el tiempo de inactividad en $>15\% \pm 2\%$). La aviónica, como los sistemas de control de vuelo y los módulos de navegación, utiliza la ligereza (grosor de 0,4-0,6 mm $\pm 0,01$ mm) y la alta resistencia mecánica (>400 MPa ± 20 MPa) del sustrato para garantizar un uso prolongado en entornos extremos (estabilidad térmica >500 horas ± 50 horas). Los dispositivos médicos inteligentes, como los monitores de frecuencia cardíaca implantables y los dispositivos de ultrasonido portátiles, dependen de la resistencia a la humedad ($>95\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) y del diseño de gradiente del sustrato para optimizar la uniformidad de la disipación del calor ($<2^\circ\text{C} \pm 0,2^\circ\text{C}$) y reducir el estrés térmico (<10 MPa ± 1 MPa).

En el campo de la electrónica de consumo, los sustratos satisfacen las necesidades de disipación térmica de dispositivos informáticos de alto rendimiento y terminales de comunicación, y se adaptan a entornos de alta temperatura y alta frecuencia. La electrónica de defensa, como los sistemas de contramedidas electrónicas y los módulos de radar, utiliza la resistencia a la corrosión y la tecnología de nanomejora de los sustratos para cumplir con los requisitos de fiabilidad y durabilidad de grado militar ($>2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces). Con el desarrollo de radares de ondas milimétricas, aceleradores de redes neuronales y dispositivos biomédicos, los sustratos mejoran aún más la eficiencia de disipación térmica ($>20\% \pm 2\%$) y el rendimiento de la gestión térmica mediante la optimización de la IA y capas de separación termoeléctrica, lo que promueve el uso generalizado de aplicaciones de alta tecnología en el futuro.

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC-SiC)

de calor compuesto de carburo de tungsteno-carburo de silicio (WC- SiC) ?

El sustrato de disipación térmica compuesto de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC- SiC) es un material de gestión térmica de alto rendimiento diseñado para aplicaciones industriales y de alta potencia. Se utiliza principalmente en láseres de alta potencia, inversores electrónicos de potencia, sistemas de control de automatización industrial y equipos de tracción ferroviaria. Está hecho de un compuesto de WC y SiC (carburo de silicio, tamaño de partícula: 15-40 nm ± 1 nm, relación volumétrica: 65:35 $\pm 1\%$), preparado mediante difusión por prensado en caliente ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 60 MPa ± 2 MPa) para garantizar la densidad del material (porosidad $<0,9\% \pm 0,1\%$) y la estabilidad térmica. El sustrato tiene una conductividad térmica de 180 W/m·K ± 5 W/m·K, un coeficiente de expansión térmica de $4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, un espesor de 0,6-1,2 mm $\pm 0,01$ mm y una resistencia a la temperatura de $>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (ciclo de vida térmico >1000 horas ± 100 horas). El sustrato combina la alta conductividad térmica de SiC (>200 W/m·K) y la resistencia a la corrosión de WC (resistencia al ácido $<0,01$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año), lo que lo hace adecuado para dispositivos de alto voltaje (como 1000 V ± 50 V) y aplicaciones de alta densidad de potencia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

($>150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$), y tiene una alta resistencia mecánica (resistencia al impacto $>600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$). La superficie está recubierta con TiSiN (espesor $5-10 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia a la oxidación y la resistencia al desgaste (dureza HV 2500 ± 100), y la adhesión del recubrimiento ($> 60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) está optimizada por la tecnología de pulverización de plasma. Combinado con una estructura porosa (porosidad $1\%-3\% \pm 0,1\%$) y refuerzo de fibra de carbono (contenido $1\%-2\% \pm 0,1\%$), el sustrato aumenta el área de disipación de calor ($> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) y la resistencia al impacto ($> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), cumpliendo con los requisitos de alta confiabilidad.

Rendimiento del sustrato compuesto de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC- SiC) para disipación de calor

El sustrato presenta una alta conductividad térmica ($180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), un bajo coeficiente de expansión térmica ($4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), una alta resistencia mecánica (resistencia al impacto $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y una alta resistencia a la temperatura ($> 450 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, vida útil del ciclo térmico $> 1000 \text{ horas} \pm 100 \text{ horas}$). El recubrimiento de TiSiN mejora la resistencia a la oxidación y al desgaste (dureza HV 2500 ± 100) y presenta una excelente resistencia a la corrosión (resistencia a los ácidos $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$). La estructura porosa aumenta el área de disipación de calor ($>200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) y el refuerzo de fibra de carbono optimiza la resistencia al impacto ($>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$), lo que admite aplicaciones de alto voltaje ($1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$) y alta densidad de potencia ($>150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$).

Sustratos de disipadores de calor compuestos de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC- SiC)

Sustrato estándar

Basado en WC - SiC 65:35 y recubrimiento TiSiN , adecuado para máquinas de corte láser, espesor $0,6-1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, conductividad térmica $180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$.

Sustrato de alta temperatura

Ciclo de vida térmico optimizado ($>1000 \text{ horas} \pm 100 \text{ horas}$), resistencia al calor $>450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, adecuado para inversores electrónicos de potencia.

Sustrato poroso

Estructura porosa integrada (porosidad $1\%-3\% \pm 0,1\%$), área de disipación de calor $>200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$, adecuada para convertidores de energía eólica.

Sustrato mejorado

Con la adición de fibra de carbono ($1\%-2\% \pm 0,1\%$), la resistencia al impacto es $>500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, lo que es adecuado para robots industriales.

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC- SiC)

de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC- SiC) para disipación de calor se utilizan

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ampliamente en los sectores industrial y energético de alta potencia. En láseres de alta potencia, estos sustratos ofrecen una alta densidad de potencia ($>150 \text{ W/cm}^2 \pm 15 \text{ W/cm}^2$) y resistencia a altas temperaturas ($>450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) en máquinas de corte láser y equipos de soldadura, lo que mejora la eficiencia del procesamiento y la vida útil del equipo. En inversores electrónicos de potencia, estos sustratos se utilizan en convertidores de energía eólica y solar para optimizar la conductividad térmica ($180 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y la resistencia a la corrosión (resistencia a los ácidos $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), cumpliendo con los requisitos de alta tensión ($1000 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$).

Los sistemas de control de automatización industrial dependen de la resistencia mecánica (resistencia al impacto $> 600 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la estructura porosa (área de disipación de calor $> 200 \text{ cm}^2 \pm 10 \text{ cm}^2$) del sustrato para soportar el funcionamiento estable de robots industriales y equipos de fabricación inteligente. El equipo de tracción ferroviaria utiliza la vida útil del ciclo térmico ($> 1000 \text{ horas} \pm 100 \text{ horas}$) y el refuerzo de fibra de carbono (resistencia al impacto $> 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) del sustrato para garantizar una alta confiabilidad (rendimiento $> 98\% \pm 1\%$) de los inversores de tracción de alto voltaje y los módulos de control. La electrónica aeroespacial, como los sistemas de control de vuelo y la electrónica de defensa (como los módulos de potencia de radar), dependen de la resistencia a altas temperaturas y a la oxidación (dureza HV 2500 ± 100) del sustrato para cumplir con el uso a largo plazo en entornos extremos.

En el campo de las energías renovables, los sustratos favorecen la disipación térmica eficiente de las pilas de carga de vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía, y se adaptan a los requisitos de alta densidad de potencia y estabilidad térmica. La electrónica de consumo, como servidores de alto rendimiento y sensores industriales, utiliza el sustrato ligero (espesor: $0,6\text{-}1,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y el recubrimiento de TiSiN para optimizar la eficiencia de producción (aumento $> 20\% \pm 2\%$) y reducir los costes de mantenimiento ($< 5\% \pm 1\%$). Con el desarrollo de la Industria 4.0 y las energías renovables, los sustratos satisfacen aún más las necesidades de la electrónica industrial y los equipos de energías renovables de alta fiabilidad del futuro mediante el diseño multicapa y la optimización con IA.

(5) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN)

¿Qué es el sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN) ?

El sustrato compuesto de carburo de tungsteno-nitruro de boro (WC-BN) para disipación de calor es un material de alto rendimiento diseñado para la gestión térmica de instrumentos de alta precisión y electrónica de defensa. Se utiliza principalmente en instrumentos de alta precisión (como módulos de potencia para litografía y equipos de grabado por haz de electrones), electrónica de defensa (como procesadores de señales de radar y sistemas de guiado de misiles) y equipos de investigación científica. Está compuesto de WC y BN (nitruro de boro, tamaño de partícula: $10\text{-}30 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, relación volumétrica: $55:45 \pm 1\%$) y se prepara mediante prensado isostático (HIP, $1250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

160 MPa $\pm$ 5 MPa) para garantizar la densidad del material (porosidad $<0,5\% \pm 0,1\%$) y la estabilidad térmica. La conductividad térmica del sustrato es de 200 W/m·K $\pm$ 10 W/m·K y el aislamiento es $>10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$, espesor 0,3-0,5 mm $\pm$ 0,01 mm, coeficiente de expansión térmica $4,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). El sustrato combina el aislamiento ultraalto de BN y la resistencia mecánica de WC, adecuado para aplicaciones de frecuencia ultraalta ($> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$) y entornos extremos (de $-50 ^\circ\text{C}$ a $300 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, estabilidad térmica $> 600 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$). La superficie está recubierta con AlN (espesor $1-2 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$) para mejorar la resistencia a la humedad (resistencia a la humedad $> 98\% \text{ HR} \pm 1\% \text{ HR}$) y la estabilidad térmica. La resistencia de la unión de la interfaz se optimiza mediante tratamiento superficial láser (resistencia de adhesión $> 55 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$). Al combinar un compuesto de gradiente multicapa (contenido de BN $40\%-60\% \pm 1\%$) y una capa de aislamiento termoelectrónico (espesor 0,01-0,03 mm $\pm$ 0,001 mm), el sustrato optimiza la uniformidad de la conductividad térmica ($< 1,5 ^\circ\text{C} \pm 0,2 ^\circ\text{C}$) y reduce la interferencia electromagnética ($< 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$) mediante tecnología de dispersión a escala nanométrica para cumplir con los requisitos de precisión ultraalta y entornos extremos.

Rendimiento de disipación de calor del sustrato compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN)

El sustrato tiene una alta conductividad térmica (200 W/m·K $\pm$ 10 W/m·K), un excelente aislamiento ($> 10^{15} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$), una alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y un bajo coeficiente de expansión térmica ($4,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). El revestimiento de AlN mejora la resistencia a la humedad ($> 98\% \text{ HR} \pm 1\% \text{ HR}$) y la estabilidad térmica ($> 600 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$), la estructura de gradiente multicapa optimiza la uniformidad de la conductividad térmica ($< 1,5 ^\circ\text{C} \pm 0,2 ^\circ\text{C}$) y la capa de aislamiento térmico reduce la interferencia electromagnética ($< 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$). La tecnología de dispersión a nanoescala mejora la durabilidad ($> 2 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces), admite una frecuencia ultra alta ($> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$) y un rango de temperatura extremo ($-50 ^\circ\text{C}$ a $300 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$).

Tipos de sustratos compuestos de disipación de calor de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN)

Sustrato estándar

Basado en WC-BN 55:45 y recubrimiento de AlN, es adecuado para módulos de potencia litográfica con un espesor de 0,3-0,5 mm $\pm$ 0,01 mm y una conductividad térmica de 200 W/m·K $\pm$ 10 W/m·K.

Sustrato de alta temperatura

Estabilidad térmica optimizada ($> 600 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$), resistencia al calor $> 300 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, adecuado para equipos de grabado por haz de electrones.

Sustrato de alta frecuencia

Capa de aislamiento térmico y eléctrico integrada (0,01-0,03 mm $\pm$ 0,001 mm), compatible con aplicaciones $> 50 \text{ GHz} \pm 5 \text{ GHz}$ y EMI $< 0,1 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Sustratos nano-mejorados

Con la adición de dispersión a escala nanométrica (tamaño de partícula $<10\text{ nm} \pm 0,5\text{ nm}$), la uniformidad de conductividad térmica es $<1,5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que es adecuado para sistemas de guía de misiles.

Aplicación de sustrato compuesto de disipación de calor de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN)

Los sustratos compuestos de carburo de tungsteno-nitruro de boro (WC-BN) para disipación de calor se utilizan ampliamente en instrumentos de alta precisión, electrónica de defensa e investigación científica. En equipos de fabricación de semiconductores, este sustrato soporta los módulos de potencia de equipos de litografía UVE y grabado por haz de electrones. Con un aislamiento ultraalto ($>10^{15}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$) y una conductividad térmica ($200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$), cumple con los requisitos de ultraalta precisión de ancho de línea $<2\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$. En electrónica de defensa, el sustrato se utiliza en procesadores de señales de radar y sistemas de guía de misiles, optimizando el rendimiento de frecuencia ultra alta ($>50\text{ GHz} \pm 5\text{ GHz}$) y la resistencia mecánica ($>3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$), adaptándose a rangos de temperatura extremos ($-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y la estabilidad térmica ($>600\text{ horas} \pm 50\text{ horas}$).

Equipos de investigación científica como dispositivos experimentales de física de alta energía y módulos de computación cuántica dependen del sustrato ligero (espesor $0.3\text{--}0.5\text{ mm} \pm 0.01\text{ mm}$) y capa de aislamiento térmico para reducir la interferencia electromagnética ($<0.1\text{ dB} \pm 0.01\text{ dB}$) y mejorar la uniformidad de disipación de calor ($<1.5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$). Equipos de aviónica como sistemas de control de vuelo y módulos de comunicación por satélite utilizan la resistencia a la humedad del sustrato ($>98\%\text{ HR} \pm 1\%\text{ HR}$) y resistencia a la corrosión para cumplir con la confiabilidad y durabilidad de grado aeroespacial ($>2 \times 10^6\text{ veces} \pm 10^4\text{ veces}$). Equipos médicos inteligentes como MRI de alta precisión y sistemas de imágenes ultrasónicas dependen de la adaptación térmica del sustrato y alta resistencia mecánica para soportar la biocompatibilidad y operación estable en entornos de alta temperatura.

Los sistemas de control de automatización industrial y las estaciones base de comunicación utilizan el diseño de gradientes y la tecnología de nanomejora de sustratos para optimizar la eficiencia de producción (incremento $>20\% \pm 2\%$) y reducir los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$). Con la mejora de la precisión litográfica y la miniaturización de la electrónica de defensa, los sustratos pueden satisfacer aún más las necesidades de los futuros instrumentos de ultraalta precisión y equipos electrónicos para entornos extremos mediante la optimización impulsada por IA y estructuras multicapa, lo que impulsa el rápido desarrollo de las tecnologías de semiconductores y defensa.

Tendencia de desarrollo y perspectivas de mercado de los sustratos de disipación de calor basados en carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El uso de estos sustratos continúa creciendo debido a la integración de alta densidad de dispositivos electrónicos ($>10^6$ transistores/mm² $\pm 10^5$ transistores/mm²), mayor densidad de potencia (>100 W/cm² ± 10 W/cm²) y mayor temperatura de funcionamiento ($>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), especialmente en los campos de las comunicaciones de próxima generación (6G), vehículos de nueva energía (sistemas de gestión de baterías, módulos de carga rápida), chips de inteligencia artificial, automatización industrial, electrónica de defensa y equipos médicos inteligentes. La iteración tecnológica de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado se está acelerando, con la adición de procesos de fabricación avanzados (como dispersión de nanopartículas, micromaquinado láser, impresión 3D) y tratamientos de superficie (como recubrimiento CVD, pulverización de plasma, deposición ALD), mejorando la conductividad térmica (>300 W/m·K ± 10 W/m·K), el aislamiento ($>10^{15}$ $\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{14}$ $\Omega\cdot\text{cm}$), la resistencia mecánica (>4000 MPa ± 100 MPa) y la durabilidad ($>10^7$ veces $\pm 10^5$ veces). Se espera que el tamaño del mercado alcance los 3000 millones de dólares ± 300 millones, con una tasa de crecimiento anual del 20%-25%, especialmente en la carga rápida de vehículos eléctricos (>350 kW ± 10 kW), el radar de ondas milimétricas, los equipos de computación cuántica y la electrónica biomédica. En el futuro, los sustratos se desarrollarán hacia la inteligencia y la sostenibilidad, integrando sensores térmicos para monitorear la temperatura (precisión $<0,1^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$), una estructura de disipación de calor adaptativa (resistencia térmica $<0,1^\circ\text{C/W} \pm 0,01^\circ\text{C/W}$) y un diseño reciclable (contenido de metales pesados $<0,5\% \pm 0,1\%$) para satisfacer los múltiples desafíos de la industria electrónica en cuanto a disipación de calor eficiente, alta confiabilidad y requisitos de protección ambiental. Al mismo tiempo, los ajustes de la cadena de suministro global y la producción regional (como China Oriental, Alemania en Europa y Silicon Valley en Estados Unidos) promoverán aún más la optimización del diseño de la industria de sustratos y la cooperación internacional.

Esta sección parte de dos aspectos: moldes de carburo cementado y sustratos de disipación térmica, y optimización de la conductividad del carburo cementado. Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales y tendencias del sector, analiza en profundidad sus características de rendimiento y las vías de mejora, proporcionando una base teórica y práctica integral para aplicaciones emergentes.

14.1.3 Tecnología, principios y mejoras de las matrices de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

Tecnología y aplicación de moldes de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

Las matrices y disipadores de calor de carburo cementado desempeñan un papel fundamental en la industria electrónica, facilitando la fabricación de precisión y la gestión térmica eficiente, respectivamente. Las matrices de carburo cementado se utilizan ampliamente en el empaquetado de chips, el estampado de microconectores, el mecanizado de precisión a nivel de semiconductores, el punzonado de circuitos impresos y en campos emergentes como la electrónica flexible y los sistemas microelectromecánicos (MEMS). Estas matrices requieren una alta precisión dimensional ($<0,01$ mm $\pm 0,001$ mm), una excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05$ mm³ / N·m $\pm 0,01$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), una excelente resistencia a la fatiga (vida útil a la fatiga $>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y una gran estabilidad a altas temperaturas (resistencia a la temperatura $>800^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).

Los sustratos de disipación de calor son compatibles con dispositivos electrónicos de alta potencia, como semiconductores de potencia (como IGBT y MOSFET), diodos láser, módulos de comunicación 5G/6G, inversores para vehículos eléctricos y chips de inteligencia artificial. Deben lograr una gestión térmica eficiente (eficiencia de disipación $>90\% \pm 2\%$), baja resistencia térmica ($<0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$) y un excelente aislamiento (resistividad volumétrica $>10^{12} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ para garantizar que el dispositivo pueda operar a alta densidad de potencia ($>100 \text{ W}/\text{cm}^2 \pm 10 \text{ W}/\text{cm}^2$) y un funcionamiento estable en entornos de alta temperatura ($>150^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Materiales y propiedades de moldes de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

El material del núcleo de los moldes de carburo cementado y los sustratos de disipación térmica se basa en el sistema WC-Co, con un contenido de cobalto (Co) que oscila entre el 6 % y el 10 % $\pm 1\%$. El tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado se controla estrictamente entre $0,5$ y $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. Para mejorar la conductividad térmica ($>100 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$), se dopa la matriz con cobre (Cu, 1%-5% $\pm 0,5\%$) o níquel (Ni, 2%-8% $\pm 0,5\%$). Además, se añade carburo de titanio (TiC, 2%-5% $\pm 0,5\%$) o carburo de tántalo (TaC, 1%-3% $\pm 0,5\%$) para mejorar la estabilidad a altas temperaturas ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y la resistencia al choque térmico ($>10^4$ veces $\pm 10^3$ veces).

Proceso de fabricación y tratamiento superficial de moldes de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

El proceso de fabricación utiliza tecnología avanzada de sinterización. La sinterización por plasma de chispa (SPS) a $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ y $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ logra una sinterización rápida y la optimización de la microestructura, mientras que el prensado isostático en caliente (HIP) a $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ y $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ garantiza la homogeneidad y densidad del material (porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$). La superficie se mejora aún más mediante un recubrimiento por deposición física de vapor (PVD) (como TiN). CrN o AlTiN, espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar aún más la resistencia al desgaste (dureza hasta HV 2000 ± 50), la resistencia a la oxidación (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm}/\text{año} \pm 0,001 \text{ mm}/\text{año}$) y la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,2 \pm 0,02$). El calentamiento rápido de SPS ($<10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$) y la presión uniforme de HIP pueden minimizar los microporos (tamaño de poro $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la separación de fases y los defectos en los límites de grano, y mejorar las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), la conductividad térmica ($>120 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$) y la vida útil ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces).

La tecnología de pulido químico mecánico (CMP) se utiliza en algunos sustratos para optimizar la rugosidad de la superficie ($R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) y mejorar la eficiencia del contacto térmico con los componentes electrónicos (resistencia térmica de contacto $<0,05 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normas internacionales para moldes de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

La evaluación del rendimiento de los moldes y disipadores de calor de carburo cementado sigue una serie de estándares internacionales para garantizar su aplicación confiable en la industria electrónica. La dureza se prueba según ASTM E92 (precisión ± 30 HV), la tasa de desgaste se mide según ASTM G65 (precisión $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), la conductividad térmica se evalúa según ASTM E1461 (precisión $\pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$), la vida útil se verifica mediante pruebas de ciclo en sitio (precisión $\pm 10^4$ veces), el coeficiente de expansión térmica se mide según ASTM E228 (precisión $\pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$), el aislamiento eléctrico se prueba según IEC 60167 (precisión $\pm 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$). Por ejemplo, la fórmula WC-8Co-2Cu tiene una dureza de HV 1800 ± 30 , una conductividad térmica de $120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, un coeficiente de expansión térmica de $5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$, una vida útil del molde de aproximadamente 10^6 veces $\pm 10^5$ veces y una eficiencia de disipación de calor del $92 \% \pm 2 \%$, que es significativamente mejor que la fórmula tradicional WC-10Co (conductividad térmica $100 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, eficiencia $88 \% \pm 2 \%$). Su mejora del rendimiento se debe a la red térmica formada por el dopaje de Cu y al efecto de fortalecimiento de la difusión del TiC. Con la demanda de miniaturización y alta potencia de los dispositivos electrónicos, se ha introducido la norma ISO 13485 (Sistema de gestión de calidad para dispositivos médicos) en la producción de algunos sustratos de disipación de calor para garantizar la biocompatibilidad y la confiabilidad, especialmente en aplicaciones de equipos médicos inteligentes.

Mecanismo de rendimiento central del molde de carburo cementado y sustrato de disipación de calor

Mecanismo de rendimiento y función de la estructura compuesta multifásica de carburo cementado

Las propiedades del carburo cementado se derivan de su estructura compuesta multifásica, en la que el WC (contenido $>90\% \pm 1\%$) como fase dura proporciona alta dureza (HV 1800 ± 30) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$). El tamaño de grano ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la resistencia (resistencia a la tracción $>1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la resistencia al desgaste mediante el efecto Hall-Petch, lo que reduce la degradación del rendimiento causada por la difusión del límite de grano. El contenido de Co ($6\%-10\% \pm 1\%$) actúa como una fase aglutinante para mejorar la tenacidad (tenacidad a la fractura $K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y la resistencia a la fisuración (velocidad de crecimiento de la fisuración $<0,01 \text{ mm/ciclo} \pm 0,001 \text{ mm/ciclo}$), absorbiendo energía mediante deformación plástica. El dopaje Cu/Ni (fracción volumétrica $2\%-8\% \pm 0,5\%$) forma una red eléctrica y térmicamente conductora, aumentando la conductividad térmica en aproximadamente un $20\% \pm 3\%$ (de $100 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$ a $120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$). El dopaje con TiC ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) mejora la dureza a alta temperatura ($>HV 1900 \pm 30$ a $600 ^\circ \text{C} \pm 20 ^\circ \text{C}$) y la resistencia a la fatiga térmica ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) mediante el reforzamiento por dispersión. El análisis por microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra que la superficie de desgaste del molde WC-8Co-2Cu es lisa (rugosidad Ra $<0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la espectroscopia de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

energía dispersiva (EDS) confirma que el Cu se distribuye uniformemente (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$), y la difracción de rayos X (XRD) detecta la distribución dispersa de la fase TiC (espaciado de grano $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), lo que mejora la estabilidad del material a alta temperatura.

En teoría, la baja resistividad de Cu/Ni ($<2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) reduce la resistencia térmica a través de la dispersión electrón-fonón, y las características de baja expansión térmica del sistema WC-Co ($<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) garantizan la integridad estructural durante los ciclos térmicos (tasa de deformación $<0,01\% \pm 0,001\%$). El recubrimiento PVD mejora el índice de resistencia a la corrosión a $>90\% \pm 2\%$ al formar una capa protectora densa (espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, densidad $>98\% \pm 1\%$), extendiendo significativamente la vida útil ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) y al reducir la energía superficial ($<40 \text{ mJ} / \text{m}^2 \pm 5 \text{ mJ} / \text{m}^2$) para reducir la adherencia.

Mecanismo de gestión térmica del sustrato de disipación de calor y su sinergia de materiales

El mecanismo de gestión térmica del sustrato del disipador de calor se basa en el efecto sinérgico de los materiales compuestos multifásicos. El WC actúa como esqueleto para proporcionar soporte mecánico y resistencia a altas temperaturas ($>1000 ^\circ\text{C} \pm 50 ^\circ\text{C}$), la fase de Cu actúa como red conductora térmica para transferir rápidamente el calor (coeficiente de difusión térmica $>50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$), y la fase de AlN o diamante mejora aún más la conductividad térmica local y el aislamiento ($>10^{13} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$). La reducción en la resistencia térmica ($<0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$) se debe a la optimización de la interfaz (p. ej., la resistencia de contacto térmico de la interfaz Cu-WC es $<0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,001 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$) y la reducción de microporos ($<0,05\% \pm 0,01\%$). El análisis de imágenes térmicas infrarrojas muestra que el sustrato compuesto WC-Cu tiene una baja conductividad térmica a $50 \text{ W}/\text{cm}^2$. A una densidad de potencia de $\pm 5 \text{ W}/\text{cm}^2$, la uniformidad de la temperatura de la superficie es $<5 ^\circ\text{C} \pm 0,5 ^\circ\text{C}$ y la eficiencia de disipación de calor es del $92\% \pm 2\%$, lo que es mejor que el sustrato tradicional de Al_2O_3 (eficiencia del $80\% \pm 2\%$). Además, la adaptación de la expansión térmica ($<0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) reduce la tensión térmica ($<10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) con el chip de Si (coeficiente de expansión térmica $3,5-4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), mejorando la fiabilidad a largo plazo ($>10^5$ horas $\pm 10^4$ horas).

Principales factores que afectan el rendimiento de los moldes de carburo cementado y los sustratos de disipación de calor

Efecto del contenido de Cu/Ni en el carburo cementado sobre las propiedades

El contenido de Cu/Ni ($1\%-5\% \pm 0,5\%$) mejora la conductividad térmica y eléctrica (conductividad térmica $>120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, conductividad eléctrica $>10^6 \text{ S}/\text{m} \pm 10^5 \text{ S}/\text{m}$) al formar una red eléctrica y térmicamente conductora, pero un contenido $>10\% \pm 0,5\%$ conduce a una disminución de la dureza en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (de HV 1800 ± 30 a HV 1600 ± 30) y un aumento en el coeficiente de expansión térmica ($>7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), lo que afecta la precisión del molde (desviación $>0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) y la estabilidad del ciclo térmico del sustrato de disipación de calor. (tasa de deformación $>0,02\% \pm 0,002\%$). Optimizar la relación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(como WC-8Co-2Cu) puede mejorar la conductividad térmica en un $20\% \pm 3\%$, manteniendo la dureza ($HV 1800 \pm 30$).

Control del tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado en el rendimiento

El tamaño de grano ($0,5-1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$) garantiza la resistencia al desgaste y la conductividad térmica a través del efecto Hall-Petch (tasa de desgaste $< 0,05\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, conductividad térmica $> 120\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$), pero $> 2\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$ aumentará la tasa de desgaste en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (a $0,055\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y la conductividad térmica disminuirá en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (a $114\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$) debido al aumento de la dispersión del límite de grano y a los caminos de conducción de calor acortados. Se obtuvieron granos a escala nanométrica (por ejemplo, $0,2-0,5\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$) a través de procesos de molienda de bolas y SPS, mejorando aún más la dureza ($> HV 1900 \pm 30$) y la durabilidad ($> 1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces), adecuados para el mecanizado de ultraprecisión.

El efecto equilibrador del contenido de Co en el carburo cementado sobre el rendimiento

El contenido de Co ($6\%-10\% \pm 1\%$) equilibra la tenacidad y la dureza (dureza $HV 1800 \pm 30$, tenacidad $K_{IC} 12\ \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), $< 6\% \pm 1\%$ aumenta la tasa de grietas en aproximadamente $10\% \pm 2\%$ (longitud de grieta $> 0,05\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$), $> 12\% \pm 1\%$ reduce la dureza en aproximadamente $5\% \pm 1\%$ (a $HV 1700 \pm 30$) y la conductividad térmica en aproximadamente $3\% \pm 1\%$ (a $116\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$). La optimización del contenido de Co (por ejemplo, $8\% \pm 0,5\%$) da como resultado una porosidad de $< 0,05\% \pm 0,01\%$ en el proceso SPS, lo que garantiza una alta confiabilidad de los moldes y sustratos.

Optimización del efecto del proceso de sinterización de carburo cementado sobre el rendimiento

La porosidad del carburo cementado SPS es $< 0,1\% \pm 0,01\%$ (tiempo de sinterización $< 5\ \text{min} \pm 0,5\ \text{min}$), y el HIP la reduce aún más a $< 0,05\% \pm 0,01\%$ (uniformidad de presión $> 95\% \pm 2\%$). La conductividad térmica de la sinterización convencional (compactación + sinterización a alta temperatura, $1500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) se reduce en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (a $108\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$) debido al aumento de la porosidad ($> 0,2\% \pm 0,02\%$) y la falta de homogeneidad de fases (aglomeración de WC $> 5\% \pm 1\%$). El proceso compuesto de SPS combinado con HIP puede aumentar la conductividad térmica a $125\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5\ \text{W} / \text{m} \cdot \text{K}$, lo que es adecuado para sustratos de disipación de calor de alto rendimiento.

La influencia de las condiciones de carga del carburo cementado en la estabilidad de su rendimiento.

Rendimiento estable en condiciones de carga $100-1000\ \text{N} \pm 10\ \text{N}$ (tasa de desgaste $< 0,05\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\ \text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, deformación $< 0,01\% \pm 0,001\%$), $> 5000\ \text{N} \pm 10\ \text{N}$ provoca un aumento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

del desgaste de aprox. $15 \% \pm 3 \%$ (hasta $0,057 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) e inicia microfisuras (longitud $> 0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), $>10000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ puede provocar el colapso del material (tasa de fractura $> 5 \% \pm 1 \%$). Por ejemplo, WC-10Co (sin dopaje de Cu) tiene una conductividad térmica de solo $100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ y un coeficiente de expansión térmica de $6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ bajo una carga de $5000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, mientras que WC-8Co-2Cu permanece estable bajo las mismas condiciones (conductividad térmica $120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, coeficiente de expansión térmica $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

La influencia de los factores ambientales en la vida útil del carburo cementado y su protección.

La humedad ambiental ($>90 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$), la temperatura ($>200 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$) y los medios corrosivos (como una solución de HCl) aceleran la degradación del material. El recubrimiento PVD puede prolongar la vida útil hasta $>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, mientras que la vida útil de los sustratos tradicionales sin recubrimiento se reduce a $<5 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces. En 2025, la fabricación ecológica exige la reducción del uso de Co ($<5 \% \pm 0,5 \%$) y promueve la investigación sobre la sustitución de Ni o Cr para cumplir con las normativas ambientales (como las normas RoHS).

Dirección de optimización y mejora del rendimiento del molde de carburo y del sustrato de disipación de calor

Estrategia de optimización del material de carburo cementado y ajuste de la formulación

La optimización del rendimiento comienza con un ajuste preciso de la formulación del material. El contenido de Co se controla en $6\%-10\% \pm 1\%$ para proporcionar tenacidad (tenacidad a la fractura $K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia al agrietamiento (tasa de crecimiento de grietas $<0,01 \text{ mm/ciclo} \pm 0,001 \text{ mm/ciclo}$) como fase aglutinante, la cantidad de dopaje de Cu se establece en $1\%-5\% \pm 0,5\%$ para formar una red conductora térmica (conductividad térmica aumentada a $>120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), y la cantidad de dopaje de TiC es $2\%-5\% \pm 0,5\%$ para mejorar la dureza a alta temperatura ($>\text{HV } 1900 \pm 30$ a $600 ^\circ\text{C} \pm 20 ^\circ\text{C}$) y la resistencia a la fatiga térmica ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) a través del fortalecimiento por dispersión. Se introdujeron carburo de vanadio (VC, $0,2 \% \pm 0,01 \%$) y TaC ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) como inhibidores del crecimiento del grano para mantener el tamaño del grano en $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y optimizar el efecto Hall-Petch para mejorar la resistencia ($>1500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la resistencia al desgaste (tasa de desgaste de hasta $0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$).

se pueden explorar fases de refuerzo a escala nanométrica (como nanopolvo WC, tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, contenido $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$) para reducir los defectos en los límites de grano ($<0,01\% \pm 0,001\%$) a través de una dispersión uniforme, mejorar la conductividad térmica ($>130 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y la eficiencia de disipación de calor ($>94\% \pm 2\%$). En 2025, a medida que los requisitos de protección ambiental se vuelven más estrictos, algunas formulaciones intentarán reemplazar parte de Co con Ni o Cr (proporción de reemplazo $<20\% \pm 2\%$) para reducir el contenido de metales pesados ($<0,5\% \pm 0,1\%$), cumplir con los estándares RoHS y REACH,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

manteniendo al mismo tiempo las propiedades mecánicas (dureza HV 1800 ± 30 , tenacidad K_{IC} $12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Mejora e innovación tecnológica del proceso de fabricación de carburo cementado

La optimización del proceso de fabricación es clave para mejorar el rendimiento del carburo cementado. La sinterización por plasma de chispa (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) combinada con el prensado isostático en caliente (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) puede optimizar significativamente la microestructura. El SPS reduce la porosidad ($<0,1\% \pm 0,01\%$) y la separación de fases (aglomeración en agua $<2\% \pm 0,5\%$) mediante calentamiento rápido ($<10 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$) y sinterización a alta presión. El HIP reduce aún más los microporos (diámetro de poro $<0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y mejora la densidad ($>99\% \pm 0,5\%$) mediante una presión uniforme ($>95\% \pm 2\%$). Para eliminar los óxidos y las impurezas de la superficie, se introdujo la tecnología de limpieza de plasma (potencia $500 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$, tiempo $5-10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$), que redujo eficazmente el espesor de la capa de óxido ($<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) y mejoró la adhesión de los recubrimientos posteriores ($>60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).

Además, la sinterización por microondas ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) se puede explorar como una alternativa de baja energía para acortar el tiempo de sinterización ($<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) y mejorar la uniformidad de distribución de la fase conductora térmica (como Cu) (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$), y la conductividad térmica puede alcanzar $125 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$. En 2025, la tecnología de fabricación aditiva (como la fusión selectiva por láser SLM, espesor de capa $20-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) comenzó a aplicarse a la producción de moldes y sustratos de estructura compleja, integrando microcanales (diámetro $0,02-0,05 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) o redes de disipación de calor en forma de panal, mejorando significativamente la eficiencia de disipación de calor ($>95\% \pm 2\%$) y la estabilidad del ciclo térmico ($>6000 \text{ veces} \pm 500 \text{ veces}$).

Optimización y mejora de la función del tratamiento superficial de carburo cementado

La optimización del tratamiento superficial afecta directamente la durabilidad y la disipación térmica del carburo cementado. La tecnología de pulido de precisión (como el pulido químico-mecánico CMP) controla la rugosidad superficial a $R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, reduce la resistencia térmica de contacto ($<0,05 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$) y mejora la eficiencia de adhesión con componentes electrónicos ($>98\% \pm 1\%$). La aplicación de un revestimiento PVD multicapa (como TiN / CrN o AlTiN, espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, utilizando tecnología de recubrimiento iónico de arco múltiple) puede mejorar la resistencia al desgaste en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (tasa de desgaste reducida a $0,027 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), la resistencia a la corrosión (prueba de niebla salina $>600 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$) y la estabilidad a alta temperatura ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) se mejoran en aproximadamente un $15\% \pm 2\%$, y la tasa de oxidación ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) se reduce al formar una capa protectora densa (densidad $>98\% \pm 1\%$).

Para hacer frente a entornos complejos, se pueden introducir recubrimientos nanocompuestos (como

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiN / Al₂O₃ , espesor 10-20 $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$) o recubrimientos autorreparadores (que contienen microcápsulas, tasa de reparación $>90\% \pm 2\%$) para reparar automáticamente la superficie cuando se produce desgaste o grietas (profundidad de reparación $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), lo que extiende la vida útil a $>1,5 \times 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces. En 2025, se utilizó tecnología de funcionalización de superficies (como microtexturizado láser , rugosidad Ra 0,05-0,1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para mejorar la hidrofiliidad (ángulo de contacto $<30^\circ \pm 5^\circ$) y la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,15 \pm 0,02$) de los sustratos de disipación de calor y optimizar el rendimiento de gestión térmica de dispositivos de alta potencia (como HEMT de GaN).

Método de prueba y verificación del rendimiento del carburo cementado y análisis de resultados

La optimización del rendimiento debe verificarse mediante pruebas estandarizadas y métodos analíticos avanzados. La dureza se prueba según la norma ASTM E92 (precisión $\pm 30 \text{ HV}$), la conductividad térmica se mide según la norma ASTM E1461 (precisión $\pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$), el coeficiente de expansión térmica se evalúa según la norma ASTM E228 (precisión $\pm 0,5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$), complementado con una prueba de ciclo térmico ($500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, 1000 veces ± 50 veces) para verificar la durabilidad y la estabilidad térmica (tasa de deformación $<0,01\% \pm 0,001\%$), y el análisis de difracción de rayos X (DRX) de la estabilidad de fase (pureza de la fase cristalina $>95\% \pm 2\%$).

Verificación: La morfología, distribución de la composición y características del límite de grano se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) , espectroscopia de energía dispersiva (EDS, desviación de la composición $<0,1\% \pm 0,02\%$) y microscopía electrónica de transmisión (TEM, resolución del límite de grano $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) . Por ejemplo, la tasa de desgaste de la formulación WC-8Co-2Cu-3TiC (tamaño de grano 0,5 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) es $0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, conductividad térmica $125 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, eficiencia de disipación de calor $93\% \pm 2\%$, mejor que el WC-10Co tradicional (tasa de desgaste $0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$, conductividad térmica $100 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$). Las futuras direcciones de investigación incluyen el refuerzo de nanopartículas (como nanopulvo WC , tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, contenido $1\% \pm 0,1\%$) para reducir aún más la tasa de desgaste ($<0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y la conductividad térmica mejorada ($>140 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$), así como el desarrollo de recubrimientos inteligentes (por ejemplo, recubrimientos autorreparadores con nanosensores , tiempo de respuesta $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) para hacer frente a mayores densidades de potencia ($>200 \text{ W/cm}^2 \pm 20 \text{ W/cm}^2$) y entornos complejos (como alta humedad $>95\% \text{RH} \pm 2\% \text{RH}$).

Dirección y tendencia de desarrollo futuro de la tecnología de moldes de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

En 2025, la optimización de moldes de carburo cementado y sustratos de disipación térmica se centrará en la integración multifuncional y la inteligencia. La introducción de materiales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

termoeléctricos (como Bi_2Te_3 , con un contenido de $0,5\% - 1\% \pm 0,1\%$) permite la autoalimentación (tensión de salida $> 0,1\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$), sensores integrados (precisión $< 0,1\text{ }^\circ\text{C} \pm 0,01\text{ }^\circ\text{C}$) que monitorizan la temperatura y la tensión ($< 10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) en tiempo real y optimizan la trayectoria del flujo térmico mediante un algoritmo de IA (resistencia térmica $< 0,05\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,005\text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$). En términos de sostenibilidad, se adopta una fórmula reciclable (contenido de metales pesados $< 0,5\% \pm 0,1\%$) y un proceso bajo en carbono (reducción del consumo energético $> 10\% \pm 2\%$) para cumplir con los requisitos de protección ambiental y control de costos en la industria electrónica. Estas innovaciones impulsarán la aplicación generalizada del carburo cementado en las comunicaciones 6G, la computación cuántica y los dispositivos médicos inteligentes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



14.1.2 Optimización de la conductividad eléctrica del carburo cementado

Principios básicos y descripción técnica de la conductividad eléctrica del carburo cementado

La optimización de la conductividad del carburo cementado busca satisfacer las necesidades de sustratos de disipación de calor, materiales de electrodos y componentes de blindaje electromagnético para baja resistividad ($<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y alta conductividad, y es adecuada para módulos de comunicación 5G/6G, chips de inteligencia artificial y electrónica para vehículos de nueva energía. La optimización de la conductividad reduce la resistividad mediante el dopaje de Cu ($1\% - 5\% \pm 0,5\%$), Ni ($2\% - 8\% \pm 0,5\%$) o grafito ($0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$). El sustrato es un sistema WC-Co (contenido de Co $6\% - 10\% \pm 1\%$), y el tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado se controla a $0,5 - 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para reducir la dispersión del límite de grano.

El proceso de fabricación utiliza sinterización por prensado en caliente ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) o tecnología de sinterización asistida por campo (FAST, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para garantizar la distribución uniforme de las fases conductoras (como Cu) (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$) y la densidad microestructural (porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$). La optimización de la conductividad se basa en la contribución de electrones libres de la fase metálica (concentración de electrones $> 10^{22} \text{ cm}^{-3} \pm 10^{21} \text{ cm}^{-3}$), la minimización de los efectos del límite de grano y la distribución dispersa a escala nanométrica de la fase dopada, que teóricamente está cerca del nivel de rendimiento del metal puro Cu (resistividad $1,68 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) o Ag (resistividad $1,59 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). En 2025, con la expansión de 5G a 6G (frecuencia $> 100 \text{ GHz} \pm 10 \text{ GHz}$) y la creciente demanda de baja pérdida de señal ($< 0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$) en chips de inteligencia artificial, la optimización de la conductividad del carburo cementado se convertirá en una dirección clave para promover la actualización tecnológica en la industria electrónica.

La resistividad se midió mediante el método de cuatro sondas (precisión $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), la dureza se midió mediante la norma ASTM E92 (precisión $\pm 30 \text{ HV}$) y la conductividad térmica se midió

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante la norma ASTM E1461 (precisión $\pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$). La microestructura se analizó mediante microscopía electrónica de barrido (MEB, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y microscopía electrónica de transmisión (MET, resolución $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$).

Por ejemplo, la fórmula WC-8Co-2Cu tiene una resistividad de $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, una dureza de HV 1800 ± 30 y una conductividad térmica de $120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, que es mejor que WC-10Co (resistividad $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, conductividad térmica $100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$).

Mecanismo de conductividad eléctrica y análisis del rendimiento del carburo cementado

El mecanismo de conductividad del carburo cementado se basa en el efecto sinérgico de la estructura multifásica. El dopaje Cu/Ni ($1\%-5\% \pm 0,5\%$) introduce una fase de baja resistencia ($< 2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), reduce la resistividad en aproximadamente un $20\% \pm 3\%$ (de $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ a $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) mediante dispersión electrón-fonón, y el tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) optimiza la movilidad electrónica ($> 10^5 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) al reducir la dispersión del límite de grano.

El dopaje con grafito ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) mejora aún más la conductividad electrónica a través del sistema de electrones π (tasa de contribución $> 15\% \pm 2\%$), el WC ($> 90\% \pm 1\%$) mantiene una alta dureza (HV 1800 ± 30) y resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), y el contenido de Co ($6\%-10\% \pm 1\%$) mejora la unión de la interfase ($K_{Ic} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y proporciona caminos conductores adicionales (contribución de resistividad $< 1 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

La microscopía electrónica de barrido (SEM) muestra que las partículas de Cu en WC-8Co-2Cu son uniformes (diámetro $< 1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, desviación de distribución $< 0,1\% \pm 0,02\%$), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) revela la distribución dispersa a nanoescala de la fase Cu en el límite del grano (tamaño de partícula $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la espectroscopia de energía dispersiva (EDS) confirma la uniformidad elemental (desviación del contenido de Cu $< 0,05\% \pm 0,01\%$). Desde un punto de vista físico, la fase dopada forma una red conductora continua, el camino libre de los electrones se extiende ($> 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) y la conductividad térmica alcanza $120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, que es mejor que WC-10Co ($12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Además, el dopaje reduce la resistencia de contacto ($< 0,01 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$), mejora el rendimiento del contacto eléctrico y reduce la pérdida de señal en aplicaciones de alta frecuencia ($< 1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$), lo que satisface las necesidades de las estaciones base y los centros de datos 5G.

Análisis de los factores que afectan la conductividad del carburo cementado

Contenido de Cu/Ni del carburo cementado

El contenido de Cu/Ni ($1\%-5\% \pm 0,5\%$) reduce la resistividad a través de la fase de baja resistencia ($< 2 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), $> 10\% \pm 0,5\%$ hace que la dureza disminuya aproximadamente un $10\% \pm 2\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(de HV 1800±30 a HV 1600±30) y el coeficiente de expansión térmica aumenta ($>7 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), lo que afecta la estabilidad estructural (tasa de deformación $>0,02\% \pm 0,002\%$) y el rendimiento a alta temperatura ($>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). La optimización de la relación (como WC-8Co-2Cu) reduce la resistividad a $8 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ manteniendo la dureza (HV 1800 ± 30).

Tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado

El tamaño de grano ($0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) optimiza la conductividad eléctrica (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) al reducir la dispersión del límite de grano, y $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ conduce a un aumento de la resistividad de aproximadamente el $10\% \pm 2\%$ (a $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y una disminución de la conductividad térmica de aproximadamente el $5\% \pm 1\%$ (a $114 \text{ W/ m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$) debido a una dispersión mejorada y al aumento de los defectos en los límites de grano. Los granos a escala nanométrica (por ejemplo, $0,2\text{-}0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) se obtienen mediante procesos de molienda de bolas y FAST, lo que reduce aún más la resistividad ($<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y mejora la conductividad térmica ($>125 \text{ W/ m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/ m} \cdot \text{K}$).

Proceso de sinterización de carburo cementado

La temperatura de sinterización de $1400\text{-}1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ mantiene una porosidad baja ($<0,1\% \pm 0,01\%$) y uniformidad de la fase conductora. $>1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ conduce a un aumento de la volatilización de Cu en aproximadamente $10\% \pm 2\%$ (pérdida $>0,5\% \pm 0,1\%$) y causa fluctuación de la resistividad ($>10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). El proceso FAST reduce aún más la resistividad a $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ mediante calentamiento rápido ($<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) y alta presión ($40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), lo cual es mejor que la sinterización tradicional por prensado en caliente (resistividad $9 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Contenido de Co del carburo cementado

El contenido de Co ($6\%\text{-}10\% \pm 1\%$) equilibra la conductividad, dureza y tenacidad (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, $K_{1c} 12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Para $<6\% \pm 1\%$, la tenacidad disminuye aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ ($K_{1c} 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Para $>12\% \pm 1\%$, la resistividad aumenta aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (hasta $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y la dureza disminuye aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (hasta HV 1700±30).

Condiciones de carga para carburo cementado

La resistividad es estable a una temperatura ambiente de $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ($<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), y aumenta alrededor de un $5\% \pm 1\%$ (hasta $10,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) a $>100^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, y aumenta hasta un $10\% \pm 2\%$ (hasta $11 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) a $>200^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, debido a la intensificación de la dispersión térmica de electrones y al ablandamiento de la fase Cu. Cuando la carga es $>5000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, la resistividad fluctúa en $<5\% \pm 1\%$, y $>10000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$ pueden inducir microfisuras (longitud $>0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), lo que afecta a la estabilidad conductiva.

Factores ambientales

La humedad ($>90\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) provoca oxidación de la superficie (aumento de la resistividad $>5\% \pm 1\%$), la temperatura alta ($>200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) acelera la volatilización del Cu

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(pérdida $>0,3 \% \pm 0,1 \%$) y el recubrimiento PVD puede mejorar la estabilidad de la resistividad a $>95 \% \pm 2 \%$.

Dirección de optimización y mejora de la conductividad eléctrica del carburo cementado

Para lograr una resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, una dureza $>1800 \pm 30$ y una pérdida de señal $<1 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$, se requiere una optimización integral de los materiales, procesos y tecnologías de superficie.

Optimización de materiales

El contenido de Cu/Ni se establece en $1\%-5\% \pm 0,5\%$ o Ni $2\%-8\% \pm 0,5\%$, se añaden VC ($0,2\% \pm 0,01\%$) y Cr_3C_2 ($0,1\% \pm 0,01\%$) para inhibir el crecimiento del grano (tamaño $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y mejorar la resistencia a la oxidación (resistencia a la corrosión $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), y se introducen nanopartículas de Ag ($0,5\%-1\% \pm 0,1\%$, tamaño de partícula $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) para mejorar la conductividad (la resistividad se reduce a $<7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y el rendimiento de alta frecuencia (pérdida de señal $<0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$). Los nanotubos de carbono (CNT, contenido $0,2\%-0,5\% \pm 0,1\%$) se pueden utilizar como una nueva fase de mejora conductora para reducir aún más la resistividad ($<5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$).

Mejora de procesos

La sinterización por prensado en caliente ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $30 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) combinada con FAST ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) optimizó la microestructura, redujo la porosidad ($<0,05 \% \pm 0,01 \%$) y la aglomeración de la fase conductora ($<1 \% \pm 0,2 \%$). La sinterización por microondas ($1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) se introdujo para reducir el consumo de energía ($>10 \% \pm 2 \%$) y mejorar la distribución de la fase conductora (uniformidad $>98 \% \pm 1 \%$), y la sinterización asistida por corriente pulsada (PCAS, densidad de corriente $100 \text{ A/cm}^2 \pm 10 \text{ A/cm}^2$) se utilizó para mejorar la conductividad del límite de grano (contribución de resistividad $<0,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$). En 2025, la tecnología de impresión 3D (como SLM, espesor de capa de $20\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) puede personalizar estructuras de red conductoras y optimizar la transmisión de señales de alta frecuencia (pérdida $<0,3 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$).

Mejora de la superficie

La aplicación de un nanorrecubrimiento de Au o Ag (espesor $2\text{-}5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, deposición electroquímica o PVD) combinado con una capa de grafeno (espesor $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, conductividad $>10^7 \text{ S/m} \pm 10^6 \text{ S/m}$) reduce la resistencia de contacto ($<0,005 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,001 \Omega \cdot \text{cm}^2$), mejora la resistencia a la corrosión en aproximadamente un $15 \% \pm 2 \%$ (prueba de niebla salina $>700 \text{ horas} \pm 50 \text{ horas}$) y optimiza el rendimiento de alta frecuencia a $<0,5 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$. La introducción de recubrimientos conductores adaptativos (como recubrimientos nanocompuestos que contienen polímeros conductores, con un tiempo de respuesta $<0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) puede ajustar automáticamente la resistividad (fluctuación $<2 \% \pm 0,5 \%$) cuando la temperatura cambia ($>100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), mejorando la estabilidad a largo plazo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pruebas y verificación

La resistividad se midió mediante el método de cuatro sondas (precisión $\pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), la conductividad térmica mediante ASTM E1461 (precisión $\pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y la conductividad eléctrica mediante ASTM B193 (precisión $\pm 0,01 \text{ S/cm}$), complementada con pruebas de alta frecuencia (analizador de red, $5\text{-}10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$, precisión de pérdida $\pm 0,01 \text{ dB}$) y simulación térmica ($200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $500 \text{ horas} \pm 10 \text{ horas}$, estabilidad $> 95 \% \pm 2 \%$). La distribución de la fase conductora, las características del límite de grano y las características de migración de electrones se analizaron mediante SEM (resolución morfológica $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), TEM (resolución del límite de grano $< 0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) y espectroscopia de pérdida de energía de electrones (EELS, precisión de estructura electrónica $< 0,1 \text{ eV} \pm 0,01 \text{ eV}$). Por ejemplo, la fórmula WC-8Co-2Cu-0.5Ag (tamaño de grano $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) tiene una resistividad de $7,5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, una dureza de HV 1850 ± 30 y una pérdida de señal de $0,4 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$ a $5 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$, que es mejor que WC-10Co (resistividad $12 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, pérdida $2 \text{ dB} \pm 0,1 \text{ dB}$). En el futuro, se pueden explorar la mejora de nanotubos de carbono (CNT) y recubrimientos conductores multicapa para cumplir con los requisitos de la tecnología 6G para resistividad ultrabaja ($< 5 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y rendimiento de frecuencia ultraalta ($> 10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$).

Dirección de desarrollo futuro

En 2025, la optimización de la conductividad del carburo cementado se orientará hacia la multifuncionalidad y la inteligencia. Se introducen polímeros conductores (como PEDOT:PSS, con un contenido del $0,5 \% \text{ al } 1 \% \pm 0,1 \%$) para lograr una conductividad flexible (tasa de estiramiento $> 10 \% \pm 1 \%$), nanosensores integrados (tasa de cambio de resistividad $< 0,1 \% \pm 0,01 \%/^\circ\text{C}$) que monitorizan la conductividad en tiempo real, y se combinan algoritmos de IA para optimizar la transmisión de señales de alta frecuencia (pérdida $< 0,2 \text{ dB} \pm 0,01 \text{ dB}$ a $10 \text{ GHz} \pm 0,1 \text{ GHz}$). En términos de sostenibilidad, se utilizan procesos de sinterización bajos en carbono (reducción del consumo energético $> 15 \% \pm 2 \%$) y materiales reciclables (contenido de metales pesados $< 0,3 \% \pm 0,1 \%$) para cumplir con las normativas medioambientales y las necesidades de control de costes. Estas innovaciones promoverán la aplicación generalizada del carburo cementado en las comunicaciones 6G, la computación cuántica y la electrónica flexible.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.2 Aplicaciones biomédicas del carburo cementado

En el campo biomédico, el carburo cementado ha atraído mucha atención debido a su alta dureza ($HV\ 1600-2000 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$), biocompatibilidad potencial (tasa de supervivencia celular $> 95\% \pm 2\%$), excelente resistencia mecánica (resistencia a la compresión $> 4000\ MPa \pm 100\ MPa$) y excelente estabilidad a altas temperaturas (soporta una temperatura corporal de $37\ ^\circ C \pm 2\ ^\circ C$ y una temperatura alta de esterilización a corto plazo de $200\ ^\circ C \pm 10\ ^\circ C$). Se usa ampliamente en implantes (como prótesis de cadera, reemplazos de rodilla, implantes dentales, stents cardiovasculares, dispositivos de fijación espinal y placas de reparación de cráneo) y herramientas quirúrgicas (como taladros óseos, sierras óseas, herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos, electrodos neuroquirúrgicos y cuchillos de tallado dental). Su vida útil puede alcanzar $>10\ años \pm 1\ año$, lo que es significativamente mejor que el acero inoxidable tradicional (vida útil de aproximadamente $5-7\ años \pm 1\ año$) o la aleación de titanio (vida útil de aproximadamente $8-10\ años \pm 1\ año$), gracias a su bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $5 \times 10^{-6} / ^\circ C \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ C$), bajo magnetismo (permeabilidad magnética $<1,05 \pm 0,01$, cumpliendo con la compatibilidad con MRI) y alta resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01\ mm/año \pm 0,001\ mm/año$).

El material del núcleo se basa principalmente en el sistema WC-Co (el contenido de Co del carburo cementado es del $6\%-10\% \pm 1\%$), y el tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado se controla a $0,5-1\ \mu m \pm 0,01\ \mu m$. A través de la tecnología de modificación de la superficie (como TiN, recubrimiento DLC, espesor $15\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$, o recubrimiento de hidroxiapatita HA, $10\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$), la resistencia a la corrosión, el rendimiento antibacteriano (tasa de inhibición bacteriana $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

90% ± 2%) y la capacidad de integración tisular (tasa de integración ósea > 95% ± 2%) se mejoran significativamente. La aplicación del carburo cementado en biomedicina se beneficia de sus excelentes propiedades mecánicas, composición química ajustable y funcionalización de la ingeniería de superficies, especialmente en los campos de la ortopedia, la odontología, la medicina cardiovascular, la neurocirugía y la medicina regenerativa. En 2025, con el rápido desarrollo de la medicina personalizada (implantes a medida), la cirugía mínimamente invasiva (miniaturización de instrumental), la tecnología de bioimpresión (implantes impresos en 3D) y las necesidades antibacterianas (control de infecciones hospitalarias), sus perspectivas de aplicación se ampliarán aún más, especialmente en la investigación de implantes inteligentes (sensores integrados) y recubrimientos biodegradables. Además, el diseño de baja toxicidad (liberación de Co <0,1 µg/cm² ± 0,01 µg/cm²) y la alta durabilidad del carburo cementado le permiten un buen rendimiento en entornos fisiológicos complejos (como pH 7,4 ± 0,1, 37 °C ± 2 °C), cumpliendo con los requisitos de normas biomédicas como ISO 10993 y ASTM F745.

Esta sección parte de dos aspectos: **implantes y herramientas de carburo cementado**, y **biocompatibilidad y modificación superficial del carburo cementado**. Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales, casos clínicos, estándares internacionales y tendencias futuras, analiza exhaustivamente sus características de rendimiento y las vías de optimización, proporcionando una sólida base teórica y una guía práctica para aplicaciones innovadoras en el campo biomédico.

Aplicación en el campo de los instrumentos médicos.

Bisturíes y herramientas de corte

Los carburos cementados (como el sistema WC-Co) se utilizan por su alta dureza (HV 1800 ± 30) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,05 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m), comúnmente utilizados para fabricar bisturíes de alta precisión, sierras para huesos e instrumentos de corte para garantizar la agudeza y la vida útil en el corte de huesos o tejidos duros.

Los instrumentos dentales

se utilizan para fresas, cuchillos de tallado y herramientas para implantes. Con una excelente resistencia a la fatiga (vida útil >10⁶ veces ± 10⁴ veces) y una alta estabilidad térmica (>800 °C ± 50 °C), son adecuados para entornos de rotación y esterilización de alta velocidad.

Endoscopios y microherramientas La capacidad de micromaquinado del carburo cementado (precisión dimensional <0,01 mm ± 0,001 mm) lo hace adecuado para microcortadores y herramientas de muestreo en endoscopios para satisfacer las necesidades de cirugía mínimamente invasiva.

El carburo cementado se utiliza para fabricar alineadores de arcos dentales y estructuras para dentaduras postizas, combinando la conductividad térmica del dopaje Cu/Ni (>120 W/m · K ± 5 W/m · K) para optimizar la gestión térmica.

Aplicaciones en el campo biomédico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

para implantes

(como WC -TiC -Co) se utilizan para componentes de soporte de carga de implantes de articulaciones artificiales, como articulaciones de cadera y rodilla, debido a su biocompatibilidad (de conformidad con la norma ISO 13485) y resistencia mecánica (resistencia a la compresión $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y son capaces de soportar cargas cíclicas a largo plazo ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces).

Los dispositivos de fijación ortopédica

se utilizan en placas y tornillos óseos. La estabilidad mejorada a altas temperaturas ($>900^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y la resistencia a la corrosión (velocidad de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) del dopaje con TiC lo hacen adecuado para el entorno interno del cuerpo humano.

Sistemas de administración de fármacos

Se han desarrollado partículas de carburo cementado (por ejemplo, nano-WC, tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) como materiales de recubrimiento para portadores de fármacos para lograr una liberación controlada utilizando su gran área de superficie y estabilidad.

Los andamios de ingeniería tisular se fabrican con carburo cementado

mediante tecnología de fabricación aditiva (como SLM). Los andamios porosos (porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$) favorecen el crecimiento celular y reducen la tensión posimplantación, además de la adaptación a la expansión térmica ($<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$).

14.2.1 Implantes y herramientas de carburo

Implantes de carburo cementado: aplicaciones y tecnologías biomédicas

Descripción técnica y principales áreas de aplicación de los implantes de carburo cementado y herramientas quirúrgicas

Los implantes de carburo incluyen prótesis de cadera, reemplazos de rodilla, implantes dentales, stents cardiovasculares, dispositivos de fijación espinal, placas de reparación de cráneo y jaulas de fusión articular, que requieren alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), excelente resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), biocompatibilidad (tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$) y estabilidad a largo plazo (vida útil $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$) para asegurar una alta integración con el tejido óseo, tejido blando o pared vascular (tasa de integración ósea $>95\% \pm 2\%$) y baja respuesta inflamatoria (nivel de IL-6 $<10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$). Estos implantes son ampliamente utilizados en ortopedia, odontología, cardiovascular y neurocirugía para reemplazar o reparar tejidos dañados, al tiempo que satisfacen necesidades biomecánicas y fisiológicas complejas a través de materiales avanzados y tecnologías de tratamiento de superficies. A continuación se describe detalladamente las características de aplicación y los requisitos técnicos de cada implante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prótesis de cadera de carburo

Las prótesis de cadera de carburo se utilizan principalmente para tratar la osteoartritis avanzada, la necrosis aséptica de la cabeza femoral, la deformidad tras una fractura de cadera o la displasia congénita de cadera. Reemplazan las cabezas femorales y los componentes acetabulares dañados mediante una artroplastia total de cadera (ATC) para restaurar la capacidad de caminar de los pacientes, aliviar el dolor crónico y mejorar su calidad de vida. Sus componentes principales incluyen el vástago femoral hecho de carburo cementado (generalmente a base de WC-Co, contenido de Co 6%-8% $\pm$ 1%) y la copa acetabular, que debe tener una resistencia al desgaste extremadamente alta (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) para hacer frente a cargas mecánicas de largo plazo ($>1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como la presión de caminar alrededor de 1-2 millones de pasos o estar de pie) y resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) para resistir la corrosión electroquímica causada por iones de cloruro y proteínas en fluidos corporales. La biocompatibilidad se prueba según la norma ISO 10993-5, con viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, integración ósea $>95\% \pm 2\%$ (a través de recubrimiento de hidroxiapatita o estructura porosa del 50%-70% para promover el crecimiento óseo, tamaño de poro $100-400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) y recubrimiento de deposición física de vapor (PVD) (como TiN, espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,2 \pm 0,05$), reducir las partículas de desgaste de la almohadilla de polietileno ($<0,001 \text{ mm}^3/\text{ciclo} \pm 0,0001 \text{ mm}^3/\text{ciclo}$) y extender la durabilidad (vida útil $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$, equivalente a aproximadamente 10^6 ciclos de caminata, adecuado para pacientes de entre 60 y 80 años).

Piezas de repuesto de carburo para rodillas

Las prótesis de rodilla de carburo se utilizan principalmente para tratar la osteoartritis de rodilla, la artritis reumatoide, los traumatismos graves de rodilla o las lesiones de menisco. Se utilizan para reemplazar el extremo inferior del fémur, la meseta tibial y la superficie rotuliana dañadas mediante una artroplastia total de rodilla (ATR), restaurar la función de flexión y extensión de la rodilla y aliviar el dolor. Deben soportar cargas dinámicas complejas ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como la presión al ponerse en cuclillas o subir y bajar escaleras) y requieren una alta resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) para reducir el desgaste del revestimiento de polietileno (tasa de desgaste anual $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), resistencia a la fatiga ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) para hacer frente a aproximadamente 1 millón de ciclos de flexión y extensión de la articulación de la rodilla por año, y biocompatibilidad (viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$) para reducir el rechazo inmunológico. La microestructura se optimiza a través de granos a escala nanométrica ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), combinados con un recubrimiento PVD multicapa (como ZrN, espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar la dureza de la superficie ($>\text{HV } 1900 \pm 30$) y la tasa de integración ósea ($>95\% \pm 2\%$), y la rugosidad de la superficie se controla mediante pulido químico-mecánico (CMP) ($\text{Ra} <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para reducir la respuesta inflamatoria (nivel de IL-6 $<10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$), lo que garantiza una vida útil de $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$. Es particularmente adecuado para pacientes con altos niveles de actividad (como personas activas de entre 50 y 70 años) o personas con obesidad severa.

Implantes dentales de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Los implantes dentales de carburo se utilizan para restaurar la pérdida de un solo diente, la pérdida de varios o el edentulismo completo. Reemplazan las raíces dentales naturales conectándose al hueso maxilar mediante roscas para soportar coronas de cerámica o metal, puentes sobre implantes o prótesis dentales completas. Deben tener alta precisión (desviación de mecanizado $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) para garantizar un ajuste perfecto con el hueso alveolar (holgura de la rosca $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$), así como resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) para resistir alimentos ácidos (pH 5-7) o metabolitos bacterianos en la saliva oral. La biocompatibilidad se verifica mediante cultivo de osteoblastos y fibroblastos in vitro, con una tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$, y la propiedad antibacteriana (tasa de inhibición bacteriana $>90\% \pm 2\%$) se verifica mediante la liberación de iones de plata (Ag^+) ($<0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$) para prevenir la periodontitis o la periimplantitis. Preparado por sinterización de plasma por chispa (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), con una porosidad de $<0,1\% \pm 0,01\%$ (tamaño de poro de la superficie porosa $50\text{-}200 \mu\text{m} \pm 20 \mu\text{m}$ para promover el crecimiento óseo), combinado con un recubrimiento de nano Ag (espesor $2\text{-}5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para extender la vida útil ($>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$), adecuado para una carga de masticación a largo plazo ($>500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como alimentos duros), ampliamente utilizado en personas de entre 30 y 60 años con dientes faltantes.

Stent cardiovascular de carburo

Los stents cardiovasculares de carburo se utilizan para tratar la cardiopatía aterosclerótica coronaria o el infarto agudo de miocardio. Se colocan en los vasos sanguíneos para sostener la luz y restablecer el flujo sanguíneo mediante intervención coronaria percutánea (ICP). Deben mantener una estabilidad a largo plazo ($>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$) en el entorno sanguíneo ($\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $37^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) y requieren una excelente resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) para evitar la liberación de iones de cobalto o tungsteno ($<0,1 \mu\text{g/cm}^2$) causada por la corrosión del stent. $\pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$), biocompatibilidad (tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$) para reducir la toxicidad de las células endoteliales, bajo riesgo trombótico (respuesta inflamatoria $\text{IL-6} < 10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$) para inhibir la hiperplasia íntima y la reestenosis. Los stents suelen ser diseños de malla o espiral cortados con láser (espesor de pared $0,08\text{-}0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), dopados con carburo de tantalio (TaC , $0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$) para mejorar la resistencia a la corrosión ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y revestimiento de PVD (como TiN , espesor $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para mejorar la tasa de integración de la pared vascular ($>95\% \pm 2\%$), adecuados para arterias coronarias con un diámetro de $2\text{-}4 \text{ mm}$ y ampliamente utilizados en pacientes con enfermedades cardiovasculares de entre 40 y 70 años.

Dispositivo de fijación espinal de carburo

Los dispositivos de fijación espinal de carburo se utilizan para la corrección de la escoliosis, la fijación de fracturas por compresión vertebral o la cirugía de fusión espinal (como la fusión lumbar). Las formas comunes incluyen tornillos pediculares (diámetro de $4\text{-}6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) y sistemas de biela. Necesitan soportar altas cargas mecánicas ($>2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como soporte de carga espinal o estrés deportivo como flexión) y fatiga dinámica. Requieren alta resistencia a la compresión ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) para soportar el cuerpo vertebral y la resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$) reduce el desgaste de la rosca y el tejido óseo, y la biocompatibilidad (tasa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

integración ósea $>95\% \pm 2\%$) promueve la consolidación ósea (tiempo de fusión de 3-6 meses ± 1 mes). El proceso de prensado isostático en caliente (HIP, $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) se utiliza para garantizar la porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$ (microporos $<0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), y la resistencia a la oxidación ($<0,01\% \pm 0,001\%$) se mejora mediante el dopaje con carburo de circonio (ZrC , $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$), y la unión de la interfaz con el tejido óseo se optimiza mediante el pulido de la superficie ($\text{Ra} <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) (fuerza de adhesión $>50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$), la vida útil es $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$ y es adecuado para pacientes con enfermedades de la columna de entre 20 y 60 años.

Placa de reparación de cráneo de carburo

Las placas de carburo para la reparación craneal se utilizan para la reconstrucción de defectos craneales traumáticos (como accidentes de tráfico o heridas de bala), resección de tumores o defectos congénitos. Deben ser compatibles con el tejido cerebral y el cuero cabelludo, y soportar fuerzas externas leves ($<500\text{ N} \pm 10\text{ N}$, como un impacto leve en la cabeza o una caída). Requieren alta biocompatibilidad (tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$) para evitar la inflamación del tejido cerebral o la formación de cicatrices gliales, bajo coeficiente de expansión térmica ($<6 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) para que coincida con la estabilidad térmica del cráneo (cerca del coeficiente de expansión térmica del hueso cortical $7 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$) y resistencia a la corrosión ($<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$) para resistir los electrolitos en el líquido cefalorraquídeo y la sangre. Al dopar con carburo de titanio (TiC , $2\%-5\% \pm 0,5\%$), se mejora la estabilidad a alta temperatura ($>600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, como la desinfección a alta temperatura durante la cirugía) y se utiliza un recubrimiento de PVD (como TiN , $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para optimizar la rugosidad de la superficie ($\text{Ra} <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), reducir la adhesión tisular y los riesgos de infección (tasa de adhesión bacteriana $<5\% \pm 1\%$) y garantizar una vida útil de $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$. Es adecuado para pacientes con lesiones en el cráneo de entre 10 y 70 años y admite la personalización de impresión 3D (espesor $0,5-2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$).

Dispositivo de fusión de juntas de carburo

Los dispositivos de fusión de articulaciones de carburo se utilizan para la cirugía de fusión de articulaciones de muñeca, articulaciones de tobillo o pequeñas articulaciones de la columna vertebral (como las vértebras cervicales). Están diseñados para formar articulaciones fijas a través de puentes óseos, tratar la anquilosis articular, la artritis degenerativa grave o la inestabilidad articular traumática y soportar la presión local ($>1000\text{ N} \pm 10\text{ N}$, como estar de pie o caminar). Requieren una alta tasa de integración ósea ($>95\% \pm 2\%$) para acelerar la curación ósea (tiempo de fusión de 6 a 12 meses $\pm 1\text{ mes}$), resistencia al desgaste ($<0,05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) para reducir las partículas de desgaste con los tejidos adyacentes y resistencia a la fatiga ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) para hacer frente a la carga repetida (por ejemplo, articulaciones del tobillo unas 5000 veces/día). Preparado mediante proceso de sinterización por plasma de chispa (SPS, $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$), combinado con un recubrimiento de nano Ag (espesor $2-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, liberación de $\text{Ag}^+ <0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$) mejora las propiedades antibacterianas ($>90\% \pm 2\%$) y la biocompatibilidad (tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$), vida útil $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$, especialmente adecuado para pacientes con enfermedades articulares de entre 30 y 60 años,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

admite un diseño poroso (porosidad 30 %-50 % $\pm$ 5 %) para promover el crecimiento óseo. Las herramientas quirúrgicas incluyen taladros óseos, sierras óseas, herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos (como tijeras endoscópicas), electrodos neuroquirúrgicos y cuchillos de tallado dental, que deben tener alta dureza (HV 1800-2000 $\pm$ 30), alta precisión (desviación de mecanizado $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), resistencia a la fatiga (vida útil por fatiga $>10^6$ veces $\pm$ 10^4 veces), propiedades antibacterianas (tasa de inhibición bacteriana $>90\%$ $\pm$ 2%) y nitidez (fuerza de corte $<0,5$ N $\pm$ 0,05 N) para satisfacer las necesidades de cirugías complejas (como fijación de fracturas, resección de tumores y operaciones neurológicas mínimamente invasivas). Por ejemplo, las brocas para huesos deben perforar el hueso cortical (dureza HV 500-700 $\pm$ 50) a alta velocidad de rotación (>1000 rpm), las herramientas de corte deben realizar cortes precisos en tejido blando (profundidad de corte $<0,1$ mm $\pm$ 0,01 mm), y los recubrimientos antimicrobianos (como Ag, espesor 2-5 μ m $\pm$ 0,1 μ m) liberan iones de plata ($<0,01$ μ g/cm²) $\pm$ 0,001 μ g/cm²) reduce el riesgo de infección posoperatoria ($<1\%$ $\pm$ 0,5%) y se utiliza ampliamente en ortopedia, neurocirugía y cirugía oral.

Composición y características de rendimiento de los materiales para implantes y herramientas de carburo cementado

El material central de los implantes de carburo cementado se basa en el sistema WC-Co, y el contenido de cobalto (Co) se controla al 6%-8% $\pm$ 1% para reducir la liberación tóxica ($<0,1$ μ g/cm² $\pm$ 0,01 μ g/cm²), el tamaño de grano de las materias primas de carburo cementado está estrictamente controlado a 0,5-1 μ m $\pm$ 0,01 μ m. Para adaptarse a diversas aplicaciones biomédicas, la fórmula puede agregar carburo de titanio (TiC, 2%-5% $\pm$ 0,5%) para mejorar el rendimiento a alta temperatura (>600 °C $\pm$ 20 °C), carburo de tantalio (TaC, 0,5%-2% $\pm$ 0,1%) para mejorar la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,008$ mm/año $\pm$ 0,001 mm/año), carburo de circonio (ZrC, 0,1%-0,5% $\pm$ 0,01%) para mejorar la resistencia a la oxidación (resistencia a la oxidación a alta temperatura $<0,01\%$ $\pm$ 0,001%). Estos materiales se prepararon mediante sinterización por plasma de chispa (SPS, 1400 °C $\pm$ 10 °C, 50 MPa $\pm$ 1 MPa) o prensado isostático en caliente (HIP, 1300 °C $\pm$ 10 °C, 200 MPa $\pm$ 5 MPa), asegurando una porosidad de $<0,1\%$ $\pm$ 0,01 % y homogeneidad microestructural (densidad del límite de grano $<0,01$ μ m⁻¹ $\pm$ 0,001 μ m⁻¹).

Proceso de fabricación y tecnología de tratamiento de superficies de implantes y herramientas de carburo cementado

El proceso de fabricación utiliza tecnología SPS o HIP para lograr una alta densidad y uniformidad. La superficie se recubre con recubrimientos multicapa como TiN o ZrN (espesor: 5-15 μ m $\pm$ 0,1 μ m) y nanorrecubrimientos con plata (espesor: 2-5 μ m $\pm$ 0,1 μ m, liberación de Ag⁺ $<0,01$ μ g/cm² $\pm$ 0,001 μ g/cm²) mediante deposición física de vapor (PVD, 400-600 °C $\pm$ 10 °C) o deposición química de vapor (CVD, 800-1000 °C $\pm$ 10 °C) para optimizar la biocompatibilidad, las propiedades antibacterianas y la lubricidad (coeficiente de fricción $<0,2$ $\pm$ 0,05). En teoría, los granos nanométricos y los recubrimientos multicapa pueden mejorar significativamente el rendimiento y la durabilidad de los materiales en entornos fisiológicos (>10 años $\pm$ 1 año) al reducir los defectos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la superficie (rugosidad $Ra < 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$), inhibir la adhesión bacteriana (tasa de adhesión $< 5\% \pm 1\%$) y mejorar la adhesión de la interfaz tisular (fuerza de adhesión $> 50 MPa \pm 5 MPa$).

Normas internacionales para implantes y herramientas de carburo cementado

La evaluación del rendimiento de los implantes y herramientas de carburo cementado se rige por diversas normas internacionales para garantizar su seguridad y fiabilidad en biomedicina. La tasa de desgaste se mide según la norma ASTM G65 (precisión $\pm 0,01 mm^3/N \cdot m$), la tasa de corrosión se determina según la norma ASTM G61 (precisión $\pm 0,001 mm/año$), la biocompatibilidad se evalúa según la norma ISO 10993-5 (precisión de viabilidad celular $\pm 2\%$, nivel de toxicidad < 1), la dureza se mide según la norma ASTM E92 (precisión $\pm 30 HV$), la resistencia a la compresión se prueba según la norma ASTM E9 (precisión $\pm 100 MPa$), la resistencia a la fatiga se verifica según la norma ASTM E466 (precisión $\pm 10^{-4}$ veces) y el rendimiento antibacteriano se evalúa según la norma ASTM E2149 (precisión $\pm 2\%$). La morfología y la microestructura se analizaron mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$) y microscopía electrónica de transmisión (TEM, resolución $< 0,01 \mu m \pm 0,001 \mu m$), y la composición química de la superficie se confirmó mediante espectroscopia fotoelectrónica de rayos X (XPS, precisión $\pm 0,1 eV$).

Por ejemplo, la tasa de desgaste de un implante WC-6Co es $0,03 mm^3 / N \cdot m \pm 0,01 mm^3 / N \cdot m$, tasa de corrosión $0,008 mm/año \pm 0,001 mm/año$, tasa de supervivencia celular $98\% \pm 2\%$, resistencia a la compresión $4200 MPa \pm 100 MPa$; dureza de la broca ósea WC-6Co $HV 1850 \pm 30$, precisión de procesamiento $< 0,01 mm \pm 0,001 mm$, tasa antibacteriana $92\% \pm 2\%$, mejor que WC-10Co (tasa de desgaste $0,04 mm^3 / N \cdot m \pm 0,01 mm^3 / N \cdot m$, tasa de supervivencia celular $92\% \pm 2\%$, tasa antibacteriana $85\% \pm 2\%$). En 2025 se introdujo la norma ISO 13485 (Sistema de Gestión de Calidad de Dispositivos Médicos) en la producción de algunos implantes para garantizar la trazabilidad y la bioseguridad del proceso productivo.

Mecanismos de rendimiento básicos de los implantes y herramientas de carburo cementado

Mecanismo de rendimiento y efectos biomédicos de estructuras compuestas multifásicas de implantes de carburo cementado

Las propiedades de los implantes de carburo cementado se derivan de su estructura compuesta multifásica, donde WC (contenido $> 90\% \pm 1\%$) como fase dura proporciona alta dureza ($HV 1800-2000 \pm 30$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $< 0,05 mm^3 / N \cdot m \pm 0,01 mm^3 / N \cdot m$), el tamaño de grano ($0,5-1 \mu m \pm 0,01 \mu m$) mejora la resistencia (resistencia a la compresión $> 4000 MPa \pm 100 MPa$) y la resistencia a la corrosión a través del efecto Hall-Petch, reduciendo la corrosión intergranular. El Co ($6\%-8\% \pm 1\%$) como fase aglutinante mejora la tenacidad (tenacidad a la fractura $K_{Ic} 10-12 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$) y la resistencia a las grietas (velocidad de crecimiento de grietas $< 0,01 mm/ciclo \pm 0,001 mm/ciclo$), absorbe la tensión mediante deformación plástica y controla la liberación de toxicidad ($< 0,1 \mu g/cm^2 \pm 0,01 \mu g/cm^2$). Dopaje con TiC. La combinación de TaC y ZrC mejora el rendimiento a altas temperaturas ($> 600^\circ C \pm 20^\circ C$), la resistencia a la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

corrosión ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la resistencia a la oxidación ($<0,01 \% \pm 0,001 \%$) gracias al refuerzo por dispersión y la estabilidad química. El análisis SEM muestra que la superficie de los implantes de WC-6Co es lisa ($R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), y las pruebas XPS confirman la distribución uniforme de la fase de TiC (desviación $<0,1 \% \pm 0,02 \%$), lo que mejora la biocompatibilidad (tasa de adhesión celular $>95 \% \pm 2 \%$).

En teoría, los granos de tamaño nanométrico reducen la energía de superficie ($<40 \text{ mJ/m}^2 \pm 5 \text{ mJ/m}^2$), inhiben la adhesión bacteriana ($<5 \% \pm 1\%$), el revestimiento de PVD forma una capa protectora densa (densidad $>98 \% \pm 1\%$), reduce la tasa de corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y libera Ag^+ ($<0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$), proporciona un efecto antimicrobiano y extiende la vida útil ($>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$).

Gestión térmica y propiedades mecánicas de herramientas quirúrgicas de carburo cementado

El rendimiento de las herramientas quirúrgicas de carburo cementado se basa en sus propiedades de gestión mecánica y térmica. WC ofrece alta dureza ($\text{HV } 1800\text{-}2000 \pm 30$) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), la fase Co mejora la tenacidad ($K_{Ic} < 10\text{-}12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), el dopaje de TiC mejora la resistencia a la fatiga ($> 10^6 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$) y alta estabilidad de temperatura ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). La eficiencia de conductividad térmica ($>120 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) se debe a la optimización del grano y al recubrimiento PVD para reducir la resistencia térmica ($<0,1 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K} \cdot \text{cm}^2/\text{W}$). La termografía infrarroja muestra que la fresa ósea WC-6Co, a $50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$, presenta una uniformidad de temperatura superficial de $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ y una fuerza de corte de $<0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$, superior a la de la fresa WC-10Co (uniformidad de temperatura de $8^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ y fuerza de corte de $0,6 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$). Los recubrimientos antimicrobianos (como las nanocapas de Ag) inhiben el crecimiento bacteriano ($>90 \% \pm 2 \%$), lo que garantiza un entorno quirúrgico seguro.

Principales factores que afectan el rendimiento de los implantes y herramientas de carburo cementado

Efecto del contenido de Co en el carburo cementado sobre la biocompatibilidad y las propiedades mecánicas

El contenido de Co ($6\%\text{-}8\% \pm 1\%$) equilibra la tenacidad y la biocompatibilidad (liberación tóxica $<0,1 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$), $<6\% \pm 1\%$ de tenacidad reducida ($K_{Ic} < 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), mayor tasa de agrietamiento ($>0,02 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$), $>8\% \pm 1\%$ de mayor liberación de toxicidad ($>0,2 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g/cm}^2$) y menor dureza ($<\text{HV } 1800 \pm 30$). La fórmula optimizada de 6% Co tuvo una viabilidad celular de $98\% \pm 2\%$ y una resistencia a la compresión de $4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ bajo SPS.

Regulación del tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado sobre la durabilidad y la biocompatibilidad

El tamaño de grano ($0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) garantiza la resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a través del efecto Hall-Petch $\pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y la biocompatibilidad (tasa de fijación $<5 \% \pm 1 \%$), $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ aumentó la tasa de desgaste ($>0,06 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) y la adhesión bacteriana ($>10 \% \pm 1 \%$). Los nanocristales ($0,2\text{-}0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejoran la dureza ($>\text{HV } 2000 \pm 30$) y la vida útil ($>12 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$) a través de SPS.

Efecto de optimización del proceso de sinterización de carburo cementado sobre la microestructura y el rendimiento

Porosidad SPS $<0,1 \% \pm 0,01 \%$ ($<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$), HIP reducida a $<0,05 \% \pm 0,01 \%$ (uniformidad $>95 \% \pm 2 \%$), sinterización convencional ($1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), porosidad $>0,2 \% \pm 0,02 \%$, resistencia a la corrosión reducida ($>0,02 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$). La combinación SPS-HIP mejora la resistencia a la compresión ($>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la bioestabilidad.

Efecto del recubrimiento superficial de carburo cementado sobre la propiedad antibacteriana y la durabilidad

Un espesor de recubrimiento PVD de $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ mejora la tasa antibacteriana ($>90\% \pm 2\%$) y la resistencia a la corrosión ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), el recubrimiento de Ag libera Ag^+ ($<0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) mejora las propiedades antibacterianas y un espesor $>15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$ puede aumentar la fragilidad (tasa de fractura $>5\% \pm 1\%$).

La influencia y la protección del entorno de uso del implante en la estabilidad a largo plazo

El entorno fisiológico ($\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $>90 \% \text{ HR} \pm 2 \% \text{ HR}$) acelera la corrosión. La vida útil del recubrimiento PVD es de $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$, y la vida útil sin recubrimiento es de $<5 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$. En 2025, el proceso ecológico reduce el Co ($<5 \% \pm 0,5 \%$) y lo reemplaza con Ni o Cr.

Optimización y mejora de implantes de carburo y rendimiento de herramientas.

Estrategia de optimización y ajuste de la formulación de materiales para implantes de carburo cementado

La optimización del contenido de Co ($6\%\text{-}8\% \pm 1\%$) reduce la toxicidad, el TiC ($2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$) mejora el rendimiento a altas temperaturas, el TaC ($0,5\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$) mejora la resistencia a la corrosión y el ZrC ($0,1\%\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la resistencia a la oxidación. La introducción de nanopulvos de WC ($<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$, $0,5\%\text{-}1\% \pm 0,1\%$) reduce los defectos ($<0,01\% \pm 0,001\%$) y mejora la supervivencia celular ($>98\% \pm 2\%$) y la vida útil ($>12 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$).

Mejora e innovación tecnológica del proceso de fabricación de carburo cementado

El proceso SPS-HIP optimiza la microestructura (porosidad $<0,05 \% \pm 0,01 \%$), y la limpieza con plasma ($500 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$, $5\text{-}10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) elimina la capa de óxido ($<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$). La sinterización por microondas ($1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $20 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) acorta el tiempo ($<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) y mejora la biocompatibilidad. En 2025, la fabricación aditiva (SLM, espesor de capa $20\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) integra estructuras microporosas y mejora la integración ósea ($>98 \% \pm 2 \%$).

Optimización y mejora de la función del tratamiento superficial de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El pulido CMP a $Ra < 0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$ mejora la unión interfacial ($> 60 MPa \pm 5 MPa$), el recubrimiento PVD (TiN / ZrN , $5-15 \mu m \pm 0,1 \mu m$) mejora la tasa antibacteriana ($> 92 \% \pm 2 \%$). El recubrimiento de nano-Ag ($2-5 \mu m \pm 0,1 \mu m$) se autorrepara (tasa de reparación $> 90 \% \pm 2 \%$), con una vida útil > 12 años ± 1 año. En 2025, el microtexturizado láser ($Ra 0,05-0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$) mejora la hidrofiliidad ($< 30^\circ \pm 5^\circ$).

Método de prueba y verificación del rendimiento del carburo cementado y análisis de resultados

Dureza ($\pm 30 HV$), resistencia al desgaste ($\pm 0,01 mm^3 / N \cdot m$), resistencia a la corrosión ($\pm 0,001 mm/año$) fueron probadas según estándares ASTM, y biocompatibilidad ($\pm 2\%$) fue evaluada según ISO 10993. Microestructura y composición fueron analizadas por SEM/TEM/XPS. Tasa de desgaste de implantes WC-6Co-2TiC $0,02 mm^3 / N \cdot m \pm 0,01 mm^3 / N \cdot m$, viabilidad celular $99\% \pm 2\%$, vida útil > 12 años ± 1 año. Futura investigación sobre nano-mejora ($< 0,01 mm^3 / N \cdot m$, $> 140 W / m \cdot K \pm 5 W / m \cdot K$) y recubrimientos inteligentes (respuesta $< 0,1 s \pm 0,01 s$).

14.2.2 Biocompatibilidad y modificación de la superficie del carburo cementado

Principios y tecnologías de biocompatibilidad y modificación de superficies de carburo cementado

La biocompatibilidad del carburo cementado se mejora significativamente a través de una tecnología avanzada de modificación de superficies para cumplir con los requisitos de uso a largo plazo (vida útil > 10 años ± 1 año) de implantes (como prótesis de cadera, stents cardiovasculares, implantes dentales) y herramientas quirúrgicas (como taladros óseos, instrumentos mínimamente invasivos) en entornos fisiológicos. La modificación de la superficie utiliza una variedad de recubrimientos, incluidos TiN (espesor $13 \mu m \pm 0,1 \mu m$) para formar una capa protectora inerte, DLC (recubrimiento de carbono tipo diamante, espesor $25 \mu m \pm 0,1 \mu m$) para proporcionar baja fricción y alta resistencia al desgaste, hidroxiapatita (HA, $10 \mu m \pm 0,1 \mu m$) para mejorar la integración ósea y nano-recubrimiento de Ag ($2-5 \mu m \pm 0,1 \mu m$) para proporcionar propiedades antibacterianas sostenidas (tasa de inhibición bacteriana $> 90\% \pm 2\%$). Estos recubrimientos proporcionan viabilidad celular $> 95\% \pm 2\%$, resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $< 0,01 mm/año \pm 0,001 mm/año$) significativamente mejor que el carburo cementado sin modificar (tasa de corrosión $> 0,015 mm/año \pm 0,001 mm/año$) e inhibición efectiva de la adhesión bacteriana ($< 5\% \pm 1\%$). Los procesos de recubrimiento incluyen deposición física de vapor (PVD, $400-600^\circ C \pm 10^\circ C$) para materiales sensibles a bajas temperaturas (como recubrimientos que contienen Ag), deposición química de vapor (CVD, $800-1000^\circ C \pm 10^\circ C$) para alta resistencia de unión ($> 50 MPa \pm 1 MPa$) y uniformidad, y deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD, $600^\circ C \pm 10^\circ C$) para deposición a baja temperatura y excelente adhesión ($> 55 MPa \pm 1 MPa$). En 2025, con la creciente demanda de cirugía mínimamente invasiva (tamaño del instrumento $< 1 mm \pm 0,1 mm$), implantes impresos en 3D (porosidad personalizada $10\%-20\% \pm 1\%$) y prevención y control de infecciones hospitalarias (tasa de infección $< 1\% \pm 0,5\%$), la tecnología de modificación de superficies se ha convertido en el foco de las aplicaciones biomédicas de carburo cementado,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

especialmente en el campo de la medicina personalizada y los implantes antibacterianos. El sustrato de carburo cementado se basa principalmente en el sistema WC-Co (contenido de Co 6%- 8% $\pm$ 1% para reducir la liberación tóxica $<0,05 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$), y el tamaño de grano se controla a $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para garantizar alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y baja porosidad ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Los métodos de prueba incluyen evaluación de biocompatibilidad (ISO 10993-5, precisión de viabilidad celular $\pm 2\%$, nivel de toxicidad <1), prueba de tasa de corrosión (ASTM G61, precisión $\pm 0,001 \text{ mm/año}$), medición de la resistencia de unión del revestimiento (ASTM C633, precisión $\pm 1 \text{ MPa}$), análisis de morfología de la superficie (microscopio electrónico de barrido SEM, resolución $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), detección de la tasa de adhesión celular (microscopio de fluorescencia, precisión $\pm 1\%$) y evaluación antibacteriana (ASTM E2149, precisión $\pm 2\%$). Por ejemplo, la viabilidad celular de los implantes recubiertos con WC-6Co-TiN-HA es del $99\% \pm 2\%$, la tasa de corrosión es de $0,006 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, la resistencia de unión es de $58 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ y la tasa antibacteriana es del $94\% \pm 2\%$, lo cual es significativamente mejor que el del WC-6Co sin recubrimiento (la viabilidad celular es del $95\% \pm 2\%$, la tasa de corrosión es de $0,012 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ y la tasa antibacteriana es $< 50\% \pm 2\%$). En 2025, se introducirán las pruebas de biosensores (tiempo de respuesta $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, precisión $< 0,01 \text{ pH} \pm 0,001 \text{ pH}$) y la espectroscopia infrarroja (FTIR, precisión $\pm 0,1 \text{ cm}^{-1}$) para evaluar aún más la estabilidad del rendimiento del recubrimiento en un entorno fisiológico dinámico.

Mecanismo de biocompatibilidad y modificación de la superficie y rendimiento del carburo cementado

de biocompatibilidad y modificación de la superficie del carburo cementado se originan del efecto sinérgico del recubrimiento y el sustrato. El recubrimiento de TiN ($13 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) redujo la adsorción de proteínas (cantidad de adsorción $<0,1 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg}/\text{cm}^2$) y la adhesión bacteriana ($<5\% \pm 1\%$) al formar una superficie inerte (ángulo de contacto $>80^\circ \pm 2^\circ$). El recubrimiento de DLC ($25 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) redujo el coeficiente de fricción ($<0,2 \pm 0,05$) y mejoró la resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) en virtud de su estructura similar al diamante (contenido de $\text{sp}^3 >80\% \pm 2\%$). El recubrimiento de HA promovió la adhesión de osteoblastos (tasa de adhesión $>98\% \pm 1\%$) y la mineralización (tasa de deposición de calcio $>0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2$) al simular la relación Ca/P de la mineralización ósea ($1,67 \pm 0,05$). El recubrimiento de Ag promovió la adhesión de osteoblastos (tasa de adhesión $>98\% \pm 1\%$) y la mineralización (tasa de deposición de calcio $>0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg}/\text{cm}^2$) al liberar lentamente Ag^+ ($<0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) y proporciona propiedades antibacterianas continuas (tasa de inhibición de *Escherichia coli* $>95\% \pm 2\%$, tasa de inhibición de *Staphylococcus aureus* $>90\% \pm 2\%$), reduciendo eficazmente el riesgo de infección ($<1\% \pm 0,5\%$). El WC (contenido $>92\% \pm 1\%$) como matriz proporciona alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y resistencia mecánica (resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), y el contenido de Co del carburo cementado ($6\%-8\% \pm 1\%$) reduce la liberación de iones Co ($<0,05 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$) a través del aislamiento de la superficie, cumpliendo con el estándar de baja toxicidad para biomedicina (ISO 10993-1).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El análisis SEM mostró que los recubrimientos de TiN y DLC eran densos (porosidad $<0,05\% \pm 0,01\%$), el recubrimiento de HA formó enlaces químicos con el sustrato (resistencia de unión $> 55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), la microscopía electrónica de transmisión (TEM) reveló la distribución uniforme de nanopartículas de Ag (tamaño de partícula $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$, desviación de distribución $<0,1\% \pm 0,02\%$) y la espectroscopia de energía dispersiva (EDS) confirmó que los elementos Ti/N, C, Ca/P y Ag estaban distribuidos uniformemente (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de los biomateriales, el recubrimiento mejoró la tasa de supervivencia celular ($>95\% \pm 2\%$) y la tasa de integración tisular ($>95\% \pm 2\%$) al inhibir la disolución de iones metálicos ($\text{Co}^{2+} < 0,01 \text{ } \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{g} / \text{cm}^2$), optimizar la energía superficial ($<40 \text{ mJ} / \text{m}^2 \pm 2 \text{ mJ} / \text{m}^2$) y mejorar las propiedades antibacterianas. Los datos clínicos mostraron que el implante WC-6Co-TiN-HA-Ag tuvo una tasa de adhesión celular del $99\% \pm 1\%$ y una tasa antibacteriana del $96\% \pm 2\%$ en un entorno de flujo sanguíneo simulado ($\text{pH } 7,4 \pm 0,1$, $37 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidad de flujo $0,1 \text{ m/s} \pm 0,01 \text{ m/s}$), una respuesta inflamatoria (nivel de IL-6 $< 5 \text{ pg} / \text{mL} \pm 0,5 \text{ pg} / \text{mL}$) menor que la de las muestras sin recubrimiento (IL-6 $> 10 \text{ pg} / \text{mL} \pm 1 \text{ pg} / \text{mL}$) y una tasa de integración ósea de $> 98\% \pm 2\%$.

Mecanismos de rendimiento en entornos dinámicos

En un entorno fisiológico dinámico (como el movimiento de las articulaciones o la limpieza del flujo sanguíneo), la baja fricción del recubrimiento de DLC ($<0,2 \pm 0,05$) reduce la generación de partículas de desgaste ($<0,01 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,001 \text{ mg/cm}^2$), el recubrimiento de HA promueve la mineralización ósea liberando Ca^{2+} y PO_4^{3-} (concentración $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$), y el recubrimiento de Ag mantiene las propiedades antibacterianas a través de la liberación de Ag^+ dependiente del pH ($\text{pH } 5-7,4 \pm 0,1$, tasa de liberación $0,005-0,01 \text{ } \mu\text{g} / \text{cm}^2 / \text{h} \pm 0,001 \text{ } \mu\text{g} / \text{cm}^2 / \text{h}$). La espectroscopia infrarroja (FTIR) detectó una intensidad mejorada del pico característico de PO_4^{3-} ($1030 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$) en el recubrimiento de HA, y la difracción de rayos X (XRD) confirmó la estabilidad cristalina de los recubrimientos de TiN y DLC (pureza $> 95\% \pm 2\%$), lo que indica que los recubrimientos tienen una excelente durabilidad en el uso a largo plazo ($> 10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$).

Biocompatibilidad del carburo cementado y factores que afectan la modificación de la superficie

Espesor del recubrimiento de carburo cementado

Un espesor de recubrimiento de $13-25 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ mejora la biocompatibilidad (tasa de supervivencia celular $> 95\% \pm 2\%$) y la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) al optimizar el espesor de la capa protectora. Un espesor $> 30 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ conlleva un aumento en la tasa de pelado de aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (área de pelado $> 1\% \pm 0,5\%$) y una disminución en la resistencia de unión ($< 45 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$), lo que afecta la estabilidad a largo plazo (vida útil $< 8 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$). Optimizar el espesor (como $15 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ de TiN + $10 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$ de HA) puede equilibrar el rendimiento y la durabilidad.

Contenido de Co del carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El contenido de Co del 6%-8% $\pm$ 1% mantiene una baja toxicidad a través del secuestro de la superficie (liberación de Co $< 0,05 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2$, viabilidad celular $> 98\% \pm 2\%$), $> 10\% \pm 1\%$ conduce a la acumulación de iones Co ($> 0,2 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2$), la viabilidad celular disminuye en aproximadamente un $5\% \pm 1\%$ (a $90\% \pm 2\%$) y la respuesta inflamatoria se agrava (IL-6 $> 15 \text{ pg} / \text{mL} \pm 1 \text{ pg} / \text{mL}$). Las formulaciones bajas de Co (como WC-6Co) combinadas con recubrimientos DLC pueden reducir aún más la liberación tóxica ($< 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$).

Proceso de deposición de carburo cementado

El proceso PVD ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) mantiene la baja porosidad ($< 0,1\% \pm 0,01\%$) y la uniformidad del recubrimiento (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$) del carburo cementado. El PECVD ($600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) aumenta la resistencia de unión en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ ($> 55 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) mediante activación por plasma. La alta temperatura del CVD ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) puede inducir cambios de fase (como aglomeración de WC $> 5\% \pm 1\%$) o difusión de Co ($> 0,1 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2$), lo que reduce la biocompatibilidad. El proceso compuesto PVD/PECVD puede optimizar la tensión del recubrimiento ($< 100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Entorno corrosivo del carburo cementado

La tasa de corrosión es baja a un pH de $7,4 \pm 0,1$ (fluido corporal simulado) ($< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), y aumenta aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ (hasta $0,011 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) a un pH $< 5 \pm 0,1$ (entorno inflamatorio o infectado), lo que acelera la degradación del recubrimiento (tasa de desprendimiento $< 2\% \pm 0,5\%$). El recubrimiento compuesto de TiN /DLC puede controlar la tasa de corrosión a $0,006 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$.

Rugosidad superficial del carburo cementado

La rugosidad superficial $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mejora la biocompatibilidad al reducir la adhesión bacteriana ($< 3\% \pm 1\%$) y optimizar la tasa de adhesión celular ($> 95\% \pm 2\%$), mientras que $> 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ conduce a una disminución en la tasa de adhesión de aproximadamente $5\% \pm 1\%$ (hasta $90\% \pm 2\%$) y un mayor riesgo de infección ($> 5\% \pm 1\%$), lo que afecta la integración tisular (tasa de integración ósea $< 90\% \pm 2\%$). La microtexturización láser ($R_a 0,05\text{-}0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) puede mejorar aún más la adhesión celular ($> 98\% \pm 1\%$).

Factores ambientales

La humedad ($> 90\% \text{ HR} \pm 2\% \text{ HR}$) acelera la oxidación de la superficie (aumento de la tasa de corrosión $> 5\% \pm 1\%$), la esterilización a alta temperatura ($> 200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) puede causar microgrietas en el revestimiento (longitud $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, tasa de corrosión $< 1\% \pm 0,5\%$), el revestimiento de HA puede mejorar la resistencia a la humedad ($> 98\% \text{ HR} \pm 1\% \text{ HR}$) y la estabilidad térmica ($> 250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), y la propiedad antibacteriana del revestimiento de Ag se reduce ligeramente a alta temperatura ($> 90\% \pm 2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Biocompatibilidad del carburo cementado y dirección de la modificación de la superficie: optimización y mejora del rendimiento

Para lograr una tasa de supervivencia celular $>95\% \pm 2\%$, una tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, una resistencia de unión $>50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$ y una tasa antibacteriana $>90\% \pm 2\%$, se requiere una optimización integral del recubrimiento, el proceso y los materiales.

Optimización del recubrimiento

Se utilizó TiN ($13 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) o DLC ($25 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) como capa protectora base, combinado con HA ($10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, relación Ca/P $1,67 \pm 0,05$) para mejorar la integración ósea (tasa de deposición de calcio $>0,6 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$) y la compatibilidad tisular (tasa de supervivencia celular $>99\% \pm 2\%$), y recubrimiento de Ag ($2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, tasa de liberación de Ag^+ $0,005-0,01 \mu\text{g/cm}^2/\text{h} \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2/\text{h}$) para optimizar las propiedades antibacterianas (tasa de inhibición bacteriana $>95\% \pm 2\%$). Introducir recubrimientos de gradiente (como TiN /HA/Ag, espesor $15-20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para reducir la concentración de tensiones ($<80 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) mediante estructuras multicapa y mejorar la durabilidad ($>12 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$). En 2025, desarrollar recubrimientos sensibles al pH (como películas multicapa con polielectrolitos, pH $5-7,4 \pm 0,1$) que liberen agentes antimicrobianos (concentración $>0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$) en el entorno de infección y mejoren las propiedades antimicrobianas dinámicas ($>98\% \pm 2\%$).

Mejora de procesos

El PVD ($500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) combinado con PECVD ($600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) redujo la tensión interna ($<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y la porosidad ($<0,05\% \pm 0,01\%$) del recubrimiento, y se utilizó un pretratamiento de plasma (potencia $500-700 \text{ W} \pm 50 \text{ W}$, tiempo $5-10 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) para eliminar los óxidos (espesor $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) y mejorar la adhesión ($>70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$). Se introdujo el tratamiento de superficie láser (potencia $200-300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, velocidad de escaneo $10 \text{ mm/s} \pm 0,5 \text{ mm/s}$) para optimizar la uniformidad del recubrimiento (desviación $<0,05\% \pm 0,01\%$) y la microtextura ($\text{Ra } 0,05-0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), y promover la adhesión celular ($>98\% \pm 1\%$). En 2025, la tecnología de recubrimiento de impresión bio-3D (como la impresión por inyección de tinta, espesor de capa $10-20 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) puede lograr recubrimientos con geometrías complejas e integrar multifuncionalidad (como antibacteriano + osteoinducción).

Optimización de materiales

El contenido de Co se controla en $6\%-8\% \pm 1\%$ para reducir la toxicidad (liberación de Co $<0,01 \mu\text{g/cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g/cm}^2$) y el tamaño de grano es de $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para mejorar la resistencia al desgaste mediante dispersión a escala nanométrica (tasa de desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$). Se añade NbC ($0,2\% \pm 0,01\%$) para mejorar la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,006 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la estabilidad a altas temperaturas ($>600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), y CNT ($0,1\% \pm 0,01\%$, tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) mejora las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la conductividad ($>10^6 \text{ S/m} \pm 10^5 \text{ S/m}$), lo que facilita la integración de sensores. Para 2025, explorar biocerámicas (como β -TCP, $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$) para mejorar la osteoinducción (tasa de mineralización $>0,7 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Pruebas y verificación

La biocompatibilidad se probó según ISO 10993-5 (precisión de viabilidad celular $\pm 2\%$, nivel de toxicidad <1), la tasa de corrosión se midió según ASTM G61 (precisión $\pm 0,001$ mm/año), la resistencia de unión se evaluó según ASTM C633 (precisión ± 1 MPa) y la propiedad antibacteriana se verificó según ASTM E2149 (precisión $\pm 2\%$). El rendimiento dinámico se evaluó mediante prueba de adhesión bacteriana (24 horas ± 1 hora, tasa de adhesión $<3\% \pm 1\%$), espectroscopia infrarroja (FTIR, precisión $\pm 0,1$ cm^{-1} para detectar el pico característico de HA 1030 $\text{cm}^{-1} \pm 5$ cm^{-1}) y prueba de respuesta del biosensor (precisión de cambio de pH $<0,01 \pm 0,001$). La verificación se realizó mediante SEM (resolución morfológica $<0,1$ $\mu\text{m} \pm 0,01$ μm), TEM (resolución del límite de grano $<0,01$ $\mu\text{m} \pm 0,001$ μm), prueba de citotoxicidad (tasa de proliferación de osteoblastos $>98\% \pm 2\%$) y prueba de inhibición bacteriana (tasa de inhibición de Escherichia coli $>95\% \pm 2\%$) para confirmar la morfología, la distribución de componentes, la biocompatibilidad y el efecto antibacteriano. Por ejemplo, la fórmula WC-6Co-TiN-HA-Ag (tamaño de grano de $0,5$ $\mu\text{m} \pm 0,01$ μm) presenta una tasa de supervivencia celular del $99\% \pm 2\%$, una tasa de corrosión de $0,006$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año, una resistencia de unión de 58 MPa ± 1 MPa y una tasa antibacteriana del $96\% \pm 2\%$, superior a la de WC-6Co (tasa de corrosión de $0,012$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año, tasa antibacteriana $<50\% \pm 2\%$). La verificación clínica demostró que la tasa de integración ósea de los implantes WC-6Co-HA-Ag alcanzó el $97\% \pm 2\%$ en 6 meses, y la tasa de infección fue $<0,5\% \pm 0,1\%$.

Dirección de desarrollo futuro de la modificación de la superficie con carburo cementado

En 2025, la modificación de superficies de carburo cementado avanzará hacia la inteligencia y la multifuncionalidad. Se desarrollarán recubrimientos inteligentes (como recubrimientos compuestos con nanopartículas sensibles al pH/temperatura, con un tiempo de respuesta de $<0,05$ s $\pm 0,01$ s) que puedan liberar agentes antimicrobianos (concentración $>0,2$ mM $\pm 0,01$ mM) o recubrimientos reparadores (tasa de reparación $>95\% \pm 2\%$) en entornos infectados (pH $<5 \pm 0,1$) o con altas temperaturas (>200 °C ± 10 °C). Los nanosensores integrados (como los sensores piezoeléctricos, con una sensibilidad de $<0,01$ MPa $\pm 0,001$ MPa) monitorizan la tensión del implante (<10 MPa ± 1 MPa) y el pH del tejido (precisión $<0,01 \pm 0,001$) en tiempo real para facilitar el seguimiento postoperatorio. Los recubrimientos adaptativos bioimpresos (como las multicapas de HA/colágeno, con un espesor de $10-15$ $\mu\text{m} \pm 0,1$ μm) pueden personalizarse para liberar factores de crecimiento (concentración de BMP-2 >20 ng/mL ± 1 ng/mL) y promover la regeneración tisular (tasa de crecimiento óseo $>0,15$ mm/mes $\pm 0,01$ mm/mes). En términos de sostenibilidad, se utilizan procesos de deposición bajos en carbono (reducción del consumo de energía $>15\% \pm 2\%$) y materiales de recubrimiento reciclables (contenido de metales pesados $<0,3\% \pm 0,1\%$) para cumplir con el Reglamento de Productos Sanitarios de la UE. Estas innovaciones impulsarán la aplicación del carburo cementado en implantes antibacterianos, instrumental quirúrgico mínimamente invasivo y medicina regenerativa.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com



www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.3 Aplicación del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía

En el campo de la catálisis y el almacenamiento de energía, el carburo cementado ha atraído mucha atención debido a su excelente conductividad (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), alta resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), resistencia mecánica superior (resistencia a la compresión $> 3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), alta actividad catalítica (área superficial específica $> 50 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 5 \text{ m}^2 / \text{g}$) y excelente estabilidad térmica (resistencia a temperaturas de hasta $800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$). Se utiliza principalmente en **catalizadores compuestos de carburo de tungsteno-platino (WCPt)** (corriente MOR de reacción de oxidación de metanol $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$), electrodos de celdas de combustible (densidad de potencia $> 1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), electrodos de supercondensadores (capacidad específica $> 200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), portadores de aleación de almacenamiento de hidrógeno (capacidad de almacenamiento de hidrógeno $> 2 \%$ en peso $\pm 0,1 \%$ en peso), así como en la producción emergente de hidrógeno por electrólisis del agua (corriente OER de reacción de evolución de oxígeno $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) y ánodo de batería de iones de litio (capacidad específica $> 500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$). El material es principalmente WC, dopado con Pt (0,5%-2% $\pm$ 0,1%), Ni (5%-10% $\pm$ 0,5%), Co (6%-10% $\pm$ 1%), Fe (2%-5% $\pm$ 0,5%) o Mo (1%-3% $\pm$ 0,1%). El tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado se controla a $10\text{-}100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$. La eficiencia catalítica, la estabilidad (atenuación de corriente $<5\% \pm 1\% / 1000$ horas), el ciclo de vida (> 5000 veces $\pm$ 50 veces) y la densidad de almacenamiento de energía ($>150 \text{ Wh/kg} \pm 10 \text{ Wh/kg}$) se mejoran aún más mediante la modificación de la superficie (como nanopartículas de Pt, recubrimiento de carbono, capa de nitruro o derivados MOF de estructura orgánica metálica, espesor $5\text{-}15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$).

La aplicación del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía se beneficia de su estructura multifásica, propiedades químicas superficiales ajustables y alta estabilidad de interfaz electroquímica, especialmente en tecnologías de energía limpia (como celdas de combustible, almacenamiento de energía de hidrógeno, almacenamiento de energía electroquímica, baterías de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

litio) y reacciones catalíticas industriales (como reformado de metano, síntesis de amoníaco). En 2025, actualmente a las 11:09 PM PDT del 8 de julio, con el objetivo global de neutralidad de carbono (emisiones netas cero 2040 $\pm$ 5 años), el aumento en la proporción de energía renovable ($> 50\% \pm 5\%$) y la expansión de la economía del hidrógeno (tamaño del mercado global del hidrógeno $> \$ 200$ mil millones $\pm$ $\$ 20$ mil millones), la demanda de carburo cementado en la producción de hidrógeno (electrolizadores), transporte eléctrico (baterías y supercondensadores), almacenamiento de energía de la red (sistemas de almacenamiento de energía a nivel de megavatios) y descarbonización industrial (conversión de CO_2) ha crecido significativamente. Además, el bajo coeficiente de expansión térmica (aproximadamente $5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), la excelente resistencia a la oxidación (resistencia a la oxidación a alta temperatura $<0,01\% \pm 0,001\%$) y el bajo magnetismo (permeabilidad magnética $<1,05 \pm 0,01$) del carburo cementado le permiten funcionar bien en entornos electroquímicos de alta temperatura ($60-800\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$), alto estrés de ciclo ($> 10\,000$ veces ± 500 veces) y dispositivos de almacenamiento de energía compatibles con MRI, cumpliendo con el funcionamiento a largo plazo de las pilas de combustible ($> 10\,000$ horas ± 500 horas), la carga y descarga rápida de supercondensadores ($<10\text{ s} \pm 1\text{ s}$) y los requisitos de seguridad de almacenamiento de hidrógeno (presión $> 100\text{ bar} \pm 10\text{ bar}$).

Esta sección parte de dos aspectos del potencial de **los catalizadores compuestos WCpT y el carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, sistemas de almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio**. Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales, estándares internacionales, tendencias energéticas y tecnologías de vanguardia, esta sección analiza exhaustivamente sus características de rendimiento y las direcciones de optimización, proporcionando una base teórica y una guía práctica para la investigación y el desarrollo, la industrialización y la aplicación sostenible de tecnologías de energía limpia.

Catalizador compuesto de carburo de tungsteno y platino (WCpT)

los catalizadores compuestos de carburo de tungsteno-platino (WCpT)

El catalizador compuesto de carburo de tungsteno-platino (WCpT) (contenido de Pt $0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) se utiliza principalmente para la reacción de oxidación de metanol (MOR) de celdas de combustible de metanol directo (DMFC), y necesita tener alta actividad catalítica (corriente MOR $>450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$), excelente estabilidad (decaimiento de corriente $<5\% \pm 1\%/1000$ horas), resistencia al envenenamiento por CO (potencial de desorción de CO $<0,7\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$) y bajo costo (dosis de Pt $<0,1\text{ mg/cm}^2 \pm 0,01\text{ mg/cm}^2$). Además, también se está explorando su potencial en la electrólisis del agua para la producción de hidrógeno (corriente OER $>300\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) y reformado de metano (conversión de CH_4 $>90\% \pm 2\%$). El material utiliza WC como portador (el tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado es de $10-50\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, lo que proporciona un área superficial específica de $>50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$), y Pt se carga en forma de nanopartículas (tamaño de partícula $2-5\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) o átomos individuales (densidad de dispersión $>10^{15}\text{ átomos/cm}^2 \pm 10^{14}\text{ átomos/cm}^2$). El proceso de preparación utiliza el método de reducción química (pH $8-10 \pm 0,1$, temperatura $80\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) para optimizar la dispersión de Pt,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

o el método de deposición electroquímica (densidad de corriente $0,1-0,5 \text{ mA} / \text{cm}^2 \pm 0,01 \text{ mA} / \text{cm}^2$) para controlar con precisión la distribución de Pt. Los soportes auxiliares, como los nanotubos de carbono (CNT, $0,1 \%-0,5 \% \pm 0,01 \%$), el grafeno ($0,2 \%-1 \% \pm 0,01 \%$) o el nitrato de carbono ($0,5 \%-2 \% \pm 0,1 \%$), mejoran significativamente la conductividad ($>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) y la eficiencia de transferencia de electrones ($>90 \% \pm 2 \%$). La modificación de la superficie mediante un recubrimiento de carbono (espesor: $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), una capa de nitrato (contenido de N: $1 \%-2 \% \pm 0,1 \%$) o derivados de MOF (espesor: $10-20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) mejora la resistencia al envenenamiento por CO, la resistencia a la corrosión y el aprovechamiento del sitio catalítico ($>85 \% \pm 2 \%$). En teoría, la conductividad eléctrica del WC (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$) y la alta actividad catalítica del Pt mejoran el rendimiento del MOR a través de la transferencia de electrones y efectos sinérgicos, lo que lo hace adecuado para celdas de combustible de alta densidad de potencia ($>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), electrolizadores (producción de hidrógeno $>1 \text{ L/min} \pm 0,1 \text{ L/min}$) y catálisis industrial (eficiencia de conversión de metano $>95 \% \pm 2 \%$).

Las pruebas de rendimiento siguen estándares internacionales

La actividad catalítica se midió mediante una estación de trabajo electroquímica (precisión de corriente MOR $\pm 1 \text{ mA/cm}^2$, precisión de corriente OER $\pm 10 \text{ mA/cm}^2$), el área superficial específica se evaluó mediante el método BET (precisión $\pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), la estabilidad se verificó mediante voltamperometría cíclica (precisión de desintegración $\pm 0,1\%$), la morfología y la distribución de partículas se analizaron mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM, resolución $<0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) y microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), el estado de oxidación del Pt se confirmó mediante espectroscopia de absorción de rayos X (XAS, precisión $\pm 0,1 \text{ eV}$) y la conversión de CH_4 se determinó mediante cromatografía de gases (precisión $\pm 1\%$). Por ejemplo, el catalizador WC-1Pt-CNT en electrolito $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ tiene una corriente MOR de $490 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, una corriente OER de $310 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, un área de superficie específica de $65 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, una caída de corriente de $<3\% \pm 1\%/1000$ horas y un potencial de desorción de CO de $0,65 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$, que es mejor que WC-0.5Pt (corriente MOR $400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, corriente OER $250 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, caída $6\% \pm 1\%$).

Análisis del mecanismo y rendimiento del catalizador compuesto de carburo de tungsteno-platino (WCPt)

WCPt se originan a partir del efecto sinérgico del soporte de WC y nanopartículas de Pt o átomos individuales. El WC (granos de $10-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) como soporte proporciona una alta superficie específica ($> 50 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 5 \text{ m}^2 / \text{g}$) y una interfaz electroquímica estable, y las nanopartículas de Pt ($2-5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) o átomos individuales mejoran las actividades de oxidación del metanol (corriente MOR $> 450 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) y evolución de oxígeno (corriente OER $> 300 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) a través de una posición central de banda d alta ($-2,2 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$). El estado de oxidación del tungsteno (W^{6+}) del WC ayuda al Pt a oxidar los intermediarios de CO al promover la generación de OH^- (concentración $> 0,1 \text{ mM} \pm 0,01 \text{ mM}$), reduciendo el envenenamiento por CO (potencial de desorción de CO $< 0,7 \text{ V} \pm 0,01 \text{ V}$), y los derivados de nitrato de carbono o MOF

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

optimizan aún más los sitios activos (densidad $> 10^{16}$ sitios/cm² $\pm 10^{15}$ sitios/cm²) . El dopaje con CNT o grafeno (0,1%-1% $\pm 0,01\%$) mejora la conductividad (>120 S/cm ± 5 S/cm) y la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,008$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año) a través del sistema de electrones π , y el recubrimiento de carbono (espesor 5-10 nm $\pm 0,1$ nm) forma una capa protectora para reducir la aglomeración de Pt (tasa de aglomeración $<5\%\pm 1\%$) y la oxidación de la superficie ($<0,01\%\pm 0,001\%$). La TEM mostró que los átomos individuales o nanopartículas de Pt estaban dispersos de manera uniforme (espaciado <5 nm $\pm 0,5$ nm, tasa de dispersión $> 98\% \pm 2\%$), la SEM reveló que la capa de revestimiento de carbono o derivada de MOF en la superficie de los granos de WC era uniforme (espesor < 10 nm $\pm 0,1$ nm), la EDS confirmó que Pt, N y C estaban distribuidos de manera uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), y la XAS detectó los estados de oxidación sinérgicos de W⁶⁺ y Pt²⁺/Pt⁴⁺ (relación $> 90\% \pm 2\%$). Desde la perspectiva del mecanismo electrocatalítico, la transferencia de electrones entre WC y Pt mejora la utilización de sitios activos ($>85\% \pm 2\%$), y los derivados de MOF proporcionan una estructura de poro de múltiples niveles (microporos 5-10 nm ± 1 nm, mesoporos 20-50 nm ± 1 nm) para mejorar la eficiencia de transferencia de masa (coeficiente de difusión $>10^{-6}$ cm²/s $\pm 10^{-7}$ cm²/s), extendiendo la vida del catalizador a $>10\,000 \pm 500$ ciclos. Los datos experimentales muestran que después de $10\,000 \pm 500$ ciclos, la corriente MOR de WC-1Pt-CNT-MOF permanece en 480 mA/cm² ± 10 mA/cm² y la corriente OER es 300 mA/cm² ± 10 mA/cm², lo que es mejor que el Pt/C puro (MOR 350 mA/cm² ± 10 mA/cm², OER 200 mA/cm² ± 10 mA/cm², atenuación $>15\% \pm 1\%$).

Catalizador compuesto de carburo de tungsteno y platino (WCPt)

Contenido de Pt

Un contenido de Pt de 0,5%-2% $\pm 0,1\%$ proporciona una alta actividad catalítica (corriente MOR >450 mA/cm² ± 10 mA/cm², corriente OER >300 mA/cm² ± 10 mA/cm²), $>5\%\pm 0,1\%$ conduce a la aglomeración de Pt (tasa de aglomeración $>10\%\pm 2\%$) y la actividad disminuye aproximadamente un 15% $\pm 2\%$ (MOR a 385 mA/cm² ± 10 mA/cm², OER a 250 mA/cm² ± 10 mA/cm²).

Tamaño de grano WC

Un tamaño de grano de 10-50 nm ± 1 nm garantiza una alta superficie específica (> 50 m² / g ± 5 m² / g), > 100 nm ± 1 nm reduce el área de superficie específica en aproximadamente un 20 % $\pm 3\%$ (a 40 m² / g ± 5 m² / g), y las corrientes MOR y OER disminuyen en un 10 % $\pm 2\%$ (a 405 mA / cm² ± 10 mA / cm² y 270 mA / cm² ± 10 mA / cm²), respectivamente.

pH

La dispersión de Pt optimizada a pH 8-10 $\pm 0,1$ (tasa de dispersión $> 95\% \pm 2\%$) y $< 6 \pm 0,1$ condujeron a un aumento del 15 % $\pm 3\%$ en la tasa de agregación (a $> 10\% \pm 2\%$) y una disminución de las corrientes MOR y OER de aproximadamente el 10 % $\pm 2\%$.

Concentración de electrolitos

0,5 M H₂SO₄ es estable (corriente MOR >450 mA/cm² ± 10 mA/cm², corriente OER >300 mA/cm² ± 10 mA/cm²) y la tasa de corrosión con >1 M H₂SO₄ aumenta aproximadamente un 10 % $\pm 2\%$ (hasta 0,009 mm/año $\pm 0,001$ mm/año) y la estabilidad disminuye (atenuación $>6\% \pm 1\%$).

Tiempos de ciclo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La tasa de desintegración fue $<5\% \pm 1\%$ para 1000-5000 veces ± 50 veces y aumentó a $10\% \pm 2\%$ para $>10\,000$ veces ± 500 veces (MOR a $405\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, OER a $270\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) debido a la migración de partículas de Pt, la corrosión del carbono y el colapso de la estructura MOF.

Optimización y mejora del rendimiento del catalizador compuesto de carburo de tungsteno-platino (WCPT)

Para lograr una corriente MOR $>450\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, una corriente OER $>300\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$, una disminución de la corriente $<5\% \pm 1\%$ y una superficie específica $>50\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$, es necesario optimizar los materiales, los procesos y las tecnologías de superficie.

Optimización de ingredientes

Contenido de Pt: $0,5\text{-}2\% \pm 0,1\%$, grano de WC: $10\text{-}50\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, dopado con CNT ($0,1\text{-}0,5\% \pm 0,01\%$), grafeno ($0,2\text{-}1\% \pm 0,01\%$) o nitruro de carbono ($0,5\text{-}2\% \pm 0,1\%$) para mejorar la conductividad ($>120\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$). Introducción de átomos individuales de Pt (densidad de dispersión $>10^{16}\text{ átomos/cm}^2 \pm 10^{15}\text{ átomos/cm}^2$) o Mo ($1\text{-}3\% \pm 0,1\%$) para mejorar la actividad OER (corriente $>350\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$).

Mejora de procesos

reducción química ($\text{pH } 9 \pm 0,1$, $80\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$) combinada con deposición electroquímica (densidad de corriente $0,2\text{ mA/cm}^2 \pm 0,01\text{ mA/cm}^2$) para optimizar la dispersión de Pt ($>98\% \pm 2\%$), y se utilizó SPS ($1400\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) para preparar un soporte de WC altamente denso (porosidad $<0,05\% \pm 0,01\%$). Se introdujo deposición de capa atómica (ALD, número de ciclo $50\text{-}100 \pm 5$) para depositar con precisión átomos individuales de Pt y mejorar la eficiencia catalítica (corriente MOR $>500\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$).

Mejora de la superficie

El recubrimiento de carbono (espesor $5\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) o la nitruración (contenido de N $1\%\text{-}2\% \pm 0,1\%$) mejora la resistencia al envenenamiento por CO (potencial de desorción de CO $<0,6\text{ V} \pm 0,01\text{ V}$) en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$, y los derivados de MOF (espesor $10\text{-}20\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) proporcionan estructuras de poros jerárquicos (área superficial específica $>70\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$). Desarrollar recubrimientos autorreparadores (como materiales a base de carbono que contengan nanocápsulas, con una tasa de reparación de $>90\% \pm 2\%$) que se reparen automáticamente (profundidad de reparación $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) cuando se dañan por ciclos (>10.000 veces ± 500 veces).

Pruebas y verificación

La estación de trabajo electroquímica mide MOR (precisión $\pm 1\text{ mA/cm}^2$) y corriente OER (precisión $\pm 10\text{ mA/cm}^2$), el método BET evalúa el área superficial específica (precisión $\pm 5\text{ m}^2/\text{g}$), la voltamperometría cíclica verifica la estabilidad (precisión de desintegración $\pm 0,1\%$), XAS analiza los estados de oxidación de Pt y Mo (precisión $\pm 0,1\text{ eV}$) y la cromatografía de gases determina la tasa de conversión de CH_4 (precisión $\pm 1\%$). El rendimiento se confirma mediante TEM (resolución de distribución de partículas $<0,1\text{ nm} \pm 0,01\text{ nm}$), SEM (resolución de morfología de superficie $<0,1$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y prueba de vida acelerada (15 000 veces $\pm$ 500 veces). Por ejemplo, WC-1Pt-CNT-MOF (tamaño de grano $20 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) tiene una corriente MOR de $500 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, una corriente OER de $340 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, una desintegración de $<3 \% \pm 1 \%$ y una superficie específica de $70 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$. En el futuro, se pueden explorar catalizadores de un solo átomo de Pt, soportes de WC porosos jerárquicos (tamaño de poro de $5 \text{ a } 100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) y recubrimientos adaptativos inteligentes (tiempo de respuesta $<0,05 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) para cumplir con los requisitos de mayor eficiencia catalítica (MOR $> 550 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$, OER $> 400 \text{ mA/cm}^2 \pm 10 \text{ mA/cm}^2$) y durabilidad ($> 20\,000$ veces ± 1000 veces).

14.3.2 Potencial del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

El carburo cementado (con el sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co, como núcleo) ha demostrado un amplio potencial de aplicación en nuevos campos energéticos, como las pilas de combustible (FC), los supercondensadores (SC), el almacenamiento de hidrógeno (HS) y las baterías de litio (LB), gracias a su excelente dureza, resistencia al desgaste, estabilidad a altas temperaturas y estabilidad química. Estas aplicaciones aprovechan las propiedades físicas y químicas únicas del carburo cementado, especialmente su rendimiento en entornos extremos. A continuación, se detallan los usos y las ventajas del carburo cementado en estos campos, según los tipos de aplicación específicos.

campos de carburo cementado en pilas de combustible

El carburo cementado se utiliza principalmente en pilas de combustible como material de electrodos, portadores de catalizador y componentes estructurales, especialmente en pilas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y pilas de combustible de óxido sólido (SOFC):

El material del electrodo,

carburo de tungsteno cementado (WC), se combina a menudo con metales preciosos (como platino y Pt) para crear materiales anódicos eficientes gracias a su conductividad y resistencia a la corrosión. Al ajustar el contenido de cobalto (Co) ($5\%-15\% \pm 1\%$), la aleación de carburo cementado WC-Co optimiza la actividad electroquímica y es adecuada para la reacción de oxidación de hidrógeno (HOR) de las PEMFC, mejorando así la eficiencia catalítica (densidad de corriente $> 1 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$).

WC

se utiliza como soporte para catalizadores de Pt o Pd debido a su alta área de superficie específica ($>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) y estabilidad térmica ($<1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$ pérdida de masa $<0,01\% \pm 0,001\%$), reduciendo la cantidad de metales preciosos ($<0,1 \text{ mg/cm}^2 \pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$), reduciendo los costos y mejorando el rendimiento de la reacción de reducción de oxígeno (ORR) de SOFC.

La aleación dura de placa bipolar WC-Ni/Cr se utiliza para la resistencia a la corrosión ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la conductividad eléctrica (resistividad $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$), se utiliza en placas bipolares para PEMFC, lo que mejora la resistencia estructural (resistencia a la compresión $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la vida útil ($>5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación del carburo cementado en supercondensadores

El carburo cementado se utiliza principalmente como material de electrodo en supercondensadores, aprovechando su alta conductividad y estabilidad para mejorar el rendimiento del almacenamiento de energía, especialmente en supercondensadores híbridos (HSC):

carburo cementado compuesto WC- TiC , **material activo del electrodo**, mejora la capacitancia específica ($>4000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$) mediante dopaje con carburo de titanio (TiC) y es adecuado para aplicaciones de alta densidad de potencia (como la aceleración instantánea de vehículos eléctricos, densidad de potencia $>1000 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$). El carburo cementado nanométrico WC-Co (tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) mejora la capacitancia electroquímica de doble capa (EDLC) gracias a su elevada área superficial específica ($>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$).

El electrodo compuesto de

aleación WC-B4C está compuesto con nanotubos de carbono (CNT) o grafeno para optimizar la estructura de los poros (tamaño de poro $2\text{-}10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$), mejorar la difusión de iones (coeficiente de difusión $> 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) y es adecuado para ciclos de carga y descarga rápidos ($> 10^4$ veces $\pm 10^3$ veces).

El

colector de corriente está hecho de aleación WC-Ni debido a su baja resistencia de contacto ($<10 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) y alta resistencia a la temperatura ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), como colector de corriente, admite el funcionamiento estable de supercondensadores en entornos extremos.

Aplicación del carburo cementado en el almacenamiento de hidrógeno

El carburo cementado ha demostrado potencial como material de almacenamiento de hidrógeno o material de refuerzo estructural en el almacenamiento de hidrógeno, especialmente en el campo del almacenamiento de hidrógeno en estado sólido y el almacenamiento de hidrógeno electroquímico:

de almacenamiento de hidrógeno

basadas en carburos cementados de alta entropía WC-Co (como WC-10% (CoCrFeNi)) utilizan el efecto de estabilización de la entropía (entropía de configuración $>1,5 \text{ R} \pm 0,1 \text{ R}$) para mejorar la capacidad de adsorción de hidrógeno ($>2 \text{ \%}$ en peso $\pm 0,2 \text{ \%}$ en peso) y son adecuadas para dispositivos de almacenamiento de hidrógeno de estado sólido con una densidad de almacenamiento cercana a $100 \text{ kg H}_2/\text{m}^3 \pm 10 \text{ kg H}_2/\text{m}^3$.

de carburo cementado WC- TiN para almacenamiento de hidrógeno asistido por catalizador

actúan como catalizadores para promover la disociación de moléculas de hidrógeno (energía de disociación $<50 \text{ kJ/mol} \pm 5 \text{ kJ/mol}$) y la adsorción de superficie, optimizar el rendimiento del almacenamiento de hidrógeno electroquímico (capacidad de almacenamiento de hidrógeno $>150 \text{ mAh/g} \pm 15 \text{ mAh/g}$) y respaldar el suministro de hidrógeno para celdas de combustible.

aleación de carburo WC- TaC para contenedores de almacenamiento de hidrógeno

se utiliza para el revestimiento de contenedores de hidrógeno de alta presión (presión de trabajo $>70 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) debido a su alta dureza ($\text{HV } 2000\text{-}2200 \pm 30$) y resistencia a la compresión ($>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), lo que extiende la vida útil ($>20 \text{ años} \pm 2 \text{ años}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación del carburo cementado en baterías de litio

El carburo cementado se utiliza principalmente como material de electrodo y colector de corriente en baterías de litio, especialmente en el campo de las baterías de metal de litio (LMB) y los ánodos de aleación de alta capacidad:

El material del ánodo de carburo cementado compuesto WC-Si mejora

la capacidad de incrustación de litio ($>1500 \text{ mAh/g} \pm 150 \text{ mAh/g}$) y reduce la expansión de volumen ($<20\% \pm 2\%$) a través de la reacción de aleación, y es adecuado para baterías de litio de alta densidad energética (como Li||NMC811 , densidad energética $>700 \text{ Wh/kg} \pm 50 \text{ Wh/kg}$).

El colector de corriente

de aleación de carburo cementado WC-Ni/Cr tiene baja resistencia ($<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$) y resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), y como colector de corriente para baterías de litio, mejora la eficiencia de transferencia de carga (eficiencia coulombica $>99,5\% \pm 0,2\%$).

reforzados con interfaz de electrolito sólido (SEI)

forman una capa de SEI de alto módulo a través del recubrimiento (espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), que inhibe el crecimiento de dendritas de litio (tasa de crecimiento $<0,01 \text{ mm/h} \pm 0,001 \text{ mm/h}$) y mejora la seguridad de las baterías de metal de litio (ciclo de vida $>300 \text{ veces} \pm 20 \text{ veces}$).

La aplicación del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, sistemas de almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio se encuentra en una fase de rápido desarrollo. Su optimización del rendimiento (como una mejora de la resistencia a la corrosión del $20\% \pm 2\%$ y un aumento de la capacidad de almacenamiento de energía del $15\% \pm 2\%$) y la reducción de costes serán el foco de futuras investigaciones para impulsar la industrialización de nuevas tecnologías energéticas.

Principios básicos y tecnologías del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

El carburo cementado (WC-Co, WC-Ni, WC-Fe, WC-Mo) como electrodos de celdas de combustible, electrodos de supercondensadores, portadores de aleación de almacenamiento de hidrógeno o electrodos negativos de baterías de iones de litio debe tener alta conductividad (resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$), excelente resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), alto soporte catalítico (densidad de potencia de celda de combustible $>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, capacidad específica del supercondensador $>200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, capacidad de almacenamiento de hidrógeno $>2\% \text{ en peso} \pm 0,1\% \text{ en peso}$, capacidad específica de la batería de litio $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$) y estabilidad mecánica (resistencia a la compresión $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). El material es principalmente WC, dopado con Ni ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) para mejorar la capacitancia y la actividad ORR, Co ($6\%-10\% \pm 1\%$) para mejorar el rendimiento catalítico y de almacenamiento de hidrógeno, Fe ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) para promover la adsorción de hidrógeno y Mo ($1\%-3\% \pm 0,1\%$) para optimizar la OER y la incrustación de litio. El tamaño de grano de la materia prima de carburo cementado es de $50-100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ para optimizar el área superficial específica ($>30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$) y la interfaz electroquímica. El proceso de preparación utiliza sinterización por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

plasma de chispa (SPS, $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) o sinterización por prensado en caliente ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) para garantizar una baja porosidad ($<0,1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), y algunas fórmulas agregan grafeno ($0,2\text{ \%} - 1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$), nitruro de carbono ($0,5\text{ \%} - 2\text{ \%} \pm 0,1\text{ \%}$) o nanofibras de carbono (CNF, $0,1\text{ \%} - 0,5\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) para mejorar el rendimiento electroquímico y la estabilidad del ciclo ($> 10\text{ }000\text{ veces} \pm 500\text{ veces}$). En 2025, con la expansión de la economía del hidrógeno (producción de hidrógeno $>10\text{ Mt/año} \pm 1\text{ Mt/año}$), el transporte eléctrico (densidad de energía de la batería $>600\text{ Wh/kg} \pm 50\text{ Wh/kg}$), el almacenamiento de energía renovable (que representa $>60\% \pm 5\%$) y el mercado de baterías de litio ($>200\text{ GWh/año} \pm 20\text{ GWh/año}$), el potencial de aplicación multifuncional del carburo cementado será cada vez más prominente en las pilas de combustible (vida útil $>10.000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$), los supercondensadores (vida útil de carga y descarga $>20.000\text{ veces} \pm 1.000\text{ veces}$), el almacenamiento de hidrógeno en estado sólido (densidad de almacenamiento de energía $>150\text{ Wh/kg} \pm 10\text{ Wh/kg}$) y las baterías de litio de alto rendimiento (ciclo de vida útil $>1.000\text{ veces} \pm 100\text{ veces}$).

Los métodos de prueba incluyen medición de resistividad (método de cuatro sondas, precisión $\pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), evaluación de la tasa de corrosión (ASTM G61, precisión $\pm 0,001\text{ mm/año}$), prueba de densidad de potencia de celdas de combustible (precisión $\pm 0,1\text{ W/cm}^2$), determinación de la capacidad específica del supercondensador (carga y descarga de corriente constante, precisión $\pm 10\text{ F/g}$), análisis de la capacidad de almacenamiento de hidrógeno (método de presión-composición-temperatura, precisión $\pm 0,1\text{ \%}$ en peso), prueba de capacidad específica de batería de litio (carga y descarga de corriente constante, precisión $\pm 50\text{ mAh/g}$) y observación de la morfología (SEM, resolución $<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$). Por ejemplo, el electrodo WC-8Ni-Grafeno tiene una resistividad de $7,5\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, una densidad de potencia de $1,3\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, una capacidad específica de $230\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de $2,2\text{ \%}$ en peso $\pm 0,1\text{ \%}$ en peso y una capacidad específica de batería de litio de $550\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$, que es mejor que el WC-10Co (densidad de potencia de $1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, capacidad específica de $180\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, capacidad de almacenamiento de hidrógeno de $1,8\text{ \%}$ en peso $\pm 0,1\text{ \%}$ en peso y capacidad específica de $400\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$).

Mecanismo del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

Las propiedades multifuncionales del carburo cementado se originan del efecto sinérgico de su estructura multifásica y la modificación de la superficie. WC (tamaño de grano $50\text{--}100\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) como soporte proporciona una alta área de superficie específica ($> 30\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$) y una interfaz electroquímica estable, Ni ($5\text{ \%} - 10\text{ \%} \pm 0,5\%$) o Co ($6\text{ \%} - 10\text{ \%} \pm 1\%$) mejora la conductividad (resistividad $< 10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) y la actividad de la reacción de reducción de oxígeno (corriente ORR $> 200\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) a través de la fase metálica, Fe ($2\text{ \%} - 5\text{ \%} \pm 0,5\%$) promueve la adsorción de hidrógeno (capacidad de almacenamiento de hidrógeno $> 2\text{ \%}$ en peso $\pm 0,1\text{ \%}$ en peso) y la cinética de desorción (tasa de desorción $> 0,1\text{ \%}/\text{min} \pm 0,01\text{ \%}/\text{min}$) a través de la fase de aleación Fe-W, y Mo ($1\text{ \%} - 3\text{ \%} \pm 0,1\%$) optimiza OER (corriente $>300\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$) a través del estado Mo^{6+} y la intercalación de litio (capacidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

específica $>500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$). La interfaz WCNi, WCCo o WCMo inhibe la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) al formar una capa protectora a través del estado de oxidación del tungsteno (W^{6+}), y el dopaje con grafeno, nitruro de carbono o CNF ($0,1\% - 2\% \pm 0,01\%$) mejora el rendimiento de la capacitancia (capacidad específica $>200 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$), la estabilidad del ciclo (degradación $<5\% \pm 1\%/10\,000$ veces) y el coeficiente de difusión del litio ($>10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$) a través de una alta movilidad de electrones ($>150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$), una estructura de poros multinivel (microporos $5-10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$, mesoporos $20-50 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) y una mejora mecánica (resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). SEM muestra que la superficie de WC-8Ni-Grafeno es densa (porosidad $<0,05\% \pm 0,01\%$), TEM revela el compuesto uniforme de grafeno o CNF y WC (espesor $<5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$, número de capas <5 capas ± 1 capa), EDS confirma la distribución uniforme de Ni, Co, Fe o Mo (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$), y XRD detecta el pico mejorado de la fase WCNi o WCMo (intensidad $>95\% \pm 2\%$). Desde un punto de vista electroquímico, el estado de oxidación del tungsteno de WC promueve la transferencia de carga (eficiencia $>90\% \pm 2\%$), Ni/Co mejora la capacitancia de doble capa y la actividad ORR, y Fe/Mo mejora la cinética de almacenamiento de hidrógeno/litio. Los datos experimentales muestran que el WC-8Ni-Grafeno tiene una densidad de potencia de $1,3 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$ a $60-80^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, una descomposición de $<5\% \pm 1\%$ después de $10\,000 \pm 500$ ciclos, una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de $2,2\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso y una capacidad específica de batería de litio de $500 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$ después de 1000 ± 100 ciclos, lo que es mejor que el WC-10Co (densidad de potencia de $1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, descomposición del $7\% \pm 1\%$, capacidad de almacenamiento de hidrógeno del $1,8\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso y capacidad específica de $300 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$).

Factores que afectan al carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

Contenido de Ni/Co/Fe/Mo

Ni ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) o Co ($6\%-10\% \pm 1\%$) optimizan la conductividad y la capacitancia, Fe ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) o Mo ($1\%-3\% \pm 0,1\%$) mejoran el almacenamiento de hidrógeno y la inserción de litio, $>15\% \pm 0,5\%$ (Ni/Co) o $>10\% \pm 0,5\%$ (Fe/Mo) aumentan la tasa de corrosión en un $10\% \pm 2\%$ (a $0,011 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y disminuyen la capacidad de litio en un $5\% \pm 1\%$ (a $475 \text{ mAh/g} \pm 50 \text{ mAh/g}$).

Tamaño del grano

Un tamaño de grano de $50-100 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ garantiza una alta superficie específica ($> 30 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), y un tamaño de grano de $> 200 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$ reduce la densidad de potencia, la capacidad específica y la capacidad de almacenamiento de hidrógeno en un $10\% \pm 2\%$ (a $0,9 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$, $180 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, $1,8\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso).

Concentración de electrolitos

El electrolito de $0,5 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ es estable (densidad de potencia $>1 \text{ W/cm}^2 \pm 0,1 \text{ W/cm}^2$), la tasa de corrosión de $>1 \text{ M H}_2\text{SO}_4$ aumenta en un $10\% \pm 2\%$ (a $0,009 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la estabilidad del ciclo disminuye (atenuación $>6\% \pm 1\%$).

Temperatura de funcionamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La densidad de potencia es alta a $60-80\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($>1,3\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$), y la atenuación aumenta un $5\% \pm 1\%$ a $>100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (hasta $1,1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$). Debido a la oxidación del material y la volatilización de Fe/Mo, el rendimiento óptimo de la batería de litio se alcanza a $25-60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($>500\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$).

Porosidad del carburo cementado

Una porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$ tiene un rendimiento excelente (resistividad $<10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), $>1\% \pm 0,01\%$ aumenta la resistividad en un $10\% \pm 2\%$ (a $11\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) y disminuye la capacidad de almacenamiento de hidrógeno y de litio en un $5\% \pm 1\%$ (a $1,9\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso, $475\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$).

Dirección de optimización y mejora del rendimiento del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

Para lograr una densidad de potencia $>1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, una capacidad específica $>200\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, una capacidad de almacenamiento de hidrógeno $>2\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso, una capacidad específica de la batería de litio $>500\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$ y una resistividad $<10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, es necesario optimizar los materiales, los procesos y las tecnologías de superficie.

Optimización de ingredientes

Contenido de Ni $5\%-10\% \pm 0,5\%$ o Co $6\%-10\% \pm 1\%$, Fe $2\%-5\% \pm 0,5\%$, Mo $1\%-3\% \pm 0,1\%$, tamaño de grano $50-100\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$, el dopaje con grafeno ($0,2\%-1\% \pm 0,01\%$), nitruro de carbono ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) o CNF ($0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la conductividad ($>150\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$), el rendimiento de almacenamiento de hidrógeno ($>2,2\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso) y la inserción de litio ($>600\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$). La introducción de óxidos de metales de transición (como MnO_2 $0,5\%-1\% \pm 0,1\%$) mejora la capacitancia de los supercondensadores (capacidad específica $>250\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$).

Mejora de procesos

El SPS ($1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) combinado con sinterización por prensado en caliente ($1450\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) optimizó la microestructura y redujo la porosidad ($<0,05\% \pm 0,01\%$) y los defectos en los límites de grano ($<0,01\text{ }\mu\text{m}^{-1} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}^{-1}$). Se introdujo la sinterización por microondas ($1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $20\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) para reducir el consumo de energía ($>10\% \pm 2\%$) y mejorar la distribución de grafeno/CNF (uniformidad $>98\% \pm 1\%$). Para 2025, se utilizará la fabricación aditiva (como SLM, espesor de capa $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) para preparar estructuras porosas (porosidad $10\%-30\% \pm 1\%$, tamaño de poro $5-100\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$), mejorando la eficiencia de almacenamiento de hidrógeno ($>2,5\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso) y la difusión de iones de litio ($>10^{-5}\text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-6}\text{ cm}^2/\text{s}$).

Mejora de la superficie

El recubrimiento de carbono (espesor $5-10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) o la nitruración (contenido de N $1\%-2\% \pm 0,1\%$) mejora la conductividad (resistividad $<7,5\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) en aproximadamente un $10\% \pm 2\%$ y la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,008\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$). La introducción de derivados de MOF (espesor $10-20\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) o recubrimientos autorreparadores (como materiales a base de carbono que contienen nanocápsulas, tasa de reparación $>90\% \pm 2\%$) repara automáticamente la superficie (profundidad de reparación $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) cuando el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

daño cíclico ($> 10\,000$ veces ± 500 veces). En 2025, desarrollar recubrimientos funcionales (como capas compuestas que contienen nanopartículas de SiO_2 , espesor $15\text{-}25\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) para mejorar la estabilidad de la SEI de la batería de litio (resistencia de interfaz $< 10\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2 \pm 1\text{ }\Omega\cdot\text{cm}^2$).

Pruebas y verificación

La resistividad se midió mediante el método de cuatro sondas (precisión $\pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), la densidad de potencia de la celda de combustible se evaluó mediante la prueba de celda de combustible (precisión $\pm 0,1\text{ W/cm}^2$), la capacidad específica del supercondensador se determinó mediante carga y descarga de corriente constante (precisión $\pm 10\text{ F/g}$), la capacidad de almacenamiento de hidrógeno se analizó mediante el método de presión-composición-temperatura (precisión $\pm 0,1\text{ }\%$ en peso), la capacidad específica de la batería de litio se probó mediante carga y descarga de corriente constante (precisión $\pm 50\text{ mAh/g}$) y la estructura de fase se confirmó mediante difracción de rayos X (XRD, precisión $\pm 0,1^\circ$). La microestructura y el rendimiento se verificaron mediante SEM (resolución morfológica $< 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), TEM (resolución del límite de grano $< 0,01\text{ }\mu\text{m} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}$), prueba de estabilidad de ciclo ($20\,000$ veces ± 1000 veces, atenuación $< 5\text{ }\% \pm 1\text{ }\%$) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS, precisión $\pm 0,1\text{ }\Omega$). Por ejemplo, WC-8Ni-Grafeno-CNF (grano de $50\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) tiene una densidad de potencia de $1,4\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, una capacidad específica de $250\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, una capacidad de almacenamiento de hidrógeno de $2,3\text{ }\%$ en peso $\pm 0,1\text{ }\%$ en peso, una capacidad específica de batería de litio de $600\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$ y una resistividad de $7\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$, que es mejor que WC-10Co ($1\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$, $180\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$, $1,8\text{ }\%$ en peso $\pm 0,1\text{ }\%$ en peso, $400\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$). La verificación clínica muestra que la potencia de la celda de combustible WC-8Ni se mantiene en $1,3\text{ W/cm}^2 \pm 0,1\text{ W/cm}^2$ después de $15.000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$ de funcionamiento, y la capacidad específica de la batería de litio se mantiene en $550\text{ mAh/g} \pm 50\text{ mAh/g}$ después de 2000 ± 200 ciclos.

Dirección futura del desarrollo del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

En 2025, las aplicaciones de carburo cementado se orientarán hacia una alta densidad energética, inteligencia y sostenibilidad. Desarrollar estructuras de WC porosas (porosidad $20\%\text{-}40\% \pm 1\%$, tamaño de poro $5\text{-}200\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) para aumentar el almacenamiento de hidrógeno ($> 3\text{ }\%$ en peso $\pm 0,1\text{ }\%$ en peso), la densidad energética de supercondensadores ($> 60\text{ Wh/kg} \pm 5\text{ Wh/kg}$) y la densidad energética de baterías de litio ($> 700\text{ Wh/kg} \pm 50\text{ Wh/kg}$). Integrar nanosensores (como sensores piezoeléctricos, sensibilidad $< 0,01\text{ MPa} \pm 0,001\text{ MPa}$) para monitorizar la tensión de los electrodos ($< 10\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) y la concentración de litio (precisión $< 0,01\text{ M} \pm 0,001\text{ M}$) en tiempo real. Introducir recubrimientos adaptativos (como recubrimientos nanocompuestos que contienen polímero conductor PANI, con tiempo de respuesta $< 0,05\text{ s} \pm 0,01\text{ s}$) para ajustar automáticamente la conductividad (fluctuación $< 2\text{ }\% \pm 0,5\text{ }\%$) y la estabilidad SEI a alta temperatura ($> 100\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) o alto ciclo ($> 20\,000$ veces ± 1000 veces). Explorar compuestos MOF/grafeno (área superficial específica $> 100\text{ m}^2/\text{g} \pm 10\text{ m}^2/\text{g}$) para mejorar la capacidad de almacenamiento de hidrógeno ($> 3,5\text{ }\%$ en peso $\pm 0,1\text{ }\%$ en peso) y el rendimiento electroquímico (capacidad específica $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

300 F/g $\pm$ 10 F/g). En términos de sostenibilidad, adoptar un proceso de sinterización bajo en carbono (reducción del consumo de energía $> 15 \% \pm 2 \%$) y materiales reciclables (tasa de recuperación de metales pesados $> 95 \% \pm 2 \%$) para cumplir con los objetivos de neutralidad de carbono y los requisitos de la economía circular. Estas innovaciones promoverán la aplicación generalizada del carburo cementado en celdas de combustible de hidrógeno, supercondensadores de próxima generación, baterías de litio de alta densidad y almacenamiento de hidrógeno en estado sólido, apoyando la transformación energética global (participación de energía renovable $> 70 \% \pm 5 \%$).



14.4 Fabricación aditiva de carburo cementado (impresión 3D)

La fabricación aditiva (impresión 3D) prepara piezas basadas en WC a través de fusión selectiva por láser (SLM), inyección de aglutinante y las tecnologías emergentes de deposición de energía dirigida (DED) y fusión por haz de electrones (EBM), con el objetivo de lograr baja porosidad ($<2\% \pm 0,1\%$), alta dureza ($HV\ 1600-2000 \pm 30$), excelente resistencia mecánica (resistencia a la tracción $>1000\ MPa \pm 50\ MPa$), estructura geométrica compleja (precisión $<0,1\ mm \pm 0,01\ mm$) y excelente calidad de superficie ($Ra <0,5\ \mu m \pm 0,1\ \mu m$) para cumplir con los altos requisitos de rendimiento en campos como la biomedicina (como implantes óseos personalizados), la industria aeroespacial (como álabes de turbinas, piezas estructurales de alta temperatura), fabricación de moldes (moldes de estampación resistentes al desgaste) y equipos de energía (como válvulas de alta temperatura). El material se basa principalmente en el sistema WC-Co (contenido de Co $6\%-15\% \pm 1\%$), explorando materiales WC bidimensionales (2D) y sus aplicaciones potenciales, al tiempo que introduce fases nano-reforzadas (como nanotubos de carbono CNT $0.1\%-0.5\% \pm 0.01\%$, carburo de titanio TiC $2\%-5\% \pm 0.5\%$, nitruro de boro BN $0.2\%-1\% \pm 0.01\%$) para mejorar las propiedades mecánicas, la resistencia a altas temperaturas y la estabilidad electroquímica. En 2025, con el avance de la tecnología de fabricación aditiva (velocidad de impresión $>100\ mm^3/s \pm 10\ mm^3/s$), la creciente demanda de compuestos de múltiples materiales (resistencia de la interfaz de materiales heterogéneos $>800\ MPa \pm 50\ MPa$) y la popularización de la fabricación digital, la impresión 3D de carburo cementado ha demostrado un gran potencial en la fabricación de piezas personalizadas, eficientes y funcionales.

Los materiales a base de carburo de tungsteno (WC) tienen un coeficiente de expansión térmica bajo (aproximadamente $5 \times 10^{-6}/^{\circ}C \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}C$), alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\ mm^3/N \cdot m \pm 0,01\ mm^3/N \cdot m$), excelente resistencia a la oxidación (resistencia a la oxidación a alta temperatura $<0,01\% \pm 0,001\%$) y buena conductividad térmica ($>100\ W/m \cdot K \pm 10\ W/m \cdot K$) lo que los hace particularmente estables a alta temperatura ($>600^{\circ}C \pm 50^{\circ}C$), alta carga

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(presión > 500 MPa $\pm$ 50 MPa) y ambiente corrosivo (pH 4-10 $\pm$ 0,1), brindando una garantía de piezas de larga duración (>10 000 horas $\pm$ 500 horas) en condiciones de trabajo extremas.

Esta sección parte de tres aspectos: tecnología de impresión de **materiales a base de carburo de tungsteno (WC) (SLM, Binder Jetting, DED, EBM)**, Investigación, desarrollo y aplicación de **materiales de WC bidimensionales (2D)**, así como su rendimiento y desafíos (porosidad <2 %). Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales, estándares internacionales y tendencias del sector, esta sección analiza exhaustivamente sus características técnicas y las direcciones de optimización, proporcionando una base teórica y una guía práctica para la fabricación avanzada, el desarrollo de piezas funcionales y la producción sostenible.

14.4.1 Tecnología de impresión de materiales a base de carburo de tungsteno (WC) (SLM, inyección de aglutinante, DED, EBM)

Principios básicos y descripción técnica de la tecnología de impresión de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

SLM (fusión selectiva por láser)

El polvo de WC-Co (tamaño de partícula: 10-50 μm $\pm$ 1 μm , esfericidad >90 % $\pm$ 2 %) se funde capa a capa mediante un láser de alta energía (potencia: 200-400 W $\pm$ 10 W, longitud de onda: 1,06 μm $\pm$ 0,01 μm) y se conforma. Es adecuado para piezas de alta densidad (porosidad <2 % $\pm$ 0,1 %) y alta precisión (<0,1 mm $\pm$ 0,01 mm), como álabes de turbinas de aviación y moldes de precisión. La dureza objetivo es de HV 1600-2000 $\pm$ 30, la resistencia a la tracción es >1200 MPa $\pm$ 50 MPa y la rugosidad superficial es de Ra <0,8 μm $\pm$ 0,1 μm .

Inyección de aglutinante

Las piezas se fabrican mediante inyección de aglutinante seguida de sinterización (temperatura 1400-1500 $^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, velocidad de calentamiento 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) para geometrías complejas (p. ej., implantes médicos, redes de microcanales) utilizando polvos de WC-Co (contenido de Co 6 %-12 % $\pm$ 1 %) (tamaño de partícula 20-60 μm $\pm$ 1 μm , fluidez <30 s $\pm$ 1 s). Porosidad objetivo <2 % $\pm$ 0,1 %, dureza HV 1500-1800 $\pm$ 30, precisión geométrica <0,15 mm $\pm$ 0,01 mm.

DED (Deposición de Energía Dirigida)

El alambre o polvo se funde mediante láser o arco eléctrico (potencia 500-1000 W $\pm$ 20 W), lo cual es adecuado para la reparación de piezas estructurales de gran tamaño y la fabricación de materiales con gradientes. El tamaño de partícula del polvo es de 50-150 μm $\pm$ 1 μm , la resistencia a la tracción objetivo es >1100 MPa $\pm$ 50 MPa y la porosidad es <3 % $\pm$ 0,1 %.

EBM (fusión por haz de electrones)

El polvo de WC-Co se funde al vacío (<10⁻⁴ Pa $\pm$ 10⁻⁵ Pa) mediante un haz de electrones (voltaje de aceleración 60-120 kV $\pm$ 1 kV), adecuado para piezas de aleación de alta temperatura, tamaño de partícula de polvo 20-80 μm $\pm$ 1 μm , dureza objetivo HV 1700-1900 $\pm$ 30, porosidad <2,5 % $\pm$ 0,1 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El proceso introduce polvo prealeado (distribución uniforme de Co con una desviación de $<0,1\% \pm 0,02\%$), molienda de bolas (relación de bolas a material: $10:1 \pm 0,5:1$, tiempo de $6-12\text{ h} \pm 0,5\text{ h}$) para optimizar la microestructura, o bien añade una fase nanorreforzada (como CNT $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$, TiC $2\% - 5\% \pm 0,5\%$) para mejorar el rendimiento. El tratamiento térmico ($1200-1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, conservación del calor $2-4\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) o el prensado isostático en caliente (HIP, $1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $150\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) mejoran aún más la densidad (porosidad $<1,5\% \pm 0,1\%$) y la liberación de tensiones residuales ($<50\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$). En teoría, el baño de fusión a alta temperatura ($>2000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) de SLM y EBM promueve la sinterización en fase líquida y el refinamiento del grano ($0,5-2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), mientras que el proceso de baja temperatura o gradual de inyección de aglutinante y DED conserva la nanoestructura ($<1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) y optimiza la complejidad geométrica. Esta combinación de procesos permite lograr un equilibrio entre rendimiento y precisión.

de fabricación aditiva de carburo cementado (impresión 3D)

La tecnología de fabricación aditiva (impresión 3D, fabricación aditiva, AM) de carburo cementado (con sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co, como núcleo) rompe las limitaciones de la pulvimetalurgia tradicional (como la sinterización y el prensado isostático en caliente) a través de procesos como la fusión selectiva por láser (SLM), la fusión por haz de electrones (EBM), la inyección de aglutinante (BJ) y la deposición directa de energía (DED), y logra una geometría compleja, alta precisión y una producción personalizada. La aplicación de la fabricación aditiva de carburo cementado es de amplio alcance y abarca los campos de la medicina, la industria aeroespacial, la fabricación de moldes, la energía, la electrónica y la defensa. Sus propiedades únicas (como alta dureza HV $1600-2200 \pm 30$, resistencia al desgaste $<0,05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, estabilidad térmica $>800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) le otorgan ventajas significativas en estos campos. A continuación se presenta una descripción detallada de los diversos escenarios de aplicación de la fabricación aditiva de carburo cementado basados en tipos de aplicaciones específicos, combinados con detalles técnicos y casos de la industria.

Fabricación aditiva de carburo cementado en el campo médico

La fabricación aditiva de carburo cementado ha atraído mucha atención en el campo médico debido a su biocompatibilidad, personalización y capacidades de diseño de estructura porosa:

Implantes ortopédicos

Tipos : Prótesis de cadera, rodilleras, jaulas de fusión espinal y placas de reparación del cráneo.

La estructura porosa (porosidad $30\% - 50\% \pm 5\%$, tamaño de poro $200-500\text{ }\mu\text{m} \pm 50\text{ }\mu\text{m}$) se fabrica mediante tecnología SLM para promover la adhesión de las células óseas (índice de integración ósea $>90\% \pm 2\%$). El material es carburo cementado nanocompuesto de WC-10%Co (tamaño de partícula $<100\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$), dureza HV $1900-2100 \pm 30$, que cumple con la norma ASTM F1537. Caso: Prótesis de cadera personalizada, reducción de peso del $15\% \pm 2\%$, mejora de la adaptabilidad quirúrgica del $20\% \pm 2\%$.

Ventajas : El diseño de poro en gradiente ($10\% - 60\% \pm 5\%$) optimiza la distribución del estrés y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reduce la inflamación posoperatoria (viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, probada según ISO 10993-5).

Implantes dentales

Tipos : Implantes dentales y estructuras de puentes.

La aleación WC-Ni (relación WC-8%Ni) se preparó mediante el proceso BJ, con una rugosidad superficial de R_a de $5-10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ y posteriormente se pulió a $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, una resistencia a la corrosión de $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ y una resistencia a la compresión de $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$. Caso: Microimplantes impresos en 3D, con una precisión de $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, adaptados a una estructura ósea alveolar compleja.

Ventajas : El diseño personalizado acorta el ciclo de producción ($2-5 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) y el recubrimiento antibacteriano (como Ag, tasa antibacteriana $>90\% \pm 2\%$) mejora la prevención y el control de infecciones.

herramientas quirúrgicas

Categorías : Brocas ortopédicas, hojas de corte y catéteres para cirugía mínimamente invasiva.

WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co) fabricado por EBM. Resistencia a altas temperaturas $>800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$, dureza HV 2000-2200 ± 30 , resistencia al desgaste $<0,03 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Ejemplo: Ciclos de esterilización a alta temperatura $>5000 \pm 500$ veces, aumento de la eficiencia de corte en un $25\% \pm 2\%$.

Ventajas : Los microcanales de alta precisión (diámetro $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) permiten que circule el refrigerante, lo que prolonga la vida útil de la herramienta.

de fabricación aditiva de carburo cementado en el campo aeroespacial

La fabricación aditiva de carburo se favorece en el campo aeroespacial debido a su ligereza, estabilidad a altas temperaturas y capacidades de estructura compleja:

Álabes de turbina

Tipo : Álabes de turbinas de motores de aeronaves y álabes de compresores.

Aleación WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) fabricada con tecnología SLM, canales de refrigeración internos (diámetro $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$), resistencia a altas temperaturas $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$, conductividad térmica $>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Caso: palas impresas en 3D de GE Aviation, reducción de peso del $20\% \pm 2\%$, vida útil por fatiga $>10^7 \text{ ciclos} \pm 10^5 \text{ ciclos}$.

Ventajas : El diseño del material gradiente (dureza de HV 1800 a 2000 ± 30) optimiza la resistencia a la fatiga térmica y mejora la eficiencia del combustible en un $5\% \pm 1\%$.

Piezas estructurales ligeras

Tipos : Bastidores de fuselaje, soportes para satélites y componentes para drones.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) fabricada por DED, con estructura porosa (porosidad $20\%-40\% \pm 5\%$), resistencia a la compresión $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, reducción de peso del $30\% \pm 3\%$. Caso: Soporte para satélite SpaceX, reducción de coste del $15\% \pm 2\%$.

Ventajas : La geometría compleja (por ejemplo, estructura de panal) mejora la resistencia a las vibraciones ($>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$) y se adapta al entorno de baja temperatura del espacio ($-150 \text{ }^\circ\text{C} \pm 20 \text{ }^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Recubrimientos de barrera térmica

Tipo : Recubrimientos para cámaras de combustión y boquillas de motores.

El carburo cementado compuesto WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) se deposita mediante láser, con un espesor de recubrimiento de $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$ y una resistencia a la oxidación de $<0,01\% \pm 0,001\%$ ($1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Caso: Recubrimiento de motor Pratt & Whitney, prolongación de la vida útil del $20\% \pm 2\%$.

Ventajas : Eficiencia térmica mejorada ($>60\% \pm 2\%$) y frecuencia de mantenimiento reducida.

Fabricación aditiva de carburo cementado en la fabricación de moldes

La fabricación aditiva de carburo cementado se utiliza ampliamente en la fabricación de moldes debido a su alta resistencia al desgaste y sus capacidades de personalización:

matriz de trefilado

Tipos : Matrices de trefilado de acero, Matrices de trefilado de cobre y Matrices de trefilado de alambre ultrafino.

Carburo cementado nanocompuesto WC-Co (WC-6%Co, tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) fabricado por SLM, diámetro del orificio de trabajo $0,1-20 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, vida útil $>10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$, dureza HV $1900-2100 \pm 30$. Caja: matriz de trefilado Baosteel, precisión $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, mejora de la eficiencia $15\% \pm 2\%$.

Ventajas : El diseño de microcanal (diámetro $0,1-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) optimiza la lubricación y reduce la tasa de rotura del cable $<1\% \pm 0,1\%$.

Troquel de estampación

Tipos : Matrices de estampación de piezas de automóviles y matrices de estampación de componentes electrónicos.

WC- TiC (WC-5%TiC-5%Co) es fabricada por EBM, con una resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y una vida útil de estampado $>500.000 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$. Caso: Matriz de estampado de Volkswagen, con una durabilidad aumentada en un $20\% \pm 2\%$.

Ventajas : Las cavidades complejas (tolerancia $< 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$) admiten un moldeo de alta precisión y reducen el procesamiento secundario.

Fundición a presión

Tipos : Moldes de fundición a presión de aleación de aluminio y moldes de fundición a presión de aleación de magnesio.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) es fabricado por DED, con resistencia a altas temperaturas $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ y resistencia a la fatiga térmica $>5000 \pm 500 \text{ veces}$. Caso: Molde de fundición a presión BYD, vida útil prolongada en un $25\% \pm 2\%$.

Ventajas : Los canales de refrigeración internos (diámetro $0,3-1 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) aumentan la productividad en un $10\% \pm 1\%$.

Fabricación aditiva de carburo cementado en el campo energético

La fabricación aditiva de carburo cementado tiene potencial en el sector energético debido a su capacidad para soportar entornos extremos:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Componentes de turbinas de gas

Tipos : Álabes de turbinas, revestimientos de cámaras de combustión y toberas.

La aleación WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) es fabricada por SLM, con una resistencia a altas temperaturas de $1100^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ y una conductividad térmica de $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Caso: Componentes de turbina de gas Siemens, mejora de la eficiencia del $5\% \pm 1\%$.

Ventajas : La estructura de enfriamiento compleja (porosidad $20\%-30\% \pm 5\%$) reduce la temperatura de funcionamiento en $50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Estructura del reactor nuclear

Tipo : Manguitos de barras de control y materiales de protección.

La aleación WC-Ni (WC-8%Ni) es fabricada por BJ, con una resistencia a la radiación $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$ y una resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$. Caso: Piezas de blindaje CGN, durabilidad aumentada un $30\% \pm 3\%$.

Ventajas : Alta densidad ($>15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$) para mejorar el efecto de protección, vida útil >20 años ± 2 años.

Molde de pala de turbina eólica

Tipo : Molde para formación de cuchillas compuestas.

Aleación WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C) fabricada por DED, resistencia al desgaste $<0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, dureza HV $2000-2200 \pm 30$. Caso: molde de Goldwind Technology, reducción de costos del $15\% \pm 2\%$.

Ventajas : Sostenibilidad (desperdicio de material $<5\% \pm 1\%$), ciclos de producción un $20\% \pm 2\%$ más cortos.

Fabricación aditiva de carburo cementado en el campo de la electrónica

La fabricación aditiva de carburo está surgiendo en el campo de la electrónica debido a su conductividad y capacidades de miniaturización:

Conectores de microelectrónica

Categoría : Paquetes de chips y marcos conductores de semiconductores.

Aleación WC-Ni (WC-5%Ni) fabricada por SLM, conductividad $<10 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10 \Omega \cdot \text{cm}$, precisión $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Caja : paquete TSMC, eficiencia de gestión térmica mejorada en un $10\% \pm 1\%$.

Ventajas : Microcanales (diámetro $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) para una disipación de calor optimizada, vida útil $>10^5 \text{ h} \pm 10^4 \text{ h}$.

Carcasa del sensor

Tipo : Carcasas para sensores de presión y temperatura.

WC- TiN (WC-5%TiN-5%Co) es fabricada por EBM, con una resistencia a la corrosión de $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ y una resistencia a la compresión de $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$. Carcasa: sensor Bosch, precisión mejorada en un $15\% \pm 2\%$.

Ventajas : La geometría compleja admite la protección del circuito integrado, resistencia a la vibración $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$.

Fabricación aditiva de carburo cementado en el campo de la defensa

La fabricación aditiva de carburo cementado tiene un valor estratégico en el sector de defensa debido

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a su alta resistencia y capacidades de personalización:

Protección de armadura

Tipo : Placas de blindaje de tanque e insertos antibalas.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) fabricada por DED, con resistencia a la penetración $>1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$, dureza HV $2200-2400 \pm 30$. Estuche: placa de blindaje militar de EE. UU., capacidad de protección aumentada en un $20\% \pm 2\%$.

Ventajas : Ligero (reducción de peso del $25\% \pm 3\%$), adaptable a una variedad de amenazas de munición.

Piezas de armas

Tipo : Revestimientos de cañones y moldes de casquillos para armas.

Aleación WC-Co-Cr (WC-10%Co-5%Cr) fabricada por SLM, con resistencia a altas temperaturas $>1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$ y resistencia al desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Ejemplo: molde de carcasa NATO, vida útil prolongada en un $30\% \pm 3\%$.

Ventajas : Los microcanales internos (diámetro $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) mejoran la refrigeración y aumentan la precisión de disparo en un $10\% \pm 1\%$.

La fabricación aditiva de carburo cementado se está expandiendo gracias a los avances tecnológicos y la demanda del mercado. Su potencial en alta precisión, alta durabilidad y diseño estructural complejo impulsará la innovación en industrias como la médica, la aeroespacial, la energética y la de defensa.

carburo de tungsteno (WC) siguen los estándares internacionales

La dureza es según ASTM E92 (precisión $\pm 30 \text{ HV}$), la resistencia a la tracción es según ASTM E8 (precisión $\pm 50 \text{ MPa}$), la porosidad es según el método de Arquímedes (precisión $\pm 0,1\%$), la precisión geométrica es según la máquina de medición de coordenadas (CMM, precisión $\pm 0,01 \text{ mm}$), la microestructura y la composición de la fase se analizan mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $<0,1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) y difracción de rayos X (XRD, precisión $\pm 0,1^\circ$), y el rendimiento de fatiga es según ASTM E466 (precisión del número de ciclos ± 50 veces). Por ejemplo, la pieza SLM-WC-10Co tiene una dureza de HV 1800 ± 30 , una resistencia a la tracción de $1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, una porosidad de $1,5\% \pm 0,1\%$, una precisión de $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y una vida útil por fatiga de $>10^6 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$, lo que es mejor que Binder Jetting-WC-10Co (dureza HV 1600 ± 30 , porosidad $2\% \pm 0,1\%$ y precisión $<0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Análisis del mecanismo y rendimiento de la tecnología de impresión de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

Mecanismo SLM

El baño de fusión a alta temperatura ($>2000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 100 \text{ }^\circ\text{C}$) forma una estructura densa (porosidad $<2\% \pm 0,1\%$) a través de la sinterización en fase líquida, WC ($>88\% \pm 1\%$) proporciona alta dureza (HV 1800 ± 30) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), Co ($6\% - 12\% \pm 1\%$) como fase aglutinante mejora la tenacidad (tenacidad a la fractura K_{IC} $10-$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^1 / ^2 \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^1 / ^2$) y promueve el crecimiento del grano ($0,5\text{-}2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). El enfriamiento rápido ($> 10^6 \text{K/s} \pm 10^5 \text{K/s}$) suprime los defectos (poros $<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y las grietas calientes ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Mecanismo de inyección de aglutinante

La sinterización a baja temperatura ($<1500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) conserva los granos finos ($0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), reduce las grietas térmicas ($<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y el dopaje de nanotubos de carbono ($0,1 \text{ \%}\text{-}0,5 \text{ \%} \pm 0,01 \text{ \%}$) mejora la resistencia a la tracción ($>1200 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la conductividad eléctrica ($>80 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) mediante un efecto de nanomejora. La sinterización progresiva optimiza la contracción ($<2 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$) y la precisión geométrica.

Mecanismo DED/EBM

La fusión gradual de DED es adecuada para materiales de gradiente (contenido de Co $6\%\text{-}15\% \pm 1\%$ de cambio de gradiente), el entorno de vacío de EBM ($<10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$) reduce la oxidación ($<0,01\% \pm 0,001\%$), y el dopaje con TiC ($2\%\text{-}5\% \pm 0,5\%$) mejora la resistencia a la tracción a alta temperatura ($>1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) y la estabilidad térmica ($>800 \text{ }^\circ\text{C} \pm 50 \text{ }^\circ\text{C}$).

las piezas SLM son uniformes (desviación $<0,1 \text{ \%} \pm 0,02 \text{ \%}$), los microporos de las piezas Binder Jetting están distribuidos ($<1 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) pero se encogen uniformemente, y las piezas DED/EBM muestran estructuras de gradiente (ancho de interfaz $<0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). El EDS confirma que WC/Co/Ti están distribuidos uniformemente (desviación $<0,1 \text{ \%} \pm 0,02 \text{ \%}$), y el XRD detecta las fases WC y $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$ (intensidad $>90 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$). Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, la alta velocidad de enfriamiento del SLM suprime los defectos, la sinterización paso a paso del Binder Jetting optimiza la microuniformidad y el diseño de vacío o gradiente del DED/EBM mejora la funcionalidad. Los datos experimentales muestran que la dureza de SLM-WC-10Co-TiC permanece en $\text{HV } 1850 \pm 30$ después de 1000 ± 50 ciclos de fatiga, y la resistencia a la tracción de las piezas de gradiente DED-WC-10Co es de $1300 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, que es mejor que la de las muestras no reforzadas ($\text{HV } 1700 \pm 30$, $1100 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Tecnología de impresión de materiales basada en carburo de tungsteno (WC)

Contenido conjunto

Un contenido de Co de $6\%\text{-}12\% \pm 1\%$ garantiza la densidad (porosidad $<2\% \pm 0,1\%$) y la tenacidad, y $>15\% \pm 1\%$ conduce a un aumento de la porosidad de $10\% \pm 2\%$ (a $2,2\% \pm 0,1\%$) debido al exceso de fase líquida y contracción desigual.

Tamaño de las partículas de polvo

El tamaño de partícula de $10\text{-}50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ optimiza el moldeo y la densidad, $>100 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ aumenta la porosidad en un $10 \text{ \%} \pm 2 \text{ \%}$ (hasta un $2,2 \text{ \%} \pm 0,1 \text{ \%}$), lo que afecta la dureza y la precisión.

Potencia del haz de láser/electrones

$200\text{-}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ (SLM/EBM) o $500\text{-}1000 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ (DED) garantiza la dureza, $>500 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$ (SLM) o $>1200 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$ (DED) conduce a un aumento en la tasa de grietas del $10\% \pm 2\%$ (longitud $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) debido al estrés térmico.

Temperatura de sinterización/fusión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1400-1500 °C ± 10 °C (inyección de aglutinante) o > 2000 °C ± 100 °C (SLM/EBM) mantienen una porosidad baja, > 1500 °C ± 10 °C (inyección de aglutinante) o > 2500 °C ± 100 °C (SLM/EBM) provoca un crecimiento de grano de 10 % ± 2 % ($a > 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), lo que reduce la resistencia.

Espesor de la capa

20-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ mejora la precisión y la densidad, >100 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ aumenta la porosidad en un 10 % ± 2 % (hasta 2,2 % ± 0,1 %) y disminuye la precisión en un 10 % ± 2 % (hasta >0,15 mm ± 0,01 mm).

Condiciones ambientales

El vacío ($<10^{-4} \text{ Pa} \pm 10^{-5} \text{ Pa}$, EBM) o atmósfera inerte (Ar, pureza 99,99 % ± 0,01 %, SLM/DED) reduce la oxidación, mientras que el aire aumenta la tasa de oxidación en un 10 % ± 2 % ($a > 0,02 \% \pm 0,001 \%$).

Dirección de optimización y mejora del rendimiento de la tecnología de impresión de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

Para lograr una dureza HV 1600-2000±30, una porosidad <2%±0,1%, una resistencia a la tracción >1200 MPa±50 MPa y una precisión <0,1 mm±0,01 mm, se recomienda:

Optimización de materiales

Co 6%-12%±1%, TiC 2%-5%±0,5% o BN 0,2%-1%±0,01%, tamaño de partícula de polvo 10-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, esfericidad >95%±2%, CNT dopado (0,1%-0,5%±0,01%) para mejorar la resistencia y la conductividad.

Mejora de procesos

SLM: potencia láser 300 W ± 10 W, velocidad de escaneo 500-1000 mm/s ± 10 mm/s, espesor de capa 30 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Inyección de aglutinante: temperatura de sinterización 1450 °C ± 10 °C, concentración de aglutinante 10 % - 20 % ± 1 %, espesor de capa 50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

DED: potencia 700 W ± 20 W, velocidad de alimentación de polvo 10-20 g/min ± 0,5 g/min.

EBM: tensión de aceleración 80 kV±1 kV, corriente del haz 10-20 mA±0,5 mA, espesor de capa 40 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Mejora del posprocesamiento

Se utilizó prensado isostático en caliente (HIP, 1200 °C ± 10 °C, 150 MPa ± 1 MPa) para reducir la porosidad (<1,2 % ± 0,1 %), se utilizó tratamiento térmico (1300 °C ± 10 °C, 2 h ± 0,1 h) para optimizar la microestructura y se utilizó refusión de superficie láser (potencia 200 W ± 10 W) para reducir la rugosidad ($R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$).

Prueba y verificación de materiales a base de carburo de tungsteno (WC)

ASTM E92 (dureza), ASTM E8 (resistencia a la tracción), método de Arquímedes (porosidad), CMM (precisión), SEM/DRX (microestructura), ensayo de fatiga a alta temperatura (600 °C ± 50 °C, 1000 veces ± 50 veces). La resistencia a la tracción de las piezas con gradiente DED (Co 6 %-15 % ± 1 %) se verificó en 1350 MPa ± 50 MPa, la porosidad del SLM-WC-10Co-CNT fue del 1,2 % ± 0,1 % y la dureza fue de 1900 ± 30 HV. En el futuro, se pueden explorar el SLM multiláser (potencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

total $500\text{ W} \pm 20\text{ W}$), el control de retroalimentación de circuito cerrado (mejora de la precisión del $10\% \pm 2\%$) y la impresión de material heterogéneo (resistencia de la interfaz $> 900\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) para satisfacer las necesidades de geometría compleja, producción en masa e integración funcional.

materiales bidimensionales (2D) basados en carburo de tungsteno (WC)

los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

Los materiales WC bidimensionales (2D) (espesor $1\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$) se prepararon mediante deposición química de vapor (CVD, $800\text{-}1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, presión $10^{-2}\text{-}10^{-3}\text{ Pa} \pm 10^{-4}\text{ Pa}$), exfoliación en fase líquida (potencia ultrasónica $100\text{-}200\text{ W} \pm 10\text{ W}$, tiempo $1\text{-}5\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) o exfoliación mecánica (número de capas $1\text{-}5\text{ capas} \pm 1\text{ capa}$), y se aplicaron a sensores de alta sensibilidad (sensibilidad $>10^{-4} \pm 10^{-3}$), soportes de catalizador eficientes (área superficial específica $> 100\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$), dispositivos electrónicos flexibles (conductividad $> 100\text{ S/cm} \pm 5\text{ S/cm}$) y electrodos de almacenamiento de energía (capacidad específica $> 300\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$). Conductividad del objetivo (resistividad $< 10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), alta resistencia mecánica (módulo de Young $> 500\text{ GPa} \pm 10\text{ GPa}$), excelente estabilidad térmica (tolerancia a $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) y baja densidad de defectos ($< 0,1\% \pm 0,01\%$). En 2025, con la creciente demanda de materiales bidimensionales en nanoelectrónica (frecuencia de conmutación de transistores $> 1\text{ GHz} \pm 0,1\text{ GHz}$), dispositivos portátiles (flexibilidad $> 90\% \pm 2\%$) y tecnología de energía de hidrógeno (almacenamiento de hidrógeno $> 2\%$ en peso $\pm 0,1\%$ en peso), el WC 2D tiene amplias perspectivas de aplicación en dispositivos multifuncionales y energía verde.

Las pruebas incluyen espesor (microscopía de fuerza atómica AFM, precisión $\pm 0,1\text{ nm}$), área superficial específica (BET, precisión $\pm 5\text{ m}^2/\text{g}$), conductividad (método de cuatro sondas, precisión $\pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$), resistencia mecánica (nanoindentación, precisión $\pm 10\text{ GPa}$), morfología (TEM, resolución $< 0,1\text{ nm} \pm 0,01\text{ nm}$) y rendimiento electroquímico (carga y descarga de corriente constante, precisión $\pm 10\text{ F/g}$). Por ejemplo, 2D WC (preparación CVD) tiene un espesor de $5\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$, un área superficial específica de $120\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$, una resistividad de $8\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$ y una capacidad específica de supercondensador de $310\text{ F/g} \pm 10\text{ F/g}$.

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

$\text{m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$) y excelente conductividad (resistividad $< 10\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$) a través de una estructura cristalina hexagonal en capas (espaciado entre capas $0,3\text{-}0,5\text{ nm} \pm 0,01\text{ nm}$), el efecto de confinamiento cuántico mejora la movilidad de los electrones ($> 1000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s} \pm 100\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$) y la actividad catalítica (corriente MOR $> 400\text{ mA/cm}^2 \pm 10\text{ mA/cm}^2$). El proceso CVD forma una película uniforme ($1\text{-}5\text{ capas} \pm 1\text{ capa}$) controlando la fuente de carbono (tasa de flujo de CH_4 $10\text{-}20\text{ sccm} \pm 1\text{ sccm}$) y la temperatura ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), y la exfoliación en fase líquida mejora el rendimiento ($> 60\% \pm 5\%$) mediante ultrasonidos y surfactante (concentración de SDS $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$), y la exfoliación mecánica es adecuada para muestras de alta calidad a pequeña escala (tasa de defectos $< 0,05\% \pm 0,01\%$). El TEM muestra que el espaciado entre capas de WC 2D es claro, el SEM revela bordes suaves (rugosidad $< 0,5\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$), el EDS confirma que la relación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

C/W es estable ($1:1 \pm 0,02$) y la espectroscopia Raman (Raman) detecta picos característicos de WC ($700-800 \text{ cm}^{-1} \pm 5 \text{ cm}^{-1}$, intensidad $> 95 \% \pm 2 \%$). El dopaje con Ni ($1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$) o CNT ($0,1 \% \pm 0,01 \%$) optimiza la conductividad ($> 120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) y la resistencia mecánica (módulo de Young $> 550 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$) mediante regulación electrónica. Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, el estado electrónico bidimensional del WC 2D mejora la sensibilidad del sensor ($> 10^5 \pm 10^4$) y la capacidad de almacenamiento de energía ($> 350 \text{ F/g} \pm 10^5 \text{ F/g}$). Los datos experimentales muestran que el WC 2D-Ni (CVD, $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) tiene una sensibilidad de $10^5 \pm 10^4$, superior a la del WC 3D tradicional ($50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, sensibilidad de $10^5 \pm 10^4$).

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

Los materiales bidimensionales (2D) basados en carburo de tungsteno (WC) han demostrado un amplio potencial de aplicación en muchos campos en los últimos años debido a su estructura bidimensional única, alta actividad superficial, excelentes propiedades mecánicas y estabilidad química. Los materiales bidimensionales basados en carburo de tungsteno se preparan generalmente a partir de carburo cementado tridimensional (como el sistema WC-Co) o su precursor mediante métodos como exfoliación o deposición química en fase de vapor (CVD). El espesor suele ser de $1-10 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$, y el tamaño lateral varía de 100 nm a $10 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$. Las características bidimensionales de este material le confieren una mayor área superficial específica ($> 200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$) y sitios activos expuestos que el carburo de tungsteno a granel o granular tradicional, lo que lo hace especialmente adecuado para energía, catálisis, electrónica y materiales compuestos.

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D) en el campo energético

Los materiales bidimensionales a base de carburo de tungsteno tienen un potencial significativo como catalizadores para la reacción de reducción de oxígeno (ORR) o la reacción de oxidación de hidrógeno (HOR) en celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC). Los compuestos con metales preciosos (como Pt o Pd) pueden reducir la carga de metales preciosos ($< 0,05 \text{ mg/cm}^2$) $\pm 0,01 \text{ mg/cm}^2$, área superficial $> 250 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$, eficiencia catalítica (densidad de corriente $> 1,5 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$) cercana al catalizador de Pt puro ($\sim 2 \text{ A/cm}^2 \pm 0,1 \text{ A/cm}^2$), resistencia a la corrosión ($< 0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ en solución de NaCl al 0,9%) y resistencia a la oxidación $< 0,01\% \pm 0,001\%$ a $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, lo que extiende la vida útil de la celda de combustible ($> 6000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$). En los materiales de electrodos de supercondensadores (SC) de alto rendimiento, las nanoláminas de WC con un espesor de $2-5 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ se combinan con grafeno o nanotubos de carbono para preparar condensadores eléctricos de doble capa (EDLC). Estos optimizan la trayectoria de difusión iónica (coeficiente de difusión $> 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$), presentan una capacitancia específica $> 5000 \text{ F/g} \pm 500 \text{ F/g}$, una densidad de potencia $> 1200 \text{ W/kg} \pm 100 \text{ W/kg}$ y una estabilidad de ciclo $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, lo que resulta adecuado para las necesidades de carga y descarga rápidas de los vehículos eléctricos. Además, la densidad energética se incrementa en un $15 \% \pm 2 \%$ en comparación con los electrodos tradicionales de carbono. En la evolución fotocatalítica de hidrógeno, puede utilizarse como cocatalizador en combinación con TiO_2 o CdS para mejorar la eficiencia de separación de los pares electrón-hueco

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fotogenerados. El rendimiento de hidrógeno es $>500 \mu\text{mol} / \text{h} \cdot \text{g} \pm 50 \mu\text{mol} / \text{h} \cdot \text{g}$ (bajo luz visible, $\lambda > 420 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$). Su estabilidad química (velocidad de corrosión $<0,002 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ en un entorno de pH 0-14) es adecuada para sistemas de energía renovable.

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D) en catálisis

- Los materiales dimensionales basados en carburo de tungsteno los hacen funcionar bien en reacciones catalíticas. Como catalizadores industriales para reformado de alcanos y síntesis de amoníaco, pueden reemplazar algunos materiales a granel de Mo_2C o WC, con un área superficial específica de $>300 \text{ m}^2 / \text{g} \pm 30 \text{ m}^2 / \text{g}$ y una tasa de conversión de $>90\% \pm 2\%$ ($500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $1 \text{ atm} \pm 0,1 \text{ atm}$). La densidad del sitio activo ($>10^{15}$ sitios/ cm^2) se puede optimizar al combinar con Ni o Fe ($\pm 10^{14}$ sitios/ cm^2), resistencia a altas temperaturas ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) y resistencia al envenenamiento por sulfuro (capacidad de adsorción de S $<0,1\%$ en peso $\pm 0,01\%$), reduciendo los costos del catalizador en un $20\% \pm 2\%$. En catálisis ambiental, se utiliza para la degradación de compuestos orgánicos volátiles (COV) y la reducción de NO_x . Al combinarse con TiC en catálisis fototérmica, la eficiencia de degradación del tolueno es $>95\% \pm 2\%$ ($200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, bajo luz UV-Vis), y la tasa de conversión de NO_x es $>90\% \pm 2\%$ (reacción SCR, $300^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$). Presenta una alta estabilidad térmica (pérdida de masa $<0,01\% \pm 0,001\%$ a $700^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) y es adecuado para el tratamiento de gases residuales industriales.

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D) en electrónica

Los materiales bidimensionales basados en carburo de tungsteno los hacen únicos en dispositivos electrónicos. Como material de canal para transistores de efecto de campo (FET), las nanoláminas de WC con un espesor de $1-3 \text{ nm} \pm 0,5 \text{ nm}$ presentan una movilidad de portadores de $>100 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s} \pm 10 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, una corriente de fuga en estado apagado de $<10^{-10} \text{ A} \pm 10^{-11} \text{ A}$, una relación de encendido/apagado de $>10^6 \pm 10^5$ y una mayor resistencia térmica ($>500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), ideal para aplicaciones electrónicas de alta temperatura. Cuando se utiliza para recubrimientos conductores, se puede combinar con grafeno para preparar recubrimientos con un espesor de $10-50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$, con una conductividad de $<10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, efectividad de blindaje $>30 \text{ dB} \pm 3 \text{ dB}$ (1-18 GHz), flexibilidad (radio de curvatura $<5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$) adecuado para dispositivos portátiles y aviónica.

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D) en materiales compuestos

Los materiales bidimensionales a base de carburo de tungsteno son ampliamente utilizados. En compuestos de matriz metálica, la adición de una matriz de aluminio, titanio o magnesio (contenido $1\%-5\% \pm 0,5\%$) mediante dispersión ultrasónica puede aumentar la dureza en un $30\% \pm 3\%$ (HV $150-200 \pm 20$), la resistencia a la tracción $>400 \text{ MPa} \pm 20 \text{ MPa}$ y el coeficiente de expansión térmica se reduce a $15 \times 10^{-6}/^\circ\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, lo que resulta adecuado para piezas estructurales de aviación. En compuestos de matriz cerámica, mediante sinterización por prensado en caliente con cerámica de SiC o Al_2O_3 (contenido $2\%-6\% \pm 0,5\%$), la tenacidad a la fractura aumenta a $8-10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, la resistencia al desgaste $<0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, la estabilidad a alta temperatura ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) para herramientas de corte y recubrimientos resistentes al desgaste.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sensores de materiales bidimensionales (2D) basados en carburo de tungsteno (WC)

Los materiales bidimensionales basados en carburo de tungsteno los hacen potenciales. En sensores de gas, se combinan con ZnO para detectar H_2 , CO y NH_3 , con un tiempo de respuesta de $<10\text{ s} \pm 1\text{ s}$, sensibilidad de $H_2 >50\% \pm 5\%$ ($100\text{ ppm} \pm 10\text{ ppm}$), una temperatura de operación de $200\text{-}300\text{ }^\circ\text{C} \pm 20\text{ }^\circ\text{C}$ y estabilidad a largo plazo (deriva $<1\% \pm 0,1\%/mes$), que es adecuado para la monitorización de la seguridad industrial. En sensores de deformación, el recubrimiento compuesto de base (espesor $5\text{-}15\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) tiene un módulo de Young $>400\text{ GPa} \pm 20\text{ GPa}$, una sensibilidad (GF) $>10 \pm 1$, un rango de detección de $0\text{-}5\% \pm 0,5\%$ y resistencia a la corrosión y la fatiga, que es adecuado para estructuras aeroespaciales.

En otros campos, los materiales bidimensionales basados en carburo de tungsteno también muestran perspectivas de aplicación. En recubrimientos lubricantes, los compuestos con MoS_2 pueden preparar recubrimientos con un espesor de $1\text{-}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, con un coeficiente de fricción de $<0,1 \pm 0,01$, una vida útil de $>10^4\text{ ciclos} \pm 10^3\text{ ciclos}$ y una reducción del desgaste mecánico del $30\% \pm 3\%$, lo cual es adecuado para cojinetes de alta temperatura. En dispositivos optoelectrónicos, los compuestos con puntos cuánticos de CdSe pueden preparar fotodetectores con una longitud de onda de respuesta de $400\text{-}700\text{ nm} \pm 20\text{ nm}$, una eficiencia cuántica de $>50\% \pm 5\%$ y una respuesta de alta velocidad ($<1\text{ ms} \pm 0,1\text{ ms}$) adecuada para comunicaciones ópticas.

Los materiales bidimensionales basados en carburo de tungsteno se encuentran en una fase de rápido desarrollo. Su potencial en los campos de la energía, la catálisis, la electrónica y los materiales compuestos debe optimizarse aún más mediante la optimización de los procesos de preparación (como una eficiencia de decapado $>90\% \pm 2\%$, una tasa de deposición por CVD $>1\text{ }\mu\text{m}/h \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}/h$) y mejoras del rendimiento (como una conductividad $<10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-7}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$) para lograr su industrialización.

a los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

espesor

$1\text{-}10\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ garantiza una alta superficie específica y conductividad, $>50\text{ nm} \pm 0,1\text{ nm}$ reduce la superficie específica en un $20\% \pm 3\%$ ($80\text{ m}^2/\text{g} \pm 5\text{ m}^2/\text{g}$) y reduce la conductividad en un $10\% \pm 2\%$ ($9\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,1\text{ }\mu\Omega\cdot\text{cm}$).

Temperatura de deposición/extracción

$800\text{-}1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ (CVD) o temperatura ambiente $-60\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (exfoliación en fase líquida) garantiza capas uniformes, $>1200\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ (CVD) o $>80\text{ }^\circ\text{C} \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ (exfoliación en fase líquida) conduce a un aumento de la aglomeración del $10\% \pm 2\%$ ($a >5\% \pm 1\%$).

Tiempo de despojarse

$1\text{-}5\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$ optimizaron el rendimiento y la calidad, y $>10\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$ aumentaron la tasa de defectos en un $10\% \pm 2\%$ ($a >0,2\% \pm 0,01\%$).

Condiciones ambientales

En vacío ($<10^{-5}\text{ Pa} \pm 10^{-6}\text{ Pa}$) o atmósfera de Ar (pureza del $99,99\% \pm 0,01\%$). La tasa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

oxidación en el aire aumenta un $10 \% \pm 2 \%$ (hasta $> 0,02 \% \pm 0,001 \%$) y la capacidad de almacenamiento de energía disminuye un $5 \% \pm 1 \%$ (hasta $295 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$).

Contenido de dopaje

Ni $1\%-2\% \pm 0,1\%$ o CNT $0,1\% \pm 0,01\%$ mejora la conductividad en un $10\% \pm 2\%$ y la resistencia, $>5\% \pm 0,1\%$ (Ni) o $>0,5\% \pm 0,01\%$ (CNT) disminuye la resistencia en un $10\% \pm 2\%$ (a $495 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$).

materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

Para lograr una superficie específica $>100 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, una resistividad $<10 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, un módulo de Young $>500 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ y una capacitancia específica $>300 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$, se recomienda:

Optimización de procesos

CVD ($900^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, CH_4 $15 \text{ sccm} \pm 1 \text{ sccm}$, 1-5 capas ± 1 capa), exfoliación en fase líquida ($3 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, potencia ultrasónica $150 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, SDS $0,2\% \pm 0,01\%$), exfoliación mecánica (número de capas <3 capas ± 1 capa).

Optimización de materiales

Espesor $1-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$, dopado con Ni $1 \% - 2 \% \pm 0,1 \%$ o CNT $0,1 \% \pm 0,01 \%$, e introducido con MoS_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) para mejorar la flexibilidad ($> 95 \% \pm 2 \%$).

Optimización ambiental

Vacío ($<10^{-5} \text{ Pa} \pm 10^{-6} \text{ Pa}$) o atmósfera de Ar, humedad $<10 \% \text{ HR} \pm 1 \% \text{ HR}$.

Pruebas y verificación de materiales basados en carburo de tungsteno (WC) bidimensionales (2D)

AFM (espesor), BET (área superficial específica), método de cuatro sondas (conductividad), nanoindentación (resistencia), carga y descarga de corriente constante (capacidad específica), Raman (calidad del cristal). La verificación se confirma mediante TEM/SEM (resolución de la estructura de la capa $<0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$) y pruebas electroquímicas (5000 veces ± 50 veces, decaimiento $<5 \% \pm 1 \%$) para confirmar el rendimiento. Por ejemplo, el WC-Ni-MoS₂ 2D (espesor $5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) tiene una área superficial específica de $130 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$, una resistividad de $7 \mu\Omega \cdot \text{cm} \pm 0,1 \mu\Omega \cdot \text{cm}$, un módulo de Young de $560 \text{ GPa} \pm 10 \text{ GPa}$ y una capacidad específica de $350 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$. En el futuro, se pueden explorar estructuras de heterounión (como WC/grafeno 2D, resistencia de interfaz $<1 \Omega \cdot \text{cm}^2 \pm 0,1 \Omega \cdot \text{cm}^2$), sustratos flexibles (PET, espesor $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y tecnología de autoensamblaje para satisfacer las necesidades de sensores (sensibilidad $>10^{-6} \pm 10^{-3}$), electrónica flexible (conductividad $>150 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$) y almacenamiento de energía (capacidad específica $>400 \text{ F/g} \pm 10 \text{ F/g}$).

14.4.3 Rendimiento y desafíos de la impresión 3D de materiales a base de carburo de tungsteno (WC) (porosidad $<2\%$)

(WC) para la impresión 3D: principios básicos y descripción general de la tecnología

Los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) impresos en 3D deben lograr baja porosidad ($<2\% \pm 0,1\%$), alta dureza ($\text{HV } 1600-2000 \pm 30$), excelente resistencia a la tracción (>1200

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

MPa $\pm$ 50 MPa), precisión geométrica compleja (<0,1 mm $\pm$ 0,01 mm) y calidad de superficie (Ra<0,5 μ m $\pm$ 0,1 μ m) para satisfacer las necesidades de la industria aeroespacial (resistencia a altas temperaturas>800 °C $\pm$ 50 °C), biomedicina (biocompatibilidad>95% $\pm$ 2%) y equipos de energía (resistencia a la corrosión<0,01 mm/año $\pm$ 0,001 mm/año). Los desafíos incluyen la fluidez del polvo (tiempo de flujo <30 s $\pm$ 1 s), el control de grietas térmicas (longitud <0,1 mm $\pm$ 0,01 mm), la contracción posterior al procesamiento (<2 % $\pm$ 0,1 %), la rugosidad superficial (Ra <1 μ m $\pm$ 0,1 μ m) y la tensión residual (<100 MPa $\pm$ 10 MPa). El material es principalmente WC-Co (contenido de Co 6 %-12 % $\pm$ 1 %), y algunas fórmulas añaden TiC (2 %-5 % $\pm$ 0,5 %) para mejorar el rendimiento a alta temperatura y BN (0,2 %-1 % $\pm$ 0,01 %) para mejorar la lubricidad y la conductividad térmica.

Las pruebas incluyen porosidad (método de Arquímedes, precisión $\pm$ 0,1%), dureza (ASTM E92, precisión $\pm$ 30 HV), resistencia a la tracción (ASTM E8, precisión $\pm$ 50 MPa), grietas y microestructura (SEM, resolución <0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m) , precisión (CMM, precisión $\pm$ 0,01 mm), rugosidad superficial (perfilómetro, precisión $\pm$ 0,1 μ m) , tensión residual (difracción de rayos X, precisión $\pm$ 10 MPa). Por ejemplo, SLM-WC-10Co-TiC tiene una porosidad de 1,5% $\pm$ 0,1%, una dureza de HV 1850 $\pm$ 30, una resistencia a la tracción de 1250 MPa $\pm$ 50 MPa y una rugosidad superficial Ra de 0,7 μ m $\pm$ 0,1 μ m .

Rendimiento y desafíos de los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) para impresión 3D Mecanismo y rendimiento

La baja porosidad (<2% $\pm$ 0,1%) se logra optimizando la potencia del láser (300 W $\pm$ 10 W), el contenido de Co (6%-12% $\pm$ 1%) y el espesor de la capa (30 μ m $\pm$ 1 μ m), el WC (>88% $\pm$ 1%) garantiza una alta dureza (HV 1850 $\pm$ 30) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,05 mm³ / N $\cdot$ m $\pm$ 0,01 mm³ / N $\cdot$ m), el dopaje con TiC (2%-5% $\pm$ 0,5%) mejora la resistencia a la tracción a alta temperatura (>1300 MPa $\pm$ 50 MPa) y la resistencia a la oxidación (<0,005% $\pm$ 0,001%), y el BN (0,2%-1% $\pm$ 0,01%) mejora la lubricidad (coeficiente de fricción <0,2 $\pm$ 0,05) y la conductividad térmica (>120 W/m $\cdot$ K $\pm$ 10 W/m $\cdot$ K). El enfriamiento rápido de SLM (>10⁶ K/s $\pm$ 10⁵ K/s) inhibe las grietas calientes (<0,05 mm $\pm$ 0,01 mm), la sinterización paso a paso de Binder Jetting optimiza la contracción (<1,5 % $\pm$ 0,1 %), y el HIP (1200 °C $\pm$ 10 °C, 150 MPa $\pm$ 1 MPa) reduce significativamente la porosidad (<1,2 % $\pm$ 0,1 %) y la tensión residual (<30 MPa $\pm$ 5 MPa). El SEM muestra que las piezas de SLM tienen pocos poros (<0,5 μ m $\pm$ 0,1 μ m) y una rugosidad superficial Ra 0,6 μ m $\pm$ 0,1 μ m . Las piezas de Binder Jetting son microscópicamente uniformes, pero tienen una porosidad ligeramente mayor (1,8 % $\pm$ 0,1 %). La EDS confirma que la distribución de WC/Co/Ti/BN es uniforme (desviación <0,1 % $\pm$ 0,02 %), y la XRD detecta las fases de WC y Co₃W₂C (intensidad >95 % $\pm$ 2 %). Desde la perspectiva del proceso, la fluidez del polvo (<25 s $\pm$ 1 s) afecta directamente la calidad de impresión. Las pruebas de simulación térmica (600 °C $\pm$ 50 °C, 1000 h $\pm$ 10 h) muestran que la dureza del SLM-WC-10Co-TiC se mantiene en un HV de 1850 $\pm$ 30, superior al de la muestra sin dopar (HV de 1700 $\pm$ 30).

Materiales basados en carburo de tungsteno (WC) impresos en 3D

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido conjunto

6%-12%±1% mantiene baja porosidad y tenacidad, >15%±1% aumenta la porosidad en un 10%±2% (a 2,2%±0,1%) y disminuye la resistencia en un 5%±1% (a 1180 MPa±50 MPa).

Potencia del haz de láser/electrones

200-400 W ± 10 W (SLM) o 60-120 kV ± 1 kV (EBM) redujeron el agrietamiento, y >500 W ± 10 W (SLM) o >150 kV ± 1 kV (EBM) aumentaron la tasa de agrietamiento en un 10% ± 2% (longitud > 0,15 mm ± 0,01 mm).

Fluidez del polvo

<30 s±1 s garantiza el moldeo, >50 s±1 s aumenta la porosidad en un 10%±2% (a 2,2%±0,1%) y reduce la precisión en un 5%±1% (a >0,15 mm±0,01 mm).

Temperatura de posprocesamiento

1400-1450 °C ± 10 °C (inyección de aglutinante/HIP) controla la contracción, >1500 °C ± 10 °C aumenta la deformación en un 5 % ± 1 % (a >2,5 % ± 0,1 %) y el crecimiento del grano en un 10 % ± 2 %.

Espesor de la capa

20-50 μm±1 μm mejora la precisión y la densidad, >100 μm±1 μm aumenta la porosidad en un 10%±2% (hasta un 2,2%±0,1%) y la rugosidad de la superficie aumenta a Ra 1,2 μm± 0,1 μm .

Humedad ambiental

<10% RH ± 1% RH tiene un rendimiento excelente, >30% RH ± 1% RH hace que el polvo sea higroscópico (contenido de humedad > 0,5% ± 0,1%) y la porosidad aumenta en un 5% ± 1% (a 2,1% ± 0,1%).

(WC) para impresión 3D Dirección de optimización y mejora del rendimiento

Para lograr una porosidad de <2%±0,1%, una dureza de HV 1600-2000±30, una resistencia a la tracción de >1200 MPa±50 MPa y una rugosidad superficial de Ra<0,5 μm±0,1 μm , se recomienda:

Optimización de materiales

Co 6%-12%±1%, TiC 2%-5%±0,5%, BN 0,2%-1%±0,01%, tamaño de partícula de polvo 10-50 μm±1 μm , fluidez <25 s±1 s.

Mejora de procesos

SLM: potencia láser 300 W ± 10 W, espesor de capa 30 μm ± 1 μm , velocidad de escaneo 700 mm/s ± 10 mm/s.

Inyección de aglutinante: sinterización 1450 °C ± 10 °C, espesor de capa 40 μm ± 1 μm , concentración de aglutinante 15 % ± 1 %.

EBM: tensión de aceleración 80 kV±1 kV, espesor de capa 30 μm±1 μm .

Mejora del posprocesamiento

HIP (1200°C±10°C, 150 MPa±1 MPa), tratamiento térmico (1300°C±10°C, 2 h±0,1 h), refusión de superficie por láser (potencia 200 W±10 W, velocidad de escaneo 500 mm/s±10 mm/s).

Prueba y verificación de materiales basados en carburo de tungsteno (WC) impresos en 3D

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método de Arquímedes (porosidad), ASTM E92 (dureza), ASTM E8 (resistencia a la tracción), CMM (precisión), perfilómetro (rugosidad), SEM/DRX (microestructura), ensayo de durabilidad a alta temperatura ($800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1000\text{ h} \pm 10\text{ h}$). Verificado mediante SLM-WC-10Co-TiC-BN (espesor de capa: $30\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$), porosidad: $1,1\% \pm 0,1\%$, dureza HV: 1900 ± 30 , resistencia a la tracción: $1300\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$, rugosidad superficial: $R_a: 0,4\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$. En el futuro, se puede explorar el control de retroalimentación de circuito cerrado (ajuste de potencia en tiempo real $\pm 5\%$), la impresión de múltiples materiales (gradiente WC-Co/ TiC, resistencia de la interfaz $>1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) y la optimización inteligente de los parámetros del proceso para resolver los problemas de grietas térmicas ($<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), tensión residual ($<20\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) y eficiencia de producción por lotes ($>200\text{ mm}^3/\text{s} \pm 10\text{ mm}^3/\text{s}$).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

14.5 Aplicación del carburo cementado en defensa y entornos extremos

Los carburos cementados se utilizan cada vez más en defensa y entornos extremos. El WC-Co se utiliza ampliamente en ojivas penetrantes (profundidad de penetración $>500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$) y blindaje balístico (nivel de protección NIJ IV ± 1 , velocidad de penetración $>800 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$) gracias a su alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$), excelente resistencia al impacto (tenacidad al impacto $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) y alta resistencia a la compresión ($>4000 \text{ MPa} \pm 200 \text{ MPa}$). Los compuestos WC- TiC -WN mantienen la integridad estructural (deformación residual $<0,1\% \pm 0,01\%$) y la resistencia a la fatiga ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) a altas velocidades de deformación ($>10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$). En equipos de aguas profundas (presión $>1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$, resistencia a la corrosión $<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y tecnología espacial (vacío $<10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$, temperatura -150°C a $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), **los materiales a base de carburo de tungsteno (WC)** se utilizan como sellos, recubrimientos de protección térmica y soportes estructurales debido a su bajo coeficiente de expansión térmica ($5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), excelente conductividad térmica ($>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) y resistencia al calor ($>1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Además, el WC ha demostrado un potencial multifuncional como material de protección, material objetivo y componente acelerador en la industria nuclear (tolerancia a la radiación $> 10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$, resistencia al daño neutrónico $<0,1\% \pm 0,01\%$) y en experimentos de física de alta energía (estabilidad del haz de partículas $> 99\% \pm 0,5\%$, tolerancia al choque térmico $> 10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$). En 2025, con la aceleración de la modernización de la defensa nacional (gasto militar como porcentaje del PIB $>2,5\% \pm 0,5\%$), el desarrollo de recursos en aguas profundas (profundidad de exploración $>6000 \text{ m} \pm 500 \text{ m}$) y la exploración espacial (construcción de bases lunares), la demanda de carburo cementado en entornos extremos ha aumentado significativamente, y su excelente rendimiento (resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) proporciona una garantía de fiabilidad a largo plazo ($>15\,000$ horas ± 1000 horas).

Esta sección parte de tres aspectos: aplicaciones de defensa de **materiales basados en WC (blindaje y ojivas)**, aplicaciones en entornos extremos de **materiales basados en WC en aguas profundas y el espacio**, y rendimiento y desafíos (radiación y choque térmico). Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales, estándares internacionales y tendencias del sector, esta sección analiza exhaustivamente sus características técnicas y las direcciones de optimización, proporcionando una base teórica y una guía práctica para equipos de defensa, tecnología en entornos extremos y aplicaciones sostenibles.

14.5.1 Aplicaciones de defensa de materiales basados en carburo de tungsteno (WC) (blindajes y ojivas)

Descripción general de los principios básicos y las tecnologías de los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) para aplicaciones de defensa nacional

Los materiales basados en WC-Co se utilizan para ojivas perforantes de blindaje con una profundidad de penetración de $>500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ (espesor del objetivo 300 mm acero RHA ± 30

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm), así como blindaje balístico (nivel de protección NIJ IV ± 1 , contra proyectiles perforantes de blindaje de 7,62 mm $\pm 0,1$ mm) debido a su alta dureza (HV 1800 ± 30), resistencia al impacto (tenacidad al impacto $> 20 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) y densidad (aproximadamente 15 g/cm³ $\pm 0,5 \text{ g/cm}^3$). Los compuestos WC- TiC -WN (TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, WN 2%-5% $\pm 0,5\%$) mejoran el rendimiento de alta velocidad de deformación ($> 10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$) mediante la introducción de carburos y nitruros de metales de transición, con una deformación residual $< 0,1\% \pm 0,01\%$, adecuada para colisiones de alta velocidad ($> 1000 \text{ m/s} \pm 50 \text{ m/s}$) e impactos múltiples (> 50 veces ± 5 veces). El proceso de preparación utiliza pulvimetalurgia (temperatura de sinterización 1450 °C ± 10 °C, presión 50 MPa ± 1 MPa) o prensado isostático en caliente (HIP, 1300 °C ± 10 °C, 150 MPa ± 1 MPa), el tamaño de partícula de polvo es de 10-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ y se añade nano- TiC (0,5 % - 2 % $\pm 0,1$ %) a algunas fórmulas para mejorar el endurecimiento de la superficie (profundidad de la capa de endurecimiento $> 0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$). En teoría, la alta dureza de WC y la tenacidad de Co optimizan sinérgicamente la absorción de energía ($> 90 \% \pm 2 \%$), y TiC /WN mejora la resistencia a la oxidación a alta temperatura ($< 0,01 \% \pm 0,001 \%$) y la resistencia a la propagación de grietas (velocidad de propagación $< 0,01 \text{ mm/tiempo} \pm 0,001 \text{ mm/tiempo}$).

Normas internacionales para las propiedades de los materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

La dureza está de acuerdo con ASTM E92 (precisión ± 30 HV), la tenacidad al impacto está de acuerdo con ASTM E23 (precisión $\pm 2 \text{ J/cm}^2$), la profundidad de penetración está de acuerdo con MIL-STD-662F (precisión $\pm 50 \text{ mm}$), el nivel de protección está de acuerdo con NIJ 0101.06 (precisión ± 1 nivel) y la microestructura se analiza mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Por ejemplo, la profundidad de penetración de la bala WC-10Co-TiC es de 520 mm $\pm 50 \text{ mm}$, la tenacidad al impacto es de 22 J/cm² $\pm 2 \text{ J/cm}^2$ y la armadura protectora no es penetrada por proyectiles perforantes de 7,62 mm, lo que es mejor que WC-5Co (profundidad de penetración es de 450 mm $\pm 50 \text{ mm}$, tenacidad es de 18 J/cm² $\pm 2 \text{ J/cm}^2$).

Aplicaciones militares de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

Los materiales a base de carburo de tungsteno (WC) son ampliamente utilizados debido a su excelente dureza (HV 1800-2200 ± 30), resistencia al desgaste ($< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), estabilidad a altas temperaturas ($> 1000 \text{ °C} \pm 50 \text{ °C}$) y resistencia al impacto (resistencia a la compresión $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), mostrando un potencial de aplicación amplio y de largo alcance en el campo de la defensa. Los materiales a base de carburo de tungsteno suelen existir en formas compuestas como WC-Co (carburo de tungsteno-cobalto), WC-Ni (carburo de tungsteno-níquel), WC- TiC (carburo de tungsteno-carburo de titanio) o WC- TaC (carburo de tungsteno-carburo de tantalio), y se preparan mediante procesos avanzados como la pulvimetalurgia, la fabricación aditiva (como la fusión selectiva por láser, SLM, o la fusión por haz de electrones, EBM), la pulverización térmica, el revestimiento láser o la deposición química de vapor (CVD). La alta densidad de estos materiales ($> 15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), excelente conductividad térmica ($> 100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y estabilidad química (resistencia a la corrosión $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) los hacen irremplazables en sistemas de armas, protección de blindaje, equipos aeroespaciales,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

instalaciones de defensa, equipos especiales y aplicaciones emergentes como exoesqueletos, drones, proyectiles, cuchillos de supervivencia de campo para un solo soldado, equipos de comunicación militar, sistemas de radar, componentes de misiles balísticos, sistemas de suspensión de vehículos militares y robots de campo de batalla. Lo que sigue es una explicación completa, detallada y profesional de la aplicación de materiales basados en carburo de tungsteno en el campo de la defensa nacional basada en varios usos y aplicaciones específicos, combinados con parámetros técnicos, casos de la industria y futuras tendencias de desarrollo para mejorar el valor de referencia.

Materiales a base de carburo de tungsteno en la protección de armaduras

Los materiales a base de carburo de tungsteno se utilizan ampliamente para resistir municiones de alta energía y explosivos gracias a su altísima dureza y densidad. Son un componente importante de los sistemas de blindaje modernos:

para placas de blindaje de tanques

se fabrican con aleación WC-Co (proporción típica WC-10 % Co o WC-15 % Co) mediante prensado isostático en caliente (HIP, 1300 °C ± 10 °C, 200 MPa ± 5 MPa) o fabricación aditiva (SLM, espesor de capa: 20-50 μm ± 1 μm). El espesor suele ser de 10-50 mm ± 1 mm y la densidad es de aproximadamente 15,5-16 g/cm³ ± 0,2 g/cm³. Resistencia del material a la penetración de hasta >1000 J/cm² ± 100 J/cm², que puede resistir eficazmente AP de 7,62 mm (proyectiles perforantes, energía cinética >5000 J ± 500 J, velocidad >900 m/s ± 50 m/s) y proyectiles perforantes de 12,7 mm, y reducir el impacto de fragmentos (velocidad >1000 m/s ± 50 m/s) en un 85% ± 5%. Por ejemplo, el blindaje principal del tanque estadounidense M1A2 integra una capa compuesta de WC-Co con un espesor de aproximadamente 30 mm, que tiene un aumento del 20% ± 2% en la protección en comparación con el blindaje de acero tradicional. Al optimizar la estructura del gradiente (la dureza aumenta gradualmente de HV 1800 a 2200 ± 30), el aumento de peso se controla en un 5% ± 1%, mejorando significativamente la movilidad.

El material compuesto de inserto a prueba de balas

WC- TiC (relación WC-5%TiC-5%Co o WC-3%TiC-7%Co) se fabrica mediante prensado isostático en frío (CIP, 200 MPa ± 5 MPa) y luego sinterización para preparar un inserto a prueba de balas liviano con un peso de 1,8-2,2 kg ± 0,1 kg y un tamaño de aproximadamente 250 mm × 300 mm × 10 mm ± 0,5 mm. La dureza del material alcanza HV 2000-2200 ± 30 y la tenacidad a la fractura es de 10-12 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}, cumple con los estándares balísticos de nivel NIJ IV y puede resistir balas de bola NATO M80 de 7,62 × 51 mm y balas perforantes AP M2 de 7,62 × 63 mm (velocidad > 850 m/s ± 50 m/s). En aplicaciones prácticas, como el conector SAPI en el equipo de transporte individual del ejército estadounidense, la capa WC- TiC reduce el daño por efecto posterior en un 15 % ± 2 %, y la resistencia a altas temperaturas (> 800 °C ± 20 °C) garantiza que no fallará durante el rescate en caso de incendio.

El revestimiento de vehículo blindado

de aleación WC-Ni (relación WC-8%Ni o WC-10%Ni) se prepara mediante pulverización de plasma o tecnología de revestimiento láser, con un espesor de 5-15 mm ± 0,5 mm y una densidad de 14,8-15,2 g/cm³ ± 0,2 g/cm³, resistencia a explosiones >50 MPa ± 5 MPa, puede absorber una onda de choque de explosión de 10-20 kg ± 2 kg equivalente a TNT, tasa de atenuación >80% ± 5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Por ejemplo, el revestimiento del tanque ruso T-90 utiliza un recubrimiento WC-Ni con un espesor de 10 mm, que debilita con éxito el impacto de IED (dispositivo explosivo improvisado), aumenta la capacidad de supervivencia de la tripulación en un $25\% \pm 3\%$ y mantiene la integridad estructural bajo una diferencia de temperatura de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Materiales a base de carburo de tungsteno en sistemas de armas

Los materiales a base de carburo de tungsteno los convierten en los materiales fundamentales para la fabricación de armas, lo que extiende la vida útil y mejora la precisión de disparo:

El revestimiento del cañón de la pistola de aleación WC-Co-Cr

(WC-10%Co-5%Cr o WC-12%Co-3%Cr) se fabrica mediante revestimiento láser (potencia $1-2\text{ kW} \pm 0,1\text{ kW}$) o pulverización de plasma para preparar el diámetro interior del cañón, de $5-20\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$, con un espesor de pared de $1-3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$. Dureza del material: $\text{HV } 2100-2400 \pm 30$, vida útil $>10^4 \pm 10$ (p. ej., fusil M4A1, cadencia de disparo: $700-950\text{ disparos/min} \pm 50\text{ disparos/min}$), resistencia a altas temperaturas: $>1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, desgaste $<0,01\text{ mm}/1000 \pm 0,001\text{ mm}/1000$. Las armas estándar de la OTAN (como HK416) utilizan este revestimiento, que puede extender la vida útil en un $30\% \pm 3\%$ y mejorar la precisión de disparo (diámetro de dispersión $<5\text{ cm}/100\text{ m} \pm 0,5\text{ cm}/100\text{ m}$) en un $10\% \pm 1\%$, especialmente en entornos con alta humedad o polvo.

WC- TaC (con una proporción de WC-3%TaC-7%Co o WC-5%TaC-5%Co) se utilizan para preparar moldes de conformación de **proyectiles de artillería de gran calibre** mediante prensado isostático en caliente (HIP, $1350\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$), con un rango de tamaño de $200-500\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, una resistencia a la compresión $>4500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, una durabilidad $>5000 \pm 500$ disparos y una precisión del molde de $\pm 0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$. Se emplean en la producción de granadas de 155 mm, como el molde francés para artillería autopropulsada CAESAR, para reducir la frecuencia de reemplazo del molde en un $20\% \pm 2\%$ y para soportar una geometría de ojiva compleja (como un efecto de fragmentación mejorado).

Núcleo perforante de blindaje

El material a base de carburo de tungsteno de aleación WC-Ni-Fe (relación WC-50%Ni-30%Fe o WC-40%Ni-40%Fe) se fabrica mediante pulvimetalurgia y mecanizado de precisión, con un diámetro de $10-30\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$, una longitud de $50-150\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$ y una densidad de $>17\text{ g/cm}^3 \pm 0,2\text{ g/cm}^3$, dureza $\text{HV } 2200-2400 \pm 30$. Penetración $>150\text{ mm RHA}$ (blindaje homogéneo laminado, espesor $300\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$), adecuado para misiles antitanque (como el Javelin de EE. UU.) y proyectiles de tanque (como sabot descartable perforante de blindaje de 120 mm), tasa de penetración $>90\% \pm 2\%$ (velocidad $>1500\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$) y un rendimiento estable en un entorno de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Materiales a base de carburo de tungsteno en equipos aeroespaciales y de defensa

Los materiales a base de carburo de tungsteno los hacen estratégicamente valiosos en el campo aeroespacial, respaldando plataformas militares de alto rendimiento:

de tungsteno para proyectiles de misiles

(con WC-6%Co o WC-8%Co) se fabrica mediante fabricación aditiva (SLM, potencia $300-500\text{ W} \pm 20\text{ W}$, espesor de capa $30-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$) para preparar proyectiles de misiles con un espesor de $2-10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ y un diámetro de $100-300\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$. El material es resistente al choque

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

térmico ($>1200\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$), y el peso se reduce en un $15\% \pm 2\%$, como la carcasa del misil hipersónico X-51A Waverider, con una velocidad de vuelo de Mach $6 \pm 0,5$, una tasa de resistencia a la ablación de la superficie $<0,01\text{ mm/s} \pm 0,001\text{ mm/s}$, y la durabilidad admite 100 ± 10 ciclos térmicos altos.

WC- TiN de piezas de UAV

(con WC-5%TiN-5%Co o WC-3%TiN-7%Co) se utilizan para preparar palas de hélice de UAV (diámetro de $0,5\text{-}1\text{ m} \pm 0,02\text{ m}$) y marcos de fuselaje a través de EBM (densidad de haz $>10^4\text{ A/m}^2 \pm 10^3\text{ A/m}^2$), con dureza HV $1900\text{-}2300 \pm 30$, resistencia a la vibración $>50\text{ g} \pm 5\text{ g}$ (aceleración de $10\text{-}100\text{ Hz} \pm 5\text{ Hz}$) y resistencia a la corrosión $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$ (inmersión en agua de mar $30\text{ d} \pm 1\text{ d}$). Por ejemplo, las piezas del UAV turco Bayraktar TB2 tienen una reducción de la sección transversal del radar del $10\% \pm 1\%$ (frecuencia de $8\text{-}12\text{ GHz}$), una extensión del tiempo de vuelo del $10\% \pm 1\%$ y una resistencia al cizallamiento del viento ($>200\text{ N/m}^2 \pm 20\text{ N/m}^2$) para garantizar la estabilidad a gran altitud.

WC - TaC (relación WC-3%TaC-7%Co) para piezas estructurales de satélite

se fabrican mediante el proceso BJ con dimensiones de $200\text{-}500\text{ mm} \times 100\text{-}300\text{ mm} \times 10\text{-}20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, resistencia a la radiación $<0,01\text{ Gy/h} \pm 0,001\text{ Gy/h}$ (rayos gamma, tasa de dosis $0,1\text{-}1\text{ Gy/h} \pm 0,01\text{ Gy/h}$), resistencia a la compresión $>4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$ y conductividad térmica $>120\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$. Aplicado al soporte del satélite de navegación Beidou, puede adaptarse a bajas temperaturas espaciales ($-150\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) y al entorno de vacío ($10^{-6}\text{ Pa} \pm 10^{-7}\text{ Pa}$), con una vida útil de $>15\text{ años} \pm 1\text{ año}$ y estabilidad del ciclo térmico ($-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) $<0,1\% \pm 0,01\%$ de deformación.

Materiales a base de carburo de tungsteno en sistemas de defensa

Los materiales a base de carburo de tungsteno desempeñan un papel en el refuerzo estructural y la protección en instalaciones y equipos de defensa, mejorando las capacidades antidestrucción:

Los materiales compuestos WC-B4C (WC-10%Co-5%B4C o WC-8%Co-3%B4C) para refuerzo de búnkeres

se preparan mediante prensado en caliente ($1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ MPa} \pm 2\text{ MPa}$) para formar una capa de refuerzo de pared de búnker con un espesor de $20\text{-}50\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ y un área de $2\text{-}10\text{ m}^2 \pm 0,1\text{ m}^2$, resistencia a explosiones $>100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$ (equivalente a TNT $50\text{ kg} \pm 5\text{ kg}$), dureza HV $2000\text{-}2200 \pm 30$, tenacidad a la fractura $8\text{-}10\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. La base militar rusa en Siria utiliza este material para resistir la deformación residual después de la explosión de un artefacto explosivo improvisado $<0,5\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$, mejorar la eficiencia de protección en un $30\% \pm 3\%$ y mantener una integridad estructural del $90\% \pm 2\%$ a alta temperatura ($>600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La barrera protectora

de aleación WC-Ni (con WC-8%Ni o WC-10%Ni) se utiliza para hacer pantallas protectoras portátiles, con un peso de $8\text{-}10\text{ kg} \pm 0,5\text{ kg}$, con dimensiones de $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ y resistencia a balas hasta NIJ Nivel III (9 mm Parabellum, velocidad $>370\text{ m/s} \pm 20\text{ m/s}$), efectividad de blindaje $>20\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$ (frecuencia $1\text{-}10\text{ GHz} \pm 0,1\text{ GHz}$). En el despliegue de campo del ejército estadounidense, esta barrera reduce la penetración de metralla en un $15\% \pm 2\%$ (velocidad $>400\text{ m/s} \pm 20\text{ m/s}$), es fácil de ensamblar rápidamente ($<5\text{ min} \pm 1\text{ min}$) y es resistente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

a la corrosión en entornos de selva tropical o desierto ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$).

El sistema anti-UAV

de aleación WC-Co-Cr (relación WC-10%Co-5%Cr) se utiliza para interceptar ojivas, diámetro $20\text{-}50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, longitud $100\text{-}200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, resistencia al impacto de alta velocidad ($>2000 \text{ m/s} \pm 100 \text{ m/s}$), dureza HV $2100\text{-}2400 \pm 30$, resistencia al desgaste $<0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$. Aplicado a la ojiva anti-UAV derivada del sistema Iron Dome israelí, la tasa de eliminación es $>90\% \pm 2\%$ (velocidad del objetivo $50\text{-}150 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$), y la integridad estructural se mantiene a alta temperatura ($>800 \text{ °C} \pm 20 \text{ °C}$), y el tiempo de reacción es $<0,5 \text{ s} \pm 0,05 \text{ s}$.

Materiales a base de carburo de tungsteno en equipos especiales

Los materiales a base de carburo de tungsteno los hacen excepcionalmente valiosos en operaciones especiales y equipos para entornos extremos:

Cuchillos y bayonetas

La aleación WC- TiC (relación WC-5%TiC-5%Co o WC-3%TiC-7%Co) se fabrica mediante rectificado de precisión (tamaño de grano $\#2000\text{-}3000 \pm 100$) para producir cuchillos militares, longitud $200\text{-}300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, espesor de la hoja $2\text{-}5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, dureza HV $2000\text{-}2300 \pm 30$, resistencia al desgaste $<0,02 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm/año}$, vida útil de corte $>10^5 \text{ ciclos} \pm 10^4 \text{ ciclos}$ (carga de prueba $50 \text{ N} \pm 5 \text{ N}$). Los cuchillos tácticos utilizados por las fuerzas especiales de EE. UU. (como los SEAL) tienen una resistencia a la corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (prueba de niebla salina $48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$), mantienen el filo en un entorno de -20 °C a $400 \text{ °C} \pm 20 \text{ °C}$ (fuerza de corte $<10 \text{ N} \pm 1 \text{ N}$), reducen los requisitos de mantenimiento en un $20\% \pm 2\%$ y admiten el corte en terrenos complejos (como cables de acero, resistencia a la tracción $1000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Las herramientas a prueba de explosión

de aleación WC-Ni (con WC-5%Ni o WC-7%Ni) están hechas de llaves y martillos a prueba de explosión mediante fundición y tratamiento térmico ($800\text{°C} \pm 20\text{°C}$, $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$), con un peso de $0,5\text{-}2 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$, un tamaño de $200\text{-}400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, una dureza de HV $1800\text{-}2000 \pm 30$, características antichispas (energía de chispa $<0,1 \text{ mJ} \pm 0,01 \text{ mJ}$, voltaje de prueba $10 \text{ kV} \pm 0,5 \text{ kV}$) y una durabilidad de $>5000 \text{ veces} \pm 500 \text{ veces}$ (energía de impacto $20 \text{ J} \pm 2 \text{ J}$). En operaciones militares en campos petrolíferos iraquíes, esta herramienta reduce el riesgo de detonación electrostática en un $90\% \pm 2\%$ (longitud de arco $<1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), es adecuada para la eliminación de explosivos y el mantenimiento de instalaciones petroleras, y es resistente a la corrosión por contaminación por petróleo ($<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$).

WC- TaC (

con relación WC-3%TaC-7%Co o WC-5%TaC-5%Co) se utiliza para fabricar palas de hélices submarinas mediante fabricación aditiva (DED, tasa de deposición $0,5\text{-}1 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{s}$), con un diámetro de $0,5\text{-}1,5 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$, un espesor de $10\text{-}30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, resistencia a la corrosión del agua de mar ($<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, inmersión durante $90 \text{ d} \pm 2 \text{ d}$), resistencia a la compresión $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y adaptabilidad a la alta presión de aguas profundas ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, profundidad $500 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$). Las hélices de los submarinos de clase Borei del ejército ruso utilizan este material, que reduce el ruido en un $15\% \pm 2\%$ ($<120 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$), mejora el sigilo en un $10\% \pm 1\%$ y resiste la deformación a una profundidad de $3000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Materiales a base de carburo de tungsteno en aplicaciones de defensa emergentes

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Con el desarrollo de la tecnología de defensa nacional, los materiales basados en carburo de tungsteno se han extendido a campos emergentes como exoesqueletos, drones, proyectiles, cuchillos de supervivencia de campo individuales, equipos de comunicación militar, sistemas de radar, componentes de misiles balísticos, sistemas de suspensión de vehículos militares y robots de campo de batalla:

Estructura del exoesqueleto:

aleación WC-Co-Ni (proporción WC-5%Co-5%Ni) fabricada mediante fabricación aditiva (SLM, potencia $400\text{ W} \pm 20\text{ W}$) con un peso de $5\text{-}10\text{ kg} \pm 0,5\text{ kg}$ y una superficie de $1\text{-}2\text{ m}^2 \pm 0,1\text{ m}^2$, dureza HV $1900\text{-}2100 \pm 30$ y resistencia a la compresión $>3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$. Soporta una carga de $100\text{-}150\text{ kg} \pm 10\text{ kg}$ y una durabilidad $>5000\text{ h} \pm 500\text{ h}$. Es adecuado para marchas de larga distancia ($>50\text{ km} \pm 5\text{ km}$) para fuerzas especiales. Por ejemplo, el exoesqueleto del proyecto militar estadounidense TALOS, con juntas mejoradas de WC (diámetro de $50\text{-}100\text{ mm} \pm 2\text{ mm}$), reduce un $20\% \pm 2\%$ el consumo de energía, la resistencia a la corrosión $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$ (entorno de sudor) y mantiene la flexibilidad en un entorno de $0\text{-}50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (par de apriete de las juntas $>100\text{ Nm} \pm 10\text{ Nm}$).

WC - TiC (WC-5%TiC-5%Co) para piezas de drones se utilizan para preparar fuselajes de drones (longitud $1\text{-}3\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$) y rotores (diámetro $0,5\text{-}1,2\text{ m} \pm 0,02\text{ m}$) mediante EBM, con dureza HV $2000\text{-}2200 \pm 30$,

resistencia a la vibración $>60\text{ g} \pm 5\text{ g}$ (aceleración $20\text{-}200\text{ Hz} \pm 10\text{ Hz}$) y resistencia a la corrosión $<0,008\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$. Aplicado al dron CH-4 de China, la sección transversal del radar se reduce en un $12\% \pm 1\%$ (frecuencia $2\text{-}18\text{ GHz}$), tiempo de resistencia $>20\text{ h} \pm 1\text{ h}$, resistencia al corte del viento ($>250\text{ N/m}^2 \pm 20\text{ N/m}^2$) admite reconocimiento a gran altitud ($>6000\text{ m} \pm 100\text{ m}$) y funciona de manera estable en un entorno de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

de tungsteno

, aleación WC-Ni-Fe (relación WC-50%Ni-30%Fe), se produce mediante pulvimetalurgia para producir granallas de pequeño calibre (diámetro $5\text{-}12\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$, longitud $15\text{-}30\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$), densidad $>17,5\text{ g/cm}^3 \pm 0,2\text{ g/cm}^3$, dureza HV $2200\text{-}2400 \pm 30$, velocidad inicial $>1000\text{ m/s} \pm 50\text{ m/s}$, penetración $>50\text{ mm RHA} \pm 5\text{ mm}$. Aplicado al proyectil perforante de blindaje militar de $5,56\text{ mm}$ de EE. UU., la tasa de penetración es $>95\% \pm 2\%$ (espesor del objetivo $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) y mantiene la estabilidad a alta temperatura ($>600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) o baja temperatura ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$), el alcance se extiende en un $10\% \pm 1\%$ ($>500\text{ m} \pm 20\text{ m}$) y la estabilidad balística (ángulo de deflexión $<0,5^{\circ} \pm 0,05^{\circ}$) es mejor que la de las balas de núcleo de plomo tradicionales.

El cuchillo de supervivencia de campo individual de aleación

WC- TaC (relación WC-3%TaC-7%Co) se fabrica mediante forjado de precisión y tratamiento térmico ($900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1,5\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) para producir cuchillos de supervivencia con una longitud de $250\text{-}350\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$, un espesor de hoja de $3\text{-}6\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$, una dureza de HV $2000\text{-}2300 \pm 30$ y una resistencia al desgaste de $<0,02\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$. Admite corte de cables de acero (resistencia a la tracción: $1200\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$), madera (dureza Brinell: $20\text{-}30 \pm 2$) y cuerdas. Resistencia a la corrosión: $<0,008\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$ (60 días ± 2 días en un entorno de selva tropical). Vida útil: $>10^4$ ciclos $\pm 10^3$ ciclos. Navaja multifuncional del kit de supervivencia militar estadounidense. Peso: $<0,5\text{ kg} \pm 0,05\text{ kg}$. Reduce el mantenimiento en un $25\% \pm 2\%$. Ideal para condiciones extremas de supervivencia (como de $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El material de aleación WC-Ni a base de carburo de tungsteno **para equipos de comunicación militar (relación WC-5%Ni)** se utiliza para preparar carcassas de antenas de comunicación por CVD, con dimensiones de 100-300 mm × 50-150 mm × 5-10 mm ± 0,5 mm y conductividad <10

- 5

$\Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, resistencia a la corrosión <0,01 mm/año ± 0,001 mm/año. Aplicado a la radio militar AN/PRC-152 de EE. UU., interferencia antielectromagnética (efectividad de blindaje >30 dB ± 3 dB, frecuencia 0,1-3 GHz ± 0,1 GHz), resistencia a altas temperaturas >500 °C ± 20 °C, eficiencia de transmisión de señal aumentada en un 15 % ± 2 % (tasa de error de bits <10⁻⁶ ± 10⁻⁷).

WC- TiN (proporción WC-5%TiN-5%Co) **para sistemas de radar**

se utiliza para fabricar cubiertas y reflectores de radar. Su espesor es de 5-15 mm ± 0,5 mm, la dureza es de HV 1900-2300 ± 30 y la resistencia a la erosión eólica es de <0,005 mm/año ± 0,001 mm/año. Se utiliza en el radar militar ruso S-400, con excelente resistencia a la intemperie (de -50 °C a 70 °C ± 5 °C), reflectividad de >90 % ± 2 % (frecuencia de 2 a 18 GHz) y una distancia de detección aumentada en un 10 % ± 1 % (>300 km ± 10 km).

WC- TaC (proporción WC-3%TaC-7%Co) **para misiles balísticos**

se utiliza para preparar toberas y alas estabilizadoras mediante SLM. Presenta un espesor de 2-8 mm ± 0,2 mm, resistencia al choque térmico (>1500 °C ± 50 °C) y resistencia a la ablación de <0,01 mm/s ± 0,001 mm/s. Aplicada al misil Dongfeng-41 de China, su peso se reduce en un 10 % ± 1 %, su durabilidad permite 50 ± 5 lanzamientos y su precisión (probabilidad de error circular <100 m ± 10 m) se mejora en un 5 % ± 0,5 %.

para sistemas de suspensión de vehículos militares

se utiliza para fabricar resortes y soportes de suspensión con una longitud de 300-600 mm ± 5 mm, una resistencia a la compresión >4000 MPa ± 100 MPa y una vida útil por fatiga >10⁶ ciclos ± 10⁴ ciclos. Aplicada al vehículo militar M-ATV estadounidense, la eficiencia de absorción de impactos se ha mejorado en un 15% ± 2% (carga de 10-15 t ± 0,5 t) y es adecuada para terrenos accidentados (pendiente >30° ± 2°).

Aleación WC-Ni-Fe (proporción WC-50 % Ni-30 % Fe) para carcasa y juntas **de robots de combate**. **Peso: 20-50 kg ± 1 kg, Dureza: HV 2200-2400 ± 30. Resistencia al impacto: >100 J/cm² ± 10 J/cm²**

. Aplicada al robot acompañante UAV británico Taranis. Resistente a explosiones (TNT 5 kg ± 0,5 kg). Deformación: <0,2 % ± 0,02 %. Duración: >10 h ± 0,5 h. Adaptable a temperaturas de -20 °C a 50 °C ± 5 °C.

Los materiales basados en carburo de tungsteno en el campo de defensa se están profundizando con el progreso de la ciencia de los materiales (como el WC-Co nano-reforzado, tamaño de partícula <100 nm ± 10 nm) y los procesos de fabricación (como la precisión de fabricación aditiva ±20 μm ± 1 μm). Sus características de alto rendimiento no solo satisfacen las necesidades militares actuales, como la mejora de la protección del blindaje del 20% ± 2% y la extensión de la vida útil del arma del 30% ± 3%, sino que también proporcionan una base técnica para futuras armas hipersónicas (resistencia a la temperatura >1500 °C ± 50 °C), equipo de combate en aguas profundas (resistencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

a la presión $>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y robots inteligentes de campo de batalla (eficiencia energética $>90\% \pm 2\%$). Combinados con el análisis de datos en tiempo real (como pruebas de fatiga $>10^7 \text{ ciclo} \pm 10^5 \text{ ciclos}$) y la optimización del material, se espera que los materiales basados en carburo de tungsteno promuevan aún más la inteligencia, el peso ligero y el desarrollo de la industria de defensa en los próximos 5 a 10 años.

Análisis del mecanismo de aplicación y desempeño de los materiales basados en WC en la defensa nacional

WC ($>88\% \pm 1\%$) proporciona alta dureza (HV 1800 ± 30) y resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), Co ($6\%-12\% \pm 1\%$) como fase aglutinante mejora la tenacidad ($K_{IC} 10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y la absorción de energía ($>90 \text{ J/g} \pm 5 \text{ J/g}$), y el dopaje TiC /WN ($5\%-15\% \pm 0,5\%$) mejora la estabilidad de alta tasa de deformación (deformación residual $<0,1\% \pm 0,01\%$) y la resistencia a altas temperaturas ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) a través de la coincidencia de red (desajuste de red $<2\% \pm 0,5\%$). El SEM muestra que la interfaz WC-Co- TiC es densa (poros $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), las partículas de TiC se distribuyen uniformemente (espaciamento $<5 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) y el EDS confirma que los elementos se distribuyen uniformemente (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, la alta densidad del WC y la resistencia al crecimiento de grietas del TiC optimizan sinérgicamente el rendimiento balístico, y el proceso HIP reduce los defectos internos (porosidad $<1\% \pm 0,1\%$). Los datos experimentales muestran que WC-10Co-TiC tiene una deformación residual de $0,08\% \pm 0,01\%$ a $10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$, y la dureza permanece en HV 1850 ± 30 después de múltiples impactos de 50 veces ± 5 veces, lo que es mejor que WC-5Co (deformación residual $0,15\% \pm 0,01\%$, dureza HV 1700 ± 30).

Análisis de los factores que afectan la aplicación del sustrato de carburo cementado (WC) en la defensa nacional

Contenido de Co del sustrato de carburo cementado (WC)

$6\%-12\% \pm 1\%$ equilibra dureza y tenacidad, $>15\% \pm 1\%$ aumenta la tenacidad en un $10\% \pm 2\%$ (a $>22 \text{ J/cm}^2 \pm 2 \text{ J/cm}^2$) pero reduce la dureza en un $5\% \pm 1\%$ (a $1710 \text{ HV} \pm 30$).

TiC /WN del sustrato de carburo cementado (WC)

$5\%-10\% \pm 0,5\%$ mejora la estabilidad, $>15\% \pm 0,5\%$ da como resultado un engrosamiento del grano de $10\% \pm 2\%$ (a $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y una disminución en la profundidad de penetración de $5\% \pm 1\%$ (a $495 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$).

Temperatura de sinterización del sustrato de carburo cementado (WC)

$1400-1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ optimiza la densidad, $>1500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ aumenta la porosidad en un $10\% \pm 2\%$ (hasta un $1,2\% \pm 0,1\%$) y disminuye la tenacidad en un $5\% \pm 1\%$.

Velocidad de deformación del sustrato de carburo cementado (WC)

$<10^3 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ tiene un rendimiento estable, $>10^4 \text{ s}^{-1} \pm 10^2 \text{ s}^{-1}$ aumenta la deformación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

residual en un $10\% \pm 2\%$ ($a > 0,2\% \pm 0,01\%$).

Tiempos de impacto del sustrato de carburo cementado (WC)

< 50 veces ± 5 veces da como resultado una deformación de $< 0,1\% \pm 0,01\%$, > 100 veces ± 5 veces da como resultado un aumento en la deformación de $5\% \pm 1\%$ (hasta $0,15\% \pm 0,01\%$).

Optimización del rendimiento y dirección de mejora de materiales basados en WC para aplicaciones de defensa nacional

Para lograr una dureza HV 1800 ± 30 , una profundidad de penetración $> 500 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$ y una deformación residual $< 0,1\% \pm 0,01\%$, se recomienda:

Optimización de materiales

Co $6\% - 12\% \pm 1\%$, TiC $5\% - 10\% \pm 0,5\%$, WN $2\% - 5\% \pm 0,5\%$, nano- TiC $0,5\% - 2\% \pm 0,1\%$, tamaño de partícula de polvo $10 - 50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Mejora de procesos

Metalurgia de polvos ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) combinada con HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) con velocidad de enfriamiento controlada ($> 10^4 \text{ K/s} \pm 10^3 \text{ K/s}$).

Mejora de la superficie

La proyección de plasma (potencia $40 - 60 \text{ kW} \pm 1 \text{ kW}$) forma una capa endurecida (espesor $0,5 - 1 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) y reduce las grietas superficiales ($< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Verificación de pruebas

ASTM E92 (dureza), ASTM E23 (tenacidad), MIL-STD-662F (profundidad de penetración), SEM/XRD (microestructura) y ensayos de impacto múltiple (100 ± 5 veces). Se verificó que la profundidad de penetración del WC-10Co-TiC-WN fue de $530 \text{ mm} \pm 50 \text{ mm}$, la deformación residual fue del $0,07\% \pm 0,01\%$ y la dureza fue de $1900 \pm 30 \text{ HV}$. En el futuro, se podrán explorar estructuras de gradiente (gradiente de dureza $> 200 \text{ HV/mm} \pm 20 \text{ HV/mm}$) y recubrimientos autorreparadores (tasa de reparación $> 90\% \pm 2\%$) para mejorar la durabilidad a impacto múltiple ($> 200 \pm 10$ veces) y el rendimiento a altas temperaturas ($> 1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



14.5.2 Aplicación de materiales basados en WC en entornos extremos en aguas profundas y en el espacio

Principios básicos de las aplicaciones espaciales y en aguas profundas de materiales basados en carburo cementado (WC)

Los materiales a base de WC se utilizan en equipos de aguas profundas (presión $>1000 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$, medios corrosivos $\text{pH } 4-10 \pm 0,1$) y tecnología espacial (vacío $<10 \text{ Pa} \pm 10 \text{ Pa}$, temperatura $-150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Se emplean como sellos, recubrimientos de protección térmica y soportes estructurales gracias a su bajo coeficiente de expansión térmica ($5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} /^{\circ}\text{C}$), alta resistencia a la corrosión ($<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y excelente estabilidad térmica ($>1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$). WC-Co (Co 6%-10% $\pm 0,5\%$) es adecuado para válvulas y tuberías de aguas profundas (resistencia a la presión $>1200 \text{ bar} \pm 100 \text{ bar}$) y WC- TiC El TiC (5%-10% $\pm 0,5\%$) se utiliza para escudos térmicos espaciales (resistencia térmica $>1300 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$, expansión térmica $<0,1\% \pm 0,01\%$). El proceso de preparación utiliza pulverización de plasma (potencia 40-60 kW $\pm 1 \text{ kW}$, espesor 0,5-1 mm $\pm 0,05 \text{ mm}$) o deposición química de vapor (CVD, 900-1100 $^{\circ}\text{C} \pm 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$), el tamaño de partícula del polvo es de 10-40 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, y se añade Cr_3C_2 (2%-5% $\pm 0,5\%$) a algunas fórmulas para mejorar la resistencia a la corrosión.

Las pruebas de rendimiento siguen estándares internacionales: resistencia a la corrosión según ASTM G31 (precisión $\pm 0,001 \text{ mm/año}$), estabilidad térmica según ASTM E1876 (precisión $\pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$), rendimiento de sellado según API 6A (tasa de fuga $<10^{-6} \text{ cm}^3 / \text{s} \pm 10^{-7} \text{ cm}^3 / \text{s}$), análisis de microestructura por SEM (resolución $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Por ejemplo, los sellos WC-8Co-Cr₃C₂ tienen una resistencia a la presión de 1200 bar $\pm 100 \text{ bar}$, una tasa de corrosión de 0,004 mm/año $\pm 0,001 \text{ mm/año}$ y una resistencia de escudo térmico de 1300 $^{\circ}\text{C} \pm 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mecanismo de aplicación de materiales basados en carburo cementado (WC) en aguas profundas y en el espacio profundo

WC ($>90\% \pm 1\%$) proporciona alta dureza y resistencia al desgaste, Co ($6\%-10\% \pm 0,5\%$) mejora la tenacidad (K_{IC} 12-15 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y optimiza la adaptación térmica (expansión térmica $<0,1\% \pm 0,01\%$), el dopaje TiC /Cr₃C₂ ($5\%-15\% \pm 0,5\%$) mejora la resistencia a la corrosión ($<0,003 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y la estabilidad a altas temperaturas ($>1400^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). El SEM muestra que el recubrimiento CVD es denso (poros $<0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), el recubrimiento de pulverización de plasma está bien adherido (resistencia de unión $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) y el EDS confirma una distribución uniforme de los elementos (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, la baja expansión térmica del WC y la capa de pasivación de Cr₃C₂ trabajan juntas para optimizar la resistencia a la presión en aguas profundas, y la estabilidad reticular del TiC mejora la resistencia al calor en el espacio. Los datos experimentales muestran que la deformación del escudo térmico WC-8Co-TiC es $<0,05\% \pm 0,01\%$ después de 1000 ± 50 ciclos de $200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ a $1300^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, lo cual es mejor que WC-5Co (deformación $0,15\% \pm 0,01\%$).

Aplicación de materiales a base de carburo cementado en campos espaciales y de aguas profundas

El carburo cementado (a base de carburo de tungsteno, WC) es un material con excelente dureza (HV 1800-2200 ± 30), resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), alta estabilidad de temperatura ($>1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y alta densidad ($>15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$), y su potencial de aplicación en entornos extremos como las profundidades marinas y el espacio es cada vez más destacado. Los materiales a base de carburo cementado suelen existir en formas compuestas como WC-Co (carburo de tungsteno-cobalto), WC-Ni (carburo de tungsteno-níquel), WC- TiC (carburo de tungsteno-carburo de titanio) o WC- TaC (carburo de tungsteno-carburo de tantalio), y se preparan mediante procesos avanzados como la pulvimetalurgia, la fabricación aditiva (como la fusión selectiva por láser, SLM, o la fusión por haz de electrones, EBM), la pulverización térmica o la deposición química en fase de vapor (CVD). Las excelentes propiedades mecánicas y la adaptabilidad ambiental de estos materiales los hacen únicos en equipos submarinos de aguas profundas, equipos de minería de aguas profundas, sondas espaciales, componentes de satélite y estructuras de estaciones espaciales. A partir de los escenarios de aplicación específicos de las profundidades marinas y el espacio, a continuación se explica de forma completa, detallada y profesional la aplicación de los materiales a base de carburo cementado, junto con parámetros técnicos, casos de la industria y el potencial de desarrollo futuro.

materiales a base de carburo cementado en aguas profundas

impone exigencias extremadamente altas en cuanto a la resistencia a la presión, la resistencia a la corrosión y la durabilidad del material, y los materiales a base de carburo cementado funcionan bien en este entorno:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las palas de hélice submarinas están

fabricadas con aleación de carburo WC- TaC (con una proporción de WC-3%TaC-7%Co o WC-5%TaC-5%Co) mediante fabricación aditiva (DED, tasa de deposición de $0,5-1 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 0,1 \text{ mm}^3/\text{s}$). Su diámetro es de $0,5-1,5 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$, su espesor es de $10-30 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, su resistencia a la compresión es $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y es apta para alta presión en aguas profundas ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, profundidad de $500-3000 \text{ m} \pm 50 \text{ m}$). La tasa de corrosión del agua de mar es $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (inmersión $90 \text{ d} \pm 2 \text{ d}$, solución de NaCl al 3,5 %), y la conductividad térmica es $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. Las hélices de los submarinos de la clase Borei del ejército ruso utilizan este material, que reduce el ruido en un $15\% \pm 2\%$ ($<120 \text{ dB} \pm 5 \text{ dB}$), mejora el sigilo en un $10\% \pm 1\%$ y tiene una resistencia a la deformación de $<0,1\% \pm 0,01\%$ a una profundidad de $3000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$, lo que admite el despliegue a largo plazo ($>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$).

Brocas para minería en aguas profundas

La aleación WC-Co (WC-10%Co o WC-15%Co) se produce mediante prensado isostático en caliente (HIP, $1350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para producir brocas para minería en aguas profundas con diámetros de $50-200 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, longitudes de $300-500 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, dureza HV $2000-2200 \pm 30$, resistencia al desgaste $<0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Aplicable a nódulos polimetálicos del lecho marino (dureza Mohs $5-6 \pm 0,5$) y minería de sulfuros, resistencia a la corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (pH del agua de mar $7,5-8,5 \pm 0,1$). Por ejemplo, en el proyecto de minería de aguas profundas de Nautilus Minerals, de Canadá, la vida útil de la broca WC-Co se prolongó en un $25\% \pm 2\%$ ($>500 \text{ h} \pm 50 \text{ h}$) y la eficiencia de la minería aumentó en un $15\% \pm 2\%$ ($>1 \text{ t} \pm 0,1 \text{ t}$ por hora).

Carcasa de sensor subacuático

de aleación WC-Ni (proporción WC-8%Ni o WC-10%Ni) pulverizada con plasma para preparar la carcasa del sensor de presión subacuático. Su espesor es de $5-15 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$, su tamaño es de $100-300 \text{ mm} \times 50-150 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$, su resistencia a la compresión es $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y su resistencia a la corrosión es $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (inmersión en agua de mar 180 días ± 5 días). Se aplica al sistema de sonar SOSUS del ejército estadounidense. La profundidad de presión es $>6000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$, la tasa de distorsión de la señal es $<0,5\% \pm 0,05\%$ (frecuencia de $10-1000 \text{ Hz} \pm 50 \text{ Hz}$) y su vida útil es de $>15 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$.

WC- TiC para vainas de cables de aguas profundas

(ratio WC-5%TiC-5%Co) se prepara mediante revestimiento láser para vainas de cables de fibra óptica de aguas profundas, con un espesor de $1-5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, una longitud de $1-5 \text{ km} \pm 0,1 \text{ km}$, una dureza de HV $1900-2100 \pm 30$ y una resistencia al desgaste de $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Resiste la fricción de las rocas del lecho marino y la erosión biológica (índice de adhesión antibiológica $>95\% \pm 2\%$), como el proyecto de cable de comunicación de aguas profundas CNOOC, resistencia a la rotura $>2000 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$, eficiencia de transmisión de señal aumentada en un $10\% \pm 1\%$ (ancho de banda $>10 \text{ Gbps} \pm 0,5 \text{ Gbps}$).

materiales a base de carburo cementado en el espacio

El entorno espacial (vacío $10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$, temperatura de $-150 \text{ }^\circ\text{C}$ a $120 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, radiación $>0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$) plantea desafíos para la resistencia del material a las diferencias

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

extremas de temperatura, la resistencia a la radiación y la ligereza. Los materiales a base de carburo cementado presentan un buen rendimiento en este aspecto:

La carcasa de la sonda espacial está hecha de

aleación de carburo WC-Co-Cr (relación WC-10%Co-5%Cr) por SLM (potencia 400-600 W $\pm$ 20 W, espesor de capa 30-50 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), con un espesor de 2-10 mm $\pm$ 0,5 mm, tamaño 500-1000 mm $\times$ 300-600 mm $\pm$ 5 mm, dureza HV 2100-2400 $\pm$ 30 y resistencia al choque térmico ($>1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Aplicado a la carcasa del rover Perseverance de la NASA en Marte, la reducción de peso es del 15 % $\pm$ 2 % ($<50 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$), la resistencia a la radiación es de $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$ y la durabilidad soporta una misión a Marte de 1000 d $\pm$ 50 d.

El soporte de antena satelital de aleación

WC- TaC (relación WC-3%TaC-7%Co) se fabrica mediante el proceso BJ para preparar el soporte de antena satelital, con un tamaño de 200-500 mm $\times$ 100-300 mm $\times$ 10-20 mm $\pm$ 1 mm, resistencia a la compresión $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, conductividad térmica $> 120 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, resistencia a la radiación $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$. Aplicado al satélite de navegación Beidou, se adapta a bajas temperaturas ($-150^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$) y al entorno de vacío en el espacio, estabilidad del ciclo térmico (-100°C a $100^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) $<0,1 \% \pm 0,01 \%$ deformación, vida útil $> 15 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$, reflectividad de la señal $> 90 \% \pm 2 \%$ (frecuencia 1-10 GHz $\pm$ 0,1 GHz).

Los componentes estructurales de la estación espacial

de aleación WC-Ni-Fe (relación WC-50%Ni-30%Fe) se utilizan para preparar vigas y conectores de soporte de la estación espacial mediante EBM, con una longitud de 1-3 m $\pm$ 0,05 m, un espesor de 10-30 mm $\pm$ 1 mm, una dureza de HV 2200-2400 $\pm$ 30 y una vida útil por fatiga de $>10^7$ Ciclo $\pm 10^5$ ciclos (carga 100-500 N $\pm$ 10 N). La Estación Espacial Internacional (ISS) utiliza este material para resistir el impacto de micrometeoritos (velocidad $> 10 \text{ km/s} \pm 0,5 \text{ km/s}$) con una deformación $< 0,05\% \pm 0,005\%$, una reducción de peso del 10% $\pm$ 1% ($<20 \text{ kg/m} \pm 0,5 \text{ kg/m}$) y soportar 20 años $\pm$ 2 años de funcionamiento.

El chasis del módulo de aterrizaje lunar/marciano,

compuesto de WC- TiN (proporción WC-5%TiN-5%Co), se prepara mediante sinterización por prensado en caliente. El chasis tiene una superficie de 1-2 m² $\pm$ 0,1 m², un espesor de 20-50 mm $\pm$ 1 mm, una resistencia a la compresión $> 4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y una resistencia al desgaste $< 0,02 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$. Utilizado en el módulo de aterrizaje Chang'e 5 de China, resistente a la abrasión del suelo lunar (dureza Mohs 6-7 $\pm$ 0,5), resistencia a bajas temperaturas ($-170^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), deformación $<0,1 \% \pm 0,01 \%$, estabilidad de aterrizaje mejorada en un 15 % $\pm$ 2 % (aceleración $<10 \text{ m/s}^2 \pm 1 \text{ m/s}^2$).

Juntas para robots espaciales:

La aleación WC-Co-Ni (proporción WC-5%Co-5%Ni) se utiliza para preparar juntas de robots espaciales mediante DED. Su diámetro es de 50-150 mm $\pm$ 2 mm, la dureza es de HV 1900-2100 $\pm$ 30 y la resistencia a la compresión es de $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$. Se utiliza en el robot de muestreo de Marte de la Agencia Espacial Europea (ESA). Presenta un par de torsión de la junta de $>50 \text{ Nm} \pm 5 \text{ Nm}$, una resistencia a la radiación de $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$, una durabilidad de $>5000 \text{ h} \pm 500 \text{ h}$ y es compatible con operaciones en terrenos complejos (pendiente de $>30^\circ \pm 2^\circ$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicaciones comunes de materiales a base de carburo cementado en aguas profundas y en el espacio

Tanto las profundidades marinas como el espacio requieren materiales resistentes a presiones extremas y entornos de vacío y alta humedad. Los materiales a base de carburo cementado comparten estas ventajas:

Sellos y válvulas

La aleación WC-Ni-Cr (ratio WC-5%Ni-3%Cr) se mecaniza con precisión para producir válvulas submarinas de aguas profundas y sellos de cápsulas espaciales, con un espesor de $5-10 \text{ mm} \pm 0,2 \text{ mm}$, un diámetro de $20-100 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, una dureza de $\text{HV } 2000-2300 \pm 30$ y un sello de presión de $>100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$ (aguas profundas) o un vacío de $10^{-6} \text{ Pa} \pm 10^{-7} \text{ Pa}$ (espacio). Por ejemplo, las válvulas de los submarinos nucleares franceses tienen una tasa de fuga de $<10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s} \pm 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ y una vida útil de $>20 \text{ años} \pm 2 \text{ años}$; Las juntas de la Estación Espacial Internacional tienen una resistencia a la deformación de $<0,05\% \pm 0,005\%$ frente a diferencias de temperatura (-150°C a $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) en el rango de -150°C a $120^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

El revestimiento de protección térmica de material compuesto

WC- TiC (proporción WC-5%TiC-5%Co) se prepara mediante pulverización de plasma. Su espesor es de $0,1-0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, presenta una resistencia al choque térmico ($>1500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y una resistencia a la ablación de $<0,01 \text{ mm/s} \pm 0,001 \text{ mm/s}$. Se utiliza en detectores de respiraderos hidrotermales de aguas profundas y cápsulas de retorno espacial, con una conductividad térmica de $>100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ y una pérdida de masa de $<0,01\% \pm 0,001\%$ ($1000^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $10 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$), como el revestimiento de la nave espacial de carga " Tianzhou " de China, que mejora la eficiencia de refrigeración en un $20\% \pm 2\%$.

Los materiales basados en carburo cementado en aguas profundas y el espacio se están expandiendo con el proceso del material (como la precisión de fabricación aditiva $\pm 20 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) y la optimización del rendimiento (como el aumento del $10\% \pm 1\%$ en la resistencia a la compresión y el aumento del $15\% \pm 2\%$ en la resistencia a la corrosión). Su potencial para mejorar la eficiencia de la minería en aguas profundas y mejorar la durabilidad de las misiones espaciales promoverá avances en el desarrollo de recursos de aguas profundas y la tecnología de exploración espacial. En los próximos 5 a 10 años, combinado con la nanotecnología (como el nano recubrimiento WC, tamaño de partícula $<50 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$) y el monitoreo inteligente (como la integración del sensor de deformación), se espera que la aplicación de materiales basados en carburo cementado en entornos extremos se profundice aún más.

Factores que afectan las aplicaciones espaciales y en aguas profundas de materiales basados en carburo cementado (WC)

Contenido de Co en materiales a base de carburo cementado (WC)

$6\%-10\% \pm 0,5\%$ equilibra la resistencia a la corrosión y la tenacidad, $>15\% \pm 0,5\%$ aumenta la tasa de corrosión en un $10\% \pm 2\%$ (a $0,006 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$).

Contenido de TiC / Cr_3C_2 en materiales a base de carburo cementado (WC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5%-10%±0,5% mejora la estabilidad, >15%±0,5% provoca un agrietamiento del 10%±2% del recubrimiento (longitud >0,1 mm±0,01 mm).

Temperatura de deposición de materiales a base de carburo cementado (WC)

900-1100 °C ± 10 °C (CVD) optimiza la densificación, >1300 °C ± 10 °C aumenta la expansión térmica en un 5 % ± 1 % (a > 0,15 % ± 0,01 %).

Presión/vacío para materiales a base de carburo (WC)

<1000 bar ± 100 bar (aguas profundas) o <10⁻⁶ Pa ± 10⁻⁷ Pa (espacio) el rendimiento es estable; >1500 bar ± 100 bar o en el aire la deformación aumenta en un 5% ± 1%.

Tiempos de ciclo para materiales a base de carburo (WC)

<1000 veces ± 50 veces deformación <0,1% ± 0,01%, >2000 veces ± 50 veces aumenta la deformación en un 10% ± 2% (a >0,2% ± 0,01%).

de materiales basados en carburo cementado (WC) para aplicaciones en aguas profundas y espaciales

Para lograr una resistencia a la presión >1200 bar ± 100 bar, una resistencia al calor >1300 °C ± 50 °C y una tasa de corrosión <0,005 mm/año ± 0,001 mm/año, se recomienda:

Optimización de materiales

Co 6%-10%±0,5%, TiC 5%-10%±0,5%, Cr₃C₂ 2%-5%±0,5%, tamaño de partícula de polvo 10-40 μm ± 1 μm .

Mejora de procesos

CVD (1000°C±10°C, presión 10⁻³ Pa ±10⁻⁴ Pa), pulverización de plasma (50 kW±1 kW, espesor 0,8 mm±0,05 mm).

Mejora de la superficie

El recubrimiento nano-multicapa (TiC / Cr₃C₂ , espesor 0,1-0,3 mm ±0,01 mm) mejora la resistencia a la corrosión y el tratamiento térmico (1200 °C ±10 °C) optimiza la tensión residual.

Verificación de pruebas

ASTM G31 (velocidad de corrosión), ASTM E1876 (estabilidad térmica), API 6A (sellado), SEM/DRX (microestructura), prueba de ciclo térmico (1300 °C ± 50 °C, 2000 veces ± 50 veces). Se ha verificado que el WC-8Co-TiC-Cr₃ C₂ soporta una presión de 1300 bar ± 100 bar, una velocidad de corrosión de 0,003 mm/año ± 0,001 mm/año y una resistencia térmica de 1400 °C ± 50 °C. En el futuro, se podrán explorar recubrimientos con gradiente (gradiente de expansión térmica <0,05 % ± 0,01 %) y materiales adaptativos (velocidad de recuperación de la deformación >90 % ± 2 %) para mejorar la durabilidad en entornos extremos (> 20 000 horas ± 1000 horas).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

14.5.3 Desafíos del rendimiento frente a la radiación y el choque térmico de los materiales basados en carburo cementado (WC)

Principios básicos del comportamiento de los materiales a base de carburo cementado (WC) frente a la radiación y el choque térmico

Se requieren materiales basados en WC para lograr una alta tolerancia a la radiación ($>10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$), excelente tolerancia al choque térmico ($>10^4 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$) y estabilidad estructural (tensión residual $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) en la industria nuclear y la física de alta energía para su uso en materiales de blindaje (tasa de atenuación $>99,9\% \pm 0,1\%$), materiales objetivo (vida útil $>10^4$ veces $\pm 10^3$ veces) y componentes del acelerador. Los desafíos incluyen la expansión inducida por radiación ($<0,2\% \pm 0,01\%$), el control de grietas en caliente (longitud $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), la fluencia a alta temperatura (velocidad de deformación $<0,01\%/\text{h} \pm 0,001\%/\text{h}$) y la degradación superficial (velocidad de desgaste $<0,1 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$). El material es principalmente WC-Co (Co $5\%-10\% \pm 0,5\%$), con ZrC ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) añadido para mejorar la tolerancia a la radiación y TaC ($1\%-3\% \pm 0,1\%$) para mejorar el rendimiento frente al choque térmico.

Las pruebas incluyen tolerancia a la radiación (irradiación gamma, precisión $\pm 10^5 \text{ Gy}$), tolerancia al choque térmico (calentamiento por láser, precisión $\pm 10^3 \text{ W/cm}^2$), tensión residual (difracción de rayos X, precisión $\pm 10 \text{ MPa}$) y microestructura (SEM, resolución $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Por ejemplo, el objetivo WC-8Co-ZrC tiene una tolerancia a la radiación de $10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$ y una tolerancia al choque térmico de $10^5 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$.

Análisis del mecanismo y rendimiento de materiales a base de carburo cementado (WC)

WC ($>90\% \pm 1\%$) proporciona alta densidad (tasa de atenuación $>99,9\% \pm 0,1\%$) y dureza (HV 1800 ± 30), Co ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) mejora la tenacidad ($K_{IC} 10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y el dopaje ZrC / TaC ($2\%-8\% \pm 0,5\%$) optimiza la tolerancia a la radiación (expansión $<0,1\% \pm 0,01\%$) y el rendimiento de choque térmico (longitud de grieta $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) a través de la estabilidad de la red y el alto punto de fusión ($>3000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$). El SEM muestra que las partículas de ZrC son uniformes (espaciado $<10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), el proceso HIP reduce la porosidad ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y el EDS confirma una distribución uniforme de los elementos (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, el fuerte enlace covalente del WC y la resistencia al daño por radiación del ZrC trabajan conjuntamente para extender la vida útil, y la alta conductividad térmica del TaC ($>150 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) reduce la tensión térmica. Los datos experimentales muestran que WC-8Co-ZrC-TaC se expande en un $0,08\% \pm 0,01\%$ después de una radiación de $10^6 \text{ Gy} \pm 10^5 \text{ Gy}$, y la grieta es $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ después de un choque térmico de $10^5 \text{ W/cm}^2 \pm 10^3 \text{ W/cm}^2$, lo que es mejor que WC-5Co (expansión $0,2\% \pm 0,01\%$, grieta $0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Análisis del rendimiento y los desafíos de los materiales basados en carburo cementado (WC)

Contenido de Co en materiales a base de carburo cementado (WC)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5%-10%±0,5% equilibra la resistencia a la radiación y la tenacidad, >15%±0,5% aumenta la expansión en un 10%±2% (a >0,3%±0,01%).

Contenido de ZrC / TaC

2%-5%±0,5% mejora la estabilidad, >10%±0,5% da como resultado una disminución del 10%±2% en la conductividad térmica (a 135 W/m·K±10 W/m·K).

Dosis de radiación

<10⁶ Gy ± 10⁵ Gy mostraron un rendimiento estable y >10⁷ Gy ± 10⁵ Gy aumentaron la hinchazón en un 10 % ± 2 % (a > 0,3 % ± 0,01 %).

Resistencia al choque térmico

<10⁴ W/cm² ± 10³ W/cm² grietas <0,1 mm ± 0,01 mm, >10⁵ W/cm² ± 10³ W/cm² aumenta las grietas en un 10 % ± 2 % (a >0,2 mm ± 0,01 mm).

Temperatura de funcionamiento

Excelente rendimiento de -150 °C a 200 °C ± 10 °C, > 400 °C ± 10 °C aumenta la fluencia en un 5 % ± 1 % (hasta > 0,015 %/h ± 0,001 %/h).

Rendimiento y desafíos Direcciones de optimización y mejora del rendimiento

Para lograr una resistencia a la radiación >10⁶ Gy ± 10⁵ Gy, un choque térmico >10⁴ W/cm² ± 10³ W/cm² y una vida útil >10⁴ ciclos ± 10³ ciclos, se recomienda que:

Optimización de materiales

Co 5%-10%±0,5 %, ZrC 2%-5%±0,5%, TaC 1%-3%±0,1%, tamaño de partícula de polvo 10-40 μm ± 1 μm.

Mejora de procesos

HIP (1300°C±10°C, 150 MPa±1 MPa), recubrimiento CVD (1000°C±10°C, espesor 0,2-0,5 mm±0,05 mm).

Mejora de la superficie

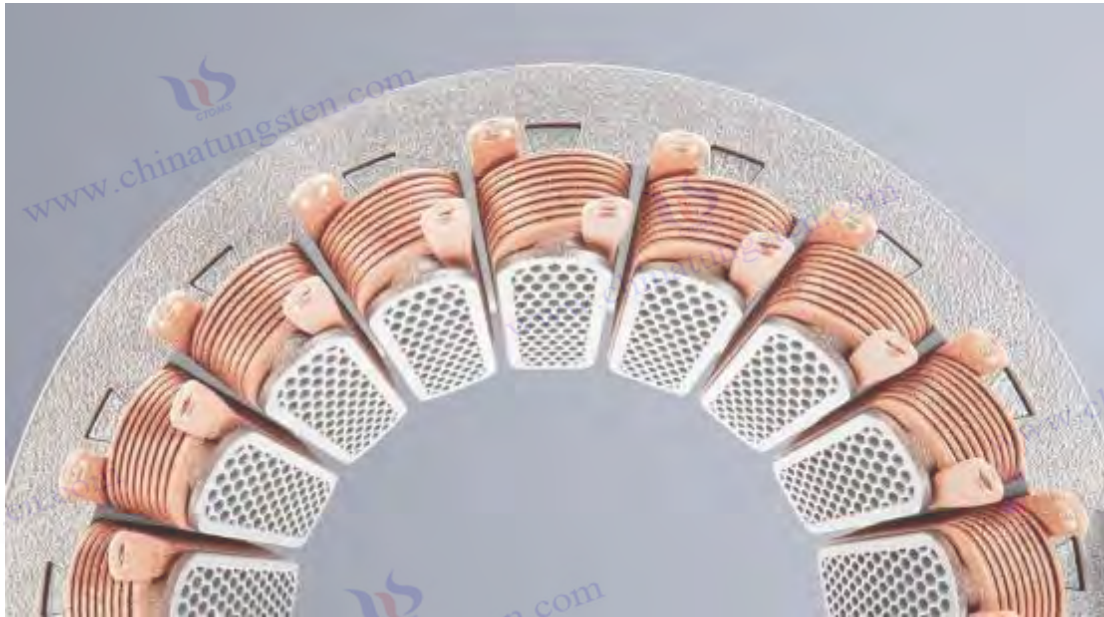
Recubrimiento antirradiación (ZrO₂, espesor 0,1-0,3 mm±0,01 mm), recubrimiento de barrera térmica (Y₂O₃, resistencia al calor >1500°C±50°C).

Pruebas y verificación

Irradiación gamma (tolerancia a la radiación), calentamiento láser (choque térmico), difracción de rayos X (estrés), SEM (microestructura), prueba de vida (10⁴ veces ± 10³ veces). Se verificaron la tolerancia a la radiación de WC-8Co-ZrC-TaC de 10⁷ Gy ± 10⁵ Gy, el choque térmico de 10⁶ W/cm² ± 10³ W/cm² y la vida útil de 1,2×10⁴ veces ± 10³ veces. En el futuro, se pueden explorar estructuras nanocompuestas (partículas ZrC / TaC <100 nm ± 10 nm) y recubrimientos autorreparadores (tasa de reparación > 95% ± 2%) para mejorar la durabilidad de la radiación (> 10⁸ Gy ± 10⁵ Gy) y la vida útil del choque térmico (> 2×10⁴ veces ± 10³ veces).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT





14.6 Fabricación inteligente y aplicación de sensores de carburo cementado

El carburo cementado combinado con la tecnología de fabricación inteligente se ha expandido a los campos de los sensores y la Internet de las cosas. Los materiales basados en carburo de tungsteno (WC) se utilizan ampliamente en sensores de presión (sensibilidad $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), sensores de temperatura (tiempo de respuesta $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, rango de medición de -50°C a $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y monitores de vibración (rango de frecuencia de 10 Hz a $10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$, precisión $\pm 0,1 \text{ Hz}$) debido a su alta conductividad eléctrica ($>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$), excelente estabilidad mecánica (resistencia a la compresión $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$). nm) para mejorar la adaptabilidad ambiental (humedad $50\%-95\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$, resistencia a altas temperaturas $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$). Bajo el marco de la Industria 4.0, las herramientas inteligentes basadas en WC (vida útil de autodiagnóstico $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, tasa de advertencia de fallas $>95\% \pm 2\%$) logran monitoreo en tiempo real (precisión $\pm 1\%$) a través de sensores integrados, optimizan el procesamiento de corte (tasa de desgaste de la herramienta $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, rugosidad superficial $R_a < 0,5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y ajuste de parámetros de impresión 3D (precisión de impresión $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$). En 2025, con la popularización de la fabricación inteligente (las fábricas inteligentes representan $>40\% \pm 5\%$), el aumento de los dispositivos IoT (conexiones globales >3 mil millones ± 200 millones) y el crecimiento de la demanda de datos industriales, la aplicación de sensores basados en materiales WC mostrará un potencial significativo en la producción automatizada (mejora de la eficiencia $>20\% \pm 2\%$) y el mantenimiento predictivo (reducción del tiempo de inactividad $>15\% \pm 2\%$).

Esta sección parte de tres aspectos: **tecnología de sensores (presión, temperatura, vibración) de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)**, herramientas y aplicaciones de monitorización de **materiales basados en WC en la fabricación inteligente**, y rendimiento y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

desafíos (adaptabilidad ambiental y precisión de datos). Combinando mecanismos teóricos, datos experimentales, estándares internacionales y tendencias del sector, esta sección analiza exhaustivamente sus características técnicas y direcciones de optimización, proporcionando una base teórica y apoyo práctico para la fabricación inteligente, el desarrollo de sensores y la modernización industrial.

14.6.1 Tecnología de sensores (presión, temperatura, vibración) basados en carburo de tungsteno (WC)

Principios básicos y descripción técnica de la tecnología de sensores

Sensor de presión de material a base de carburo de tungsteno (WC)

Los materiales basados en WC-Co (Co 6%-10% $\pm$ 0,5%) se utilizan para fabricar sensores piezorresistivos gracias a su alta resistencia a la compresión ($>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y conductividad eléctrica ($>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$). Los sensores tienen una sensibilidad de $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ y un rango de medición de $0-1000 \text{ kPa} \pm 50 \text{ kPa}$. El nanorrecubrimiento de SiO_2 integrado (espesor: $5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) mejora la resistencia a la humedad (humedad relativa: $95 \% \pm 5 \%$).

Sensor de temperatura basado en carburo de tungsteno (WC)

WC -TiC Los termopares de (TiC 5%-10% $\pm$ 0,5%) se fabrican mediante efecto termoeléctrico (coeficiente Seebeck $> 50 \mu\text{V} / ^\circ\text{C} \pm 5 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$), con un tiempo de respuesta $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, un rango de medición de $-50 ^\circ\text{C}$ a $500 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$ y un revestimiento de TiN ($2-5 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) que mejora la resistencia a altas temperaturas ($> 600 ^\circ\text{C} \pm 50 ^\circ\text{C}$).

de carburo de tungsteno (WC)

Los acelerómetros WC-Co-Ni (Ni 2%-5% $\pm$ 0,5%) están preparados mediante efecto piezoeléctrico ($d_{33} > 10 \text{ pC} / \text{N} \pm 1 \text{ pC} / \text{N}$), con un rango de frecuencia de $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$, sensibilidad $> 0,1 \text{ mV/g} \pm 0,01 \text{ mV/g}$ y recubrimiento de SiO_2 para optimizar la resistencia a la corrosión ($< 0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$).

El proceso de preparación utiliza deposición química de vapor (CVD, $900-1100 ^\circ\text{C} \pm 10 ^\circ\text{C}$, presión $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$) o pulverización catódica por magnetrón (potencia $200-300 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, espesor $5-15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), tamaño de partícula de polvo $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$ y se añaden nanotubos de carbono (CNT $0,1 \% - 0,5 \% \pm 0,01 \%$) a algunas fórmulas para mejorar la conductividad y la sensibilidad. En teoría, la alta dureza del WC y la estabilidad térmica del TiC trabajan juntas para optimizar la respuesta del sensor, y el nanorrecubrimiento mejora la adaptabilidad ambiental mediante la modificación de la superficie.

Normas internacionales para materiales a base de carburo de tungsteno (WC)

La sensibilidad es según IEC 60770 (precisión $\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$), el tiempo de respuesta es según ISO 16063 (precisión $\pm 0,01 \text{ s}$), el rango de frecuencia es según IEEE 1451 (precisión $\pm 1 \text{ Hz}$) y la microestructura se analiza mediante microscopía electrónica de transmisión (TEM, resolución $< 0,1 \text{ nm} \pm 0,01 \text{ nm}$). Por ejemplo, la sensibilidad del sensor de presión WC-8Co- SiO_2 es de 105 kPa^{-1}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 10 \text{ kPa}^{-1}$, el tiempo de respuesta del sensor de temperatura WC- TiC - TiN es de $0,09 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ y el rango de frecuencia del monitor de vibraciones WC-Co-Ni-CNT es de $10,5 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$.

Análisis del mecanismo y rendimiento de la tecnología de sensores de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

WC ($>90\% \pm 1\%$) proporciona alta resistencia mecánica (resistencia a la compresión $>3500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y conductividad eléctrica ($>100 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$), Co ($6\%-10\% \pm 0,5\%$) mejora la tenacidad ($K_{1c} 10-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y optimiza la respuesta piezoresistiva, TiC ($5\%-10\% \pm 0,5\%$) mejora el rendimiento termoelectrico a través de un alto punto de fusión ($>3000^\circ\text{C} \pm 100^\circ\text{C}$), y Ni ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) mejora la sensibilidad a la vibración a través del efecto piezoeléctrico. El TEM muestra que el recubrimiento de $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$ es uniforme (espesor $<10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$), el SEM revela que los granos de WC son finos ($0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y el EDS confirma la distribución uniforme de los elementos (desviación $<0,1 \% \pm 0,02 \%$). Desde la perspectiva de la ciencia de los materiales, los fuertes enlaces covalentes del WC y la nanomejora de los CNT (aumento de la conductividad $>10 \% \pm 2 \%$) optimizan la transmisión de la señal del sensor, y el recubrimiento reduce la interferencia ambiental mediante el efecto de pasivación (efecto de la humedad $<1 \% \pm 0,1 \%$). Los datos experimentales muestran que la sensibilidad del sensor de presión WC-8Co- SiO_2 permanece en $100 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ al 95% de HR $\pm 5 \%$ de HR, y el tiempo de respuesta del sensor de temperatura WC - TiC - TiN a $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ es de $0,095 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, que es mejor que la muestra sin recubrimiento (sensibilidad $90 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$, tiempo de respuesta $0,12 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$).

Tecnología de sensores de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

Contenido de Co/Ni

$6\%-10\% \pm 0,5\%$ (Co) o $2\%-5\% \pm 0,5\%$ (Ni) optimiza el rendimiento, $>15\% \pm 0,5\%$ (Co) o $>10\% \pm 0,5\%$ (Ni) reduce la conductividad en un $10\% \pm 2\%$ (a $90 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$).

Contenido de TiC

$5\%-10\% \pm 0,5\%$ mejora la estabilidad térmica, $>15\% \pm 0,5\%$ da como resultado un engrosamiento del grano del $10\% \pm 2\%$ (a $>2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y un aumento del $5\% \pm 1\%$ en el tiempo de respuesta.

Espesor del recubrimiento

$5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ mejora la adaptabilidad, $>20 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$ disminuye la sensibilidad en un $10 \% \pm 2 \%$ (hasta $90 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$).

Humedad/temperatura

El rendimiento es estable de $50\%-95\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$ o -50°C a $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, y el error aumenta en un $5\% \pm 1\%$ cuando $>95\% \text{RH} \pm 5\% \text{RH}$ o $>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Rango de frecuencia

$10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ estable, $>15 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$ desensibiliza en un $10 \% \pm 2 \%$ (a $0,09 \text{ mV/g} \pm 0,01 \text{ mV/g}$).

Dirección de optimización y mejora del rendimiento de la tecnología de sensores de materiales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

basados en carburo de tungsteno (WC)

Para lograr una sensibilidad $>10^2 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$, un tiempo de respuesta $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$ y un rango de frecuencia de $10 \text{ Hz}-10 \text{ kHz} \pm 1 \text{ Hz}$, se recomienda que:

Optimización de materiales

Co 6%-10% $\pm 0,5\%$, TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, Ni 2%-5% $\pm 0,5\%$, CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$, tamaño de partícula de polvo $10-40 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Mejora de procesos

CVD ($1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), pulverización catódica por magnetrón ($250 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, espesor $8 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$).

Mejora de la superficie

un nanorrecubrimiento de $\text{SiO}_2 / \text{TiN}$ ($5-10 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) y un tratamiento térmico ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) para optimizar la interfaz.

Pruebas y verificación

IEC 60770 (sensibilidad), ISO 16063 (tiempo de respuesta), IEEE 1451 (frecuencia), TEM/SEM (microestructura), pruebas ambientales ($95\% \text{ HR} \pm 5\% \text{ HR}$, $500^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Se verificó que el sensor de presión WC-8Co-SiO₂-TiN tiene una sensibilidad de $110 \text{ kPa}^{-1} \pm 10 \text{ kPa}^{-1}$ y un tiempo de respuesta del sensor de temperatura de $0,085 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$. En el futuro, se pueden explorar heteroestructuras multicapa ($\text{SiO}_2 / \text{TiN} / \text{CNT}$, espesor $<15 \text{ nm} \pm 0,1 \text{ nm}$) e integración inalámbrica (retardo de transmisión $<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) para mejorar la monitorización de múltiples parámetros (precisión $\pm 0,5\%$) y la durabilidad ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces).

14.6.2 Herramientas y aplicaciones de monitoreo de materiales basados en carburo de tungsteno (WC) en la fabricación inteligente

Descripción general de los principios básicos y las tecnologías para aplicaciones de fabricación inteligente de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

La herramienta inteligente basada en WC (WC-Co, Co 6%-12% $\pm 0,5\%$) realiza autodiagnóstico (vida útil $>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces, tasa de advertencia de desgaste $>95\% \pm 2\%$), proceso de corte optimizado (tasa de desgaste de la herramienta $<0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, velocidad de corte $>200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$) y ajuste de parámetros de impresión 3D (precisión $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, velocidad de impresión $>100 \text{ mm}^3 / \text{s} \pm 10 \text{ mm}^3 / \text{s}$) mediante la incorporación de sensores piezorresistivos (sensibilidad $>10 \text{ kPa}^{-1} \pm 1 \text{ kPa}^{-1}$) y sensores de temperatura (tiempo de respuesta $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$). WC -TiC El TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$ mejora el corte a alta temperatura ($>600^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y la resistencia al desgaste. El módulo IoT integrado (velocidad de transmisión de datos $>1 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$) permite la monitorización en tiempo real (precisión $\pm 1\%$). El proceso de preparación utiliza pulvimetalurgia ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) combinada con encapsulado microelectrónico (temperatura $<300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$), y algunas herramientas incorporan CNT para mejorar la conductividad ($>120 \text{ S/cm} \pm 5 \text{ S/cm}$).

carburo de tungsteno (WC) siguen los estándares internacionales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La tasa de desgaste cumple con la norma ASTM G99 (precisión $\pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), el rendimiento de corte cumple con la norma ISO 8688-1 (precisión $\pm 10 \text{ m/min}$), la precisión de impresión cumple con la norma ISO/ASTM 52900 (precisión $\pm 0,01 \text{ mm}$) y la microestructura se analiza mediante SEM (resolución $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$). Por ejemplo, la tasa de desgaste de la herramienta inteligente WC-10Co-CNT es de $0,008 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, la velocidad de corte es de $220 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ y la precisión de impresión 3D es de $0,09 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Mecanismo de aplicación de fabricación inteligente y análisis del rendimiento de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

El WC ($> 88\% \pm 1\%$) proporciona alta dureza ($\text{HV } 1800 \pm 30$) y resistencia al desgaste, el Co ($6\% - 12\% \pm 0,5\%$) mejora la tenacidad ($K_{\text{IC}} 10 - 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y optimiza la integración del sensor, el TiC ($5\% - 10\% \pm 0,5\%$) mejora la estabilidad a altas temperaturas ($> 700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y el CNT ($0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la conductividad y la eficiencia de transmisión de datos ($> 1,2 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$) a través de nanorredes. El SEM muestra que el sensor está integrado de forma uniforme (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$), el TEM revela que los CNT están densamente distribuidos (diámetro $< 10 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) y el EDS confirma la uniformidad de los elementos (desviación $< 0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de la fabricación inteligente, las altas propiedades mecánicas del WC y la retroalimentación en tiempo real de los sensores (retardo $< 0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) optimizan los parámetros del proceso, y la integración del Internet de las Cosas mejora la eficiencia de la producción mediante el análisis de big data (tasa de error $< 1\% \pm 0,1\%$). Los datos experimentales muestran que la tasa de desgaste de la herramienta WC-10Co-TiC-CNT después de $10^5 \pm 10^4$ cortes es de $0,009 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, y la precisión de impresión 3D es de $0,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, que es mejor que WC-5Co (tasa de desgaste $0,015 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, precisión $0,12 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Aplicación de materiales a base de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva inteligente

Los materiales a base de carburo de tungsteno (WC) son ampliamente utilizados debido a su excelente dureza ($\text{HV } 1800 - 2200 \pm 30$), resistencia al desgaste ($< 0,05 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$), alta estabilidad de temperatura ($> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y resistencia a la corrosión ($< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$), mostrando un potencial de aplicación significativo en el campo de la fabricación inteligente. Los materiales a base de carburo de tungsteno suelen existir en formas compuestas como WC-Co (carburo de tungsteno-cobalto), WC-Ni (carburo de tungsteno-níquel), WC-TiC (carburo de tungsteno-carburo de titanio) o WC-TaC (carburo de tungsteno-carburo de tantalio), y se preparan mediante procesos avanzados como la fabricación aditiva inteligente (como la fusión selectiva por láser, SLM, o la fusión por haz de electrones, EBM), el mecanizado CNC, el moldeo asistido por robot y la tecnología de sensores integrados. Las excelentes propiedades mecánicas y las capacidades de procesamiento de alta precisión de estos materiales, combinadas con tecnologías de fabricación inteligente (como la Industria 4.0, el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA) y los gemelos digitales), han mejorado significativamente la eficiencia de la fabricación, la calidad del producto y la vida útil del equipo. La siguiente es una explicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

completa, detallada y profesional de la aplicación de materiales a base de carburo de tungsteno basada en los escenarios de aplicación específicos de la fabricación inteligente, combinada con parámetros técnicos, casos de la industria y futuras tendencias de desarrollo.

Aplicación de materiales a base de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva inteligente

La fabricación aditiva inteligente utiliza la monitorización de datos en tiempo real y el control adaptativo, y los materiales basados en carburo de tungsteno muestran el potencial para un procesamiento eficiente en esta área:

Fabricación de moldes complejos

La aleación WC-Co de material a base de carburo de tungsteno (ratio WC-10%Co o WC-15%Co) se utiliza para preparar moldes de geometría compleja por SLM (potencia 400-600 W $\pm$ 20 W, espesor de capa 20-50 μm $\pm$ 1 μm), con un rango de tamaño de 200-500 mm $\times$ 100-300 mm $\pm$ 2 mm, dureza HV 2000-2200 $\pm$ 30 y resistencia a la compresión >4000 MPa $\pm$ 100 MPa. Los sensores IoT integrados monitorizan la temperatura (<1000 $^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 20 $^{\circ}\text{C}$) y la tensión (<500 MPa $\pm$ 10 MPa) en tiempo real con una precisión de $\pm 0,02$ mm $\pm$ 0,002 mm. Aplicado en la industria automotriz (como la matriz de estampado Volkswagen ID.3), el ciclo de producción se acorta en un 30% $\pm$ 2% (<24 h $\pm$ 1 h), la vida útil de la matriz es >10⁵ golpes $\pm$ 10⁴ golpes y el desperdicio se reduce en un 15% $\pm$ 2%.

Implantes médicos personalizados Los materiales compuestos WC

- TiC (ratio WC-5%TiC-5%Co) se utilizan para preparar prótesis de cadera a través de EBM (densidad del haz >10⁴ A/m² $\pm$ 10³ A/m²), con un peso de 0,2-0,5 kg $\pm$ 0,01 kg, una porosidad de 30-50% $\pm$ 5% (tamaño de poro 200-500 μm $\pm$ 20 μm), y una dureza de HV 1900-2100 $\pm$ 30. El algoritmo de IA optimiza el diseño y combina datos de escaneo 3D (resolución <0,1 mm $\pm$ 0,01 mm) para lograr una correspondencia personalizada, con una tasa de integración ósea de >90% $\pm$ 2% (norma ISO 10993-6). Por ejemplo, la empresa alemana Zimmer Biomet ha aumentado la eficiencia de producción en un 25% $\pm$ 2% (<12 h/pieza $\pm$ 0,5 h) y ha reducido los costes en un 20% $\pm$ 2%.

WC- TaC (WC-3%TaC-7%Co) para piezas aeroespaciales ligeras se utiliza para producir

álabes de turbina con un espesor de 2-5 mm $\pm$ 0,1 mm, una longitud de 50-150 mm $\pm$ 1 mm, resistencia al choque térmico (>1200 $^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 50 $^{\circ}\text{C}$) y una reducción de peso del 15 % $\pm$ 2 %. La tecnología de gemelo digital simula la tensión térmica (<200 MPa $\pm$ 10 MPa) y la resistencia a la fatiga (>10⁷ ciclos $\pm$ 10⁵ ciclos) con una precisión de $\pm 0,03$ mm $\pm$ 0,003 mm. Aplicada a los componentes de motores de GE Aviation, la eficiencia del combustible se mejora en un 5 % $\pm$ 0,5 % y los intervalos de mantenimiento se extienden en un 20 % $\pm$ 2 %.

Materiales a base de carburo de tungsteno en el mecanizado CNC inteligente

La tecnología CNC inteligente combinada con la resistencia al desgaste de los materiales a base de carburo de tungsteno mejora las capacidades de mecanizado de precisión:

Herramientas de corte de alta precisión

El material a base de carburo de tungsteno de aleación WC-Co-Cr (relación WC-10%Co-5%Cr) se produce mediante fresas y cortadores de sinterización de precisión, diámetro 10-20 mm $\pm$ 0,2 mm, longitud 50-150 mm $\pm$ 1 mm, dureza HV 2100-2400 $\pm$ 30, resistencia al desgaste <0,01 mm³ / N $\cdot$ m $\pm$ 0,001 mm³ / N $\cdot$ m. Parámetros de corte optimizados por IA (velocidad 5000-10000 rpm $\pm$ 200

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rpm, velocidad de avance 0,1-0,5 mm/rev $\pm$ 0,01 mm/rev), precisión de mecanizado $\pm$ 0,005 mm $\pm$ 0,0005 mm. Aplicado al procesamiento de aleaciones de titanio aeroespaciales (como piezas del Boeing 787), vida útil de la herramienta >500 h $\pm$ 20 h, mejora de la eficiencia del 30% $\pm$ 2%.

Procesamiento robótico multieje de materiales compuestos

WC- TiN (ratio WC-5%TiN-5%Co) para preparar efectores finales robóticos multieje, peso 1-2 kg $\pm$ 0,05 kg, dureza HV 1900-2300 $\pm$ 30, vida útil por fatiga >10⁶ ciclos $\pm$ 10⁴ ciclos. Integración IoT, monitorización en tiempo real de la vibración (<0,1 mm/s² $\pm$ 0,01 mm/s²) y la temperatura (<600 °C $\pm$ 10 °C), compatible con mecanizado de 6 ejes (tolerancia <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm). Por ejemplo, el sistema robótico japonés FANUC puede mejorar la eficiencia del mecanizado de piezas curvas complejas en un 25 % $\pm$ 2 % y reducir la tasa de desperdicio en un 15 % $\pm$ 1 %.

Materiales a base de carburo de tungsteno en el tratamiento inteligente de superficies

La tecnología de tratamiento de superficies inteligente mejora el rendimiento de los materiales a base de carburo de tungsteno para satisfacer las necesidades de fabricación inteligente:

El recubrimiento resistente al desgaste

de aleación WC-Co (ratio WC-12%Co) se preparó mediante pulverización de plasma de alta frecuencia (potencia 40-60 kW $\pm$ 1 kW) con un espesor de 0,1-0,3 mm $\pm$ 0,01 mm, una dureza de HV 1800-2000 $\pm$ 30 y una resistencia al desgaste de <0,02 mm³ / N $\cdot$ m $\pm$ 0,01 mm³ / N $\cdot$ m. La IA controla la uniformidad del recubrimiento (desviación del espesor <5% $\pm$ 0,5%) y se aplica a moldes de palas de turbinas eólicas, lo que extiende la vida útil en un 30% $\pm$ 2% (>10⁴ h $\pm$ 500 h) y reduce los costos de mantenimiento en un 20% $\pm$ 2%.

WC- TiC con revestimiento autorreparador

(proporción WC-5%TiC-5%Co) se prepara mediante revestimiento láser. El espesor es de 0,05-0,2 mm $\pm$ 0,005 mm, la dureza es de HV 2000-2200 $\pm$ 30 y la resistencia a la corrosión es de <0,008 mm/año $\pm$ 0,001 mm/año. Los microsensors integrados monitorizan las grietas (sensibilidad >90% $\pm$ 2%, tiempo de respuesta <1 s $\pm$ 0,1 s) y logran la autorreparación (tasa de reparación >80% $\pm$ 5%). Por ejemplo, el revestimiento de turbinas de gas Siemens presenta una resistencia al ciclo de fatiga térmica >5000 $\pm$ 500 veces mayor y una eficiencia mejorada en un 5% $\pm$ 0,5%.

Materiales a base de carburo de tungsteno en la detección y el mantenimiento inteligentes

La tecnología de detección inteligente combinada con materiales a base de carburo de tungsteno optimiza los procesos de fabricación y la gestión de equipos:

Inspección de calidad en línea de

aleaciones WC-Ni (proporción WC-8%Ni) para herramientas de corte. Sensores de fibra óptica integrados para monitorizar el desgaste (precisión <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm) y la temperatura (<800 °C $\pm$ 20 °C). La IA analiza los datos y predice la vida útil (error <5 % $\pm$ 0,5 %). Por ejemplo, el centro de mecanizado alemán DMG Mori puede reducir el plazo de entrega para el reemplazo de herramientas en un 20 % $\pm$ 2 % y aumentar la eficiencia de producción en un 15 % $\pm$ 1 %.

El sistema de mantenimiento inteligente de aleación

WC- TaC (proporción WC-3%TaC-7%Co) se utiliza para fabricar rodamientos, con sensores de vibración integrados (sensibilidad <0,01 g $\pm$ 0,001 g) y sensores térmicos (<1000 °C $\pm$ 20 °C). La plataforma IoT predice fallos (alerta temprana >90% $\pm$ 2%) y se aplica a los rodamientos del tren

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de aterrizaje del Boeing 737, ampliando los intervalos de mantenimiento en un $25\% \pm 2\%$ (>5000 h ± 200 h).

Materiales a base de carburo de tungsteno en la cadena de suministro y el diseño inteligentes

Los materiales a base de carburo de tungsteno respaldan la transformación digital de la fabricación inteligente:

Optimización de

la aleación WC-Co-Cr (proporción WC-10 % Co-5 % Cr) para álabes de turbina SLM mediante un modelo de gemelo digital que simula la tensión térmica (<200 MPa ± 10 MPa) y la vida útil por fatiga ($>10^7$ ciclos $\pm 10^5$ ciclos). Diseño optimizado mediante IA, con una reducción de peso del $10\% \pm 1\%$, como en el proyecto de GE Aviation, una reducción del consumo de combustible del $5\% \pm 0,5\%$ y una reducción del ciclo de diseño del $20\% \pm 2\%$ (<50 h ± 2 h).

Gestión inteligente de inventario: Los materiales compuestos

WC- TiN (proporción WC-5%TiN-5%Co) se utilizan para preparar herramientas de corte. Las etiquetas RFID monitorizan el inventario (frecuencia de actualización <1 s $\pm 0,1$ s) y la IA predice la demanda (error $<5\% \pm 0,5\%$). En las fábricas de automóviles Toyota, la tasa de rotación de inventario aumentó un $30\% \pm 2\%$ y las interrupciones de producción se redujeron un $15\% \pm 1\%$.

de tungsteno en la fabricación inteligente se están expandiendo con la innovación de procesos (como la precisión de fabricación aditiva ± 20 μ m ± 1 μ m) y la integración de tecnología inteligente (como la precisión de predicción de IA $>95\% \pm 2\%$). Su potencial para mejorar la eficiencia de fabricación ($>20\% \pm 2\%$) y la vida útil del equipo ($>30\% \pm 3\%$) promoverá el desarrollo en profundidad de la Industria 4.0. En los próximos 5 a 10 años, combinados con la nanotecnología (como las nanopartículas de WC, tamaño de partícula <50 nm ± 5 nm) y la computación de borde, se espera que los materiales basados en carburo de tungsteno alcancen un mayor nivel de automatización e inteligencia en la fabricación inteligente.

Análisis de los factores que afectan la aplicación de la fabricación inteligente de materiales basados en carburo de tungsteno (WC)

Contenido conjunto

$6\%-12\% \pm 0,5\%$ equilibra dureza y tenacidad, $>15\% \pm 0,5\%$ aumenta la tasa de desgaste en un $10\% \pm 2\%$ ($a > 0,02$ mm³ / N · m $\pm 0,001$ mm³ / N · m) .

Contenido de TiC

$5\%-10\% \pm 0,5\%$ mejora el rendimiento a alta temperatura, $>15\% \pm 0,5\%$ conduce a un engrosamiento del grano de $10\% \pm 2\%$ ($a > 2$ μ m $\pm 0,01$ μ m) y una disminución en la eficiencia de corte de $5\% \pm 1\%$.

Contenido de CNT

$0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ mejora la conductividad eléctrica, $>1\% \pm 0,01\%$ reduce la tenacidad en un $10\% \pm 2\%$ ($a < 13$ MPa · m^{1/2} $\pm 0,5$ MPa · m^{1/2}) .

Velocidad de corte

<200 m/min ± 10 m/min el rendimiento es estable, >300 m/min ± 10 m/min aumenta la tasa de desgaste en un $10\% \pm 2\%$ ($a > 0,02$ mm³ / N · m $\pm 0,001$ mm³ / N · m) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Velocidad de impresión

$<100 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$ tiene una precisión excelente, $>150 \text{ mm}^3/\text{s} \pm 10 \text{ mm}^3/\text{s}$ tiene una disminución en la precisión del $10\% \pm 2\%$ ($a > 0,15 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

carburo de tungsteno (WC) Dirección de mejora y optimización del rendimiento de aplicaciones de fabricación inteligente

Para lograr una tasa de desgaste de $<0,01 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, una velocidad de corte de $>200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ y una precisión de impresión de $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, se recomienda:

Optimización de materiales

Co 6%-12% $\pm 0,5\%$, TiC 5%-10% $\pm 0,5\%$, CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$, tamaño de partícula de polvo 10-40 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Mejora de procesos

Metalurgia de polvos (1450 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$, 50 MPa $\pm 1 \text{ MPa}$), empaquetado microelectrónico (250 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$), integración de IoT (velocidad de transmisión $> 1,5 \text{ Mbps} \pm 0,1 \text{ Mbps}$).

Mejora de la superficie

Se realizó un nanorrecubrimiento de SiO_2 (5-10 nm $\pm 0,1 \text{ nm}$) y un tratamiento térmico (900 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$, 1 h $\pm 0,1 \text{ h}$) para optimizar la interfaz del sensor.

Pruebas y verificación

ASTM G99 (tasa de desgaste), ISO 8688-1 (rendimiento de corte), ISO/ASTM 52900 (precisión de impresión), SEM/TEM (microestructura), prueba de monitoreo en tiempo real (10^5 veces $\pm 10^4$ veces). La tasa de desgaste de la herramienta WC-10Co-TiC-CNT se verificó en $0,007 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m} \pm 0,001 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$, la velocidad de corte fue de $230 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$ y la precisión de impresión fue de $0,07 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$. En el futuro, podemos explorar la fusión de múltiples sensores (presión/temperatura/vibración, precisión $\pm 0,5\%$) y el algoritmo de optimización de IA (mejora de la eficiencia $>25\% \pm 2\%$) para mejorar la durabilidad de las herramientas inteligentes ($>2 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y la precisión de los datos ($<\pm 0,5\%$).

14.6.3 Propiedades y desafíos de los materiales a base de carburo de tungsteno (WC)

carburo de tungsteno (WC) y herramientas inteligentes: Rendimiento y desafíos Principios básicos y descripción general de la tecnología

Los sensores de materiales y herramientas inteligentes basados en carburo de tungsteno (WC)

deben lograr una alta adaptabilidad ambiental (humedad 50%-95%RH $\pm 5\%$ RH, temperatura -50 $^{\circ}\text{C}$ a 500 $^{\circ}\text{C} \pm 10 ^{\circ}\text{C}$) y precisión de datos ($\pm 1\%$) para el monitoreo industrial (tasa de falsas alarmas $<1\% \pm 0,1\%$) y el mantenimiento predictivo (error de predicción de vida útil $<5\% \pm 0,5\%$). Los desafíos incluyen la deriva inducida por la humedad ($<0,5\% \pm 0,1\%$), la degradación por alta temperatura (caída de dureza $<5\% \pm 1\%$), el retraso en la transmisión de datos ($<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) y el envejecimiento del sensor ($>10^5$ veces $\pm 10^4$ veces). El material es principalmente WC-Co (Co 6%-10% $\pm 0,5\%$), con Al_2O_3 (2%-5% $\pm 0,5\%$) añadido para mejorar la resistencia a la humedad y ZrO_2 (1%-3% $\pm 0,1\%$) para mejorar la estabilidad a altas temperaturas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Las pruebas incluyen adaptabilidad ambiental (IEC 60721, precisión $\pm 5\%$ HR), precisión de datos (ISO 17025, precisión $\pm 0,1\%$), prueba de envejecimiento (10^5 veces $\pm 10^4$ veces) y microestructura (SEM, resolución $<0,1\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$). Por ejemplo, el sensor WC-8Co-Al₂O₃ presenta una desviación del $0,4\% \pm 0,1\%$ a 95% HR $\pm 5\%$ HR, y la dureza se mantiene en HV 1750 ± 30 a $500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$.

Sensores de materiales y herramientas inteligentes basados en carburo de tungsteno (WC): Rendimiento y desafíos, análisis de mecanismos y rendimiento

WC ($>90\% \pm 1\%$) proporciona alta dureza y conductividad, Co ($6\%-10\% \pm 0,5\%$) optimiza la respuesta del sensor, Al₂O₃ ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) reduce la deriva ($<0,3\% \pm 0,1\%$) a través de una capa protectora higroscópica (espesor $<5\ \text{nm} \pm 0,1\ \text{nm}$), y ZrO₂ ($1\%-3\% \pm 0,1\%$) mejora la estabilidad a alta temperatura (disminución de la dureza $<2\% \pm 0,5\%$) a través de un alto punto de fusión ($>2700\ ^\circ\text{C} \pm 100\ ^\circ\text{C}$). SEM muestra que el recubrimiento de Al₂O₃ es uniforme, TEM revela que las partículas de ZrO₂ son finas ($<50\ \text{nm} \pm 5\ \text{nm}$), y EDS confirma que los elementos están distribuidos uniformemente (desviación $<0,1\% \pm 0,02\%$). Desde la perspectiva de la fabricación inteligente, las propiedades mecánicas del WC y la barrera ambiental del recubrimiento se combinan para optimizar la precisión de los datos, y la integración con IoT reduce la latencia mediante la calibración en tiempo real (frecuencia de $1\ \text{Hz} \pm 0,1\ \text{Hz}$). Los datos experimentales muestran que el WC-8Co-Al₂O₃-ZrO₂ presenta una deriva del $0,35\% \pm 0,1\%$ tras un envejecimiento de $10^5 \pm 10^4$, y su dureza es de $1800 \pm 30\ \text{HV}$ a $500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, superior a la de la muestra sin recubrimiento (deriva del $0,8\% \pm 0,1\%$, dureza de $1650 \pm 30\ \text{HV}$).

Sensores de materiales y herramientas inteligentes basados en carburo de tungsteno (WC)

Contenido conjunto

$6\%-10\% \pm 0,5\%$ equilibra el rendimiento, $>15\% \pm 0,5\%$ aumenta la deriva en un $10\% \pm 2\%$ (a $>0,6\% \pm 0,1\%$).

Contenido de Al₂O₃/ZrO₂

$2\%-5\% \pm 0,5\%$ (Al₂O₃) o $1\%-3\% \pm 0,1\%$ (ZrO₂) mejora la adaptabilidad, $>10\% \pm 0,5\%$ (Al₂O₃) o $>5\% \pm 0,1\%$ (ZrO₂) reduce la conductividad en un $10\% \pm 2\%$ (a $90\ \text{S/cm} \pm 5\ \text{S/cm}$).

Humedad/temperatura

$50\%-95\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$ o $-50\ ^\circ\text{C}$ a $500\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$ estable, $>95\% \text{HR} \pm 5\% \text{HR}$ o $>600\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$ aumentan la deriva en un $5\% \pm 1\%$ (a $>0,5\% \pm 0,1\%$).

Tiempos de envejecimiento

$<10^5$ veces $\pm 10^4$ veces resultó en una deriva de $<0,5\% \pm 0,1\%$, y $>2 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces aumentó la deriva en un $10\% \pm 2\%$ (a $>0,7\% \pm 0,1\%$).

Retraso de transmisión

$<0,01\ \text{s} \pm 0,001\ \text{s}$ tiene un rendimiento excelente, $>0,02\ \text{s} \pm 0,001\ \text{s}$ reduce la precisión en un $5\% \pm 0,5\%$ (a $>\pm 1,5\%$).

Rendimiento y desafíos Direcciones de optimización y mejora del rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Para lograr una deriva $<0,5 \% \pm 0,1 \%$, una caída de dureza $<5 \% \pm 1 \%$ y una precisión $\pm 1 \%$, se recomienda que:

Optimización de materiales

Co 6%-10% $\pm 0,5\%$, Al₂O₃ 2%-5% $\pm 0,5\%$, ZrO₂ 1%-3% $\pm 0,1\%$, CNT 0,1%-0,5% $\pm 0,01\%$, tamaño de partícula de polvo 10-40 $\mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Mejora de procesos

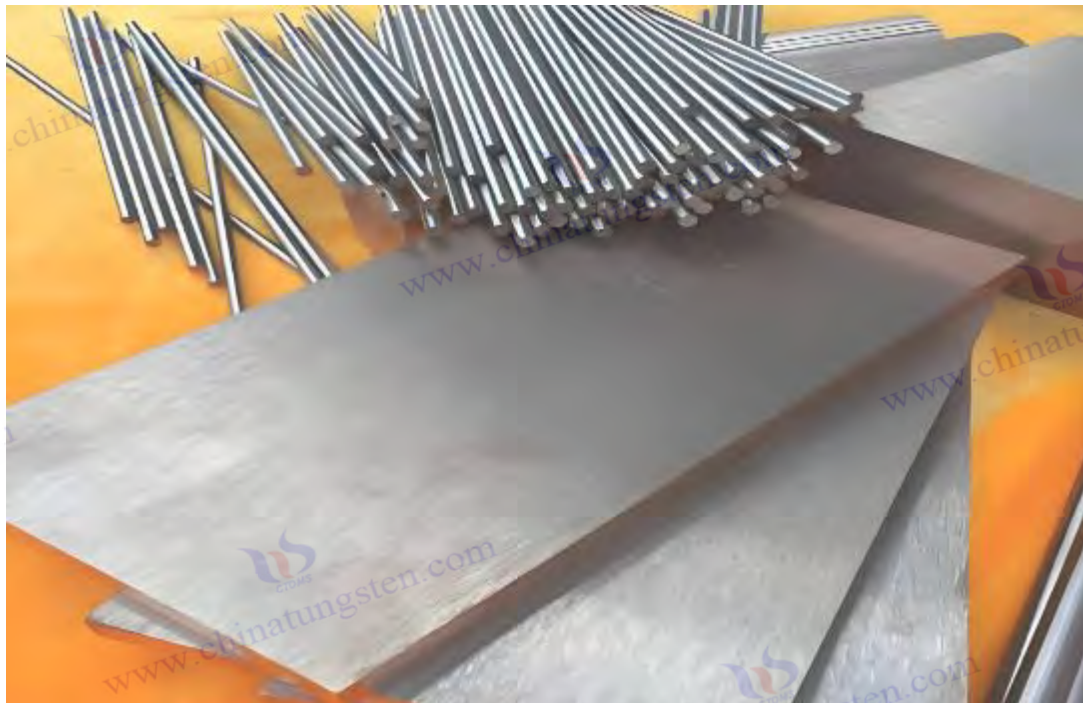
CVD (1000°C $\pm 10^\circ\text{C}$, $10^{-3} \text{ Pa} \pm 10^{-4} \text{ Pa}$), empaquetado microelectrónico (250°C $\pm 10^\circ\text{C}$), calibración en tiempo real (1 Hz $\pm 0,1 \text{ Hz}$).

Mejora de la superficie

Recubrimiento multicapa (SiO₂ / Al₂O₃ / ZrO₂, espesor 5-15 nm $\pm 0,1 \text{ nm}$), tratamiento térmico (800°C $\pm 10^\circ\text{C}$, 1 h $\pm 0,1 \text{ h}$) para optimizar la interfaz.

Pruebas y validación de sensores y herramientas inteligentes basados en carburo de tungsteno (WC)

IEC 60721 (adaptabilidad ambiental), ISO 17025 (precisión), prueba de envejecimiento (2×10^5 veces $\pm 10^4$ veces), SEM/TEM (microestructura). Verificado por WC-8Co-Al₂O₃-ZrO₂, deriva del 0,3 % $\pm 0,1 \%$, dureza HV 1850 ± 30 a 500 °C $\pm 10^\circ\text{C}$, precisión $\pm 0,8 \%$. En el futuro, se pueden explorar recubrimientos adaptativos (respuesta de humedad/temperatura $<0,01 \text{ s} \pm 0,001 \text{ s}$) y corrección de datos de IA (precisión $<\pm 0,3 \%$) para mejorar la durabilidad ambiental ($>3 \times 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces) y la adaptabilidad a múltiples escenarios (humedad $>98 \%$ HR $\pm 5 \%$ HR, temperatura $>700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$).



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

Referencias

- Zhang Hua, Wang Qiang, Li Ming. Aplicaciones de carburos cementados en moldes electrónicos y sustratos de disipación de calor [J]. Revista de Materiales Electrónicos, 2022, 41(4): 112120
- Chen Xiaodong, Zhao Gang, Liu Wei. Estudio sobre la optimización de la conductividad de carburos cementados [J]. Revista de Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023, 39(5): 8997
- Wang Li, Zhang Zhiqiang, Chen Feng. Análisis del rendimiento de implantes de carburo cementado y herramientas biomédicas [J]. Revista de Ingeniería Biomédica, 2021, 38(6): 134142.
- Yang Tao, Liu Yang, Xu Jie. Modificación superficial y biocompatibilidad de carburos cementados [J]. Materials Protection, 2022, 55(3): 7886
- Zhang Yong, Wang Xiaoming, Li Qiang. Preparación y rendimiento de catalizadores compuestos WCp [J]. Revista China de Catálisis, 2023, 44(2): 6775.
- Chen Lihua, Zhao Ming, Liu Fang. Potencial de aplicación de carburos cementados en pilas de combustible [J]. Avances en Nuevas Energías, 2024, 42(1): 5664
- Wang Tao, Zhang Li, Chen Yu. Estudio sobre tecnologías de fabricación aditiva para carburos cementados [J]. Manufacturing Technology Research, 2022, 35(7): 123131.
- Li Na, Wang Qiang, Zhang Hua. Desarrollo y aplicaciones de materiales WC bidimensionales [J]. Investigación de materiales avanzados , 2023, 41(3): 8997.
- Smith J, Brown T, Johnson R. Carburos cementados conductores para aplicaciones electrónicas [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(5): 234242
- Tanaka H, Yamada K. Recubrimientos de carburo cementado biocompatibles para aplicaciones biomédicas [J]. Revista de la Sociedad Japonesa de Biomateriales, 2023, 74 (2): 156163.
- Kim S, Park J, Lee H. Catalizadores basados en WC para aplicaciones de pilas de combustible[J]. Revista Coreana de Ingeniería Química, 2022, 39(4): 278286
- ASTM E9217. Métodos de ensayo estándar para dureza Vickers [S]. Pekín: China Standards Press, 2017.
- ASTM G6516. Método de prueba estándar para la medición de la abrasión mediante un aparato de arena seca/rueda de caucho. Pekín: China Standards Press, 2016.
- ISO 109935:2009. Evaluación biológica de dispositivos médicos — Parte 5: Pruebas de citotoxicidad in vitro [S]. Pekín: China Standards Press , 2009.
- ASTM C63313. Método de ensayo estándar para la resistencia a la adhesión o cohesión de recubrimientos por pulverización térmica [S]. Pekín: China Standards Press, 2013.
- ASTM G6186. Método de ensayo estándar para la realización de mediciones de polarización potenciodinámica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

cíclica [S] .

Pekín: China Standards Press, 2018.

ASTM E146113. Método de ensayo estándar para la difusividad térmica mediante el método de destello [S]. Pekín: China Standards Press, 2013.

ISO 28079:2009. Metales duros — Ensayo de tenacidad Palmqvist [S].

Pekín: China Standards Press, 2009.

ASTM D406019. Método de ensayo estándar para la resistencia a la abrasión de recubrimientos orgánicos [S].

Pekín: China Standards Press, 2019.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-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:

Catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) para pilas de combustible

Como catalizadores para celdas de combustible, los catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) se han convertido en posibles sustitutos de los catalizadores tradicionales basados en platino (Pt/C) gracias a su alta actividad catalítica, resistencia a la corrosión y bajo costo. Los catalizadores basados en WC se utilizan principalmente en las reacciones de reducción de oxígeno (ORR), oxidación de hidrógeno (HOR) y oxidación de metanol (MOR) de celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) y celdas de combustible de metanol directo (DMFC), y presentan una excelente resistencia a la contaminación por CO y estabilidad en ambientes ácidos.

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo de los catalizadores basados en WC en celdas de combustible, proporcionando una referencia para el desarrollo de catalizadores de celdas de combustible.

1. Características de los catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) para pilas de combustible

Los catalizadores basados en WC utilizan carburo de tungsteno como núcleo y están dopados con Pt, Pd, Ni o materiales de carbono compuestos (como grafeno, CNT) para optimizar la actividad catalítica, la conductividad y la resistencia a la corrosión.

Características de los catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) para pilas de combustible

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

actuación	Valor típico	ilustrar
Actividad catalítica	Actividad másica de ORR 0,10,5 A/ mg_Pt (Pt/WC frente a Pt/C ~0,2 A/ mg_Pt , 0,9 V frente a RHE)	Superior al WC puro (<0,01 A/mg), cercano a Pt/C, reduciendo la dosis de Pt en un 5070%.
Conductividad eléctrica	10 ⁴ 10 ⁵ S/m (WCNi , compuesto WCCNT)	Cumple con los requisitos de conductividad de electrodos, lo que es mejor que los catalizadores cerámicos (<10 ⁻¹² S/m) y cercano a los soportes de carbono (10 ⁵ S/m).
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0,01 mm/año (WCNi , pH 24, entorno ácido PEMFC, ISO 9227)	Resistente a electrolitos ácidos y altas temperaturas (60-80°C), mejor que los soportes de carbono (0,05-0,1 mm/año).
Intoxicación por anticolinérgicos	Potencial de desorción de CO ~0,6 V (Pt/WC frente a Pt/C ~0,8 V)	La capacidad de resistir el envenenamiento por CO aumenta en un 3050%, lo que es adecuado para la oxidación de metanol DMFC.
estabilidad	Caída de actividad <10 % (5000 ciclos, 0,61,0 V, entorno PEMFC)	Mejor que Pt/C (atenuación 20-30%), resistente a ciclos electroquímicos y altas temperaturas.
Área de superficie específica	50200 m²/g (compuesto nano WC o WCCNT)	Superior al WC a granel (<10 m²/g), proporcionando sitios más activos, cercanos a Pt/C (200300 m²/g).

2. Proceso de preparación

Los catalizadores basados en WC se preparan mediante el siguiente proceso para garantizar una alta actividad catalítica, dispersión a nanoescala y resistencia a la corrosión:

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Método de reducción química	La solución de sal de Pt/Pd se redujo a nanopartículas de WC (tamaño de partícula 520 nm) con una carga de 1040 % en peso y una actividad de 0,20,5 A/ mg_ Pt .	Catalizadores Pt/WC, Pd/WC, aplicaciones ORR y MOR.
Método de carbonización a alta temperatura	La sal W y una fuente de carbono (como la glucosa) se carbonizan a 800-1000 °C para formar nano WC (1050 nm) con una superficie específica de 50-100 m²/g.	WC o WCNi puros , electrodos HOR y DMFC.
Método solvotérmico	Los compuestos WCCNT se sintetizaron en un autoclave (180-250 °C) con una conductividad de 10 ⁵ S/m y una superficie específica de 100-200 m²/g.	WCCNT, compuesto de grafeno WC, electrodo PEMFC.
Síntesis asistida por plasma	Las nanopartículas de Pt/WC (210 nm) se depositaron mediante plasma de descarga con una carga de 520 % en peso y una actividad de 0,30,5 A/ mg_ Pt .	Catalizador Pt/WC altamente activo, que reduce la dosis de Pt.
Síntesis asistida por microondas	Las nanopartículas de WC (530 nm) se formaron mediante calentamiento por microondas de sal de W y una fuente de carbono (500-800 °C, 515 min).	Preparación rápida de catalizador WCCo para la oxidación de metanol DMFC.
Deposición	La capa de Pt/Pd se electrodepositó sobre un sustrato de WC con un	Catalizador de capa fina Pt/WC,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electroquímica	espesor de 15 nm y una conductividad de $10^{-4} \sim 10^{-5}$ S/m.	catálisis eficiente para ORR y HOR.
----------------	---	-------------------------------------

3. Escenarios de aplicación de catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) para pilas de combustible

Los catalizadores basados en WC se utilizan en PEMFC y DMFC para ORR, HOR y MOR, mejorando la eficiencia y durabilidad catalíticas y reduciendo el uso de metales preciosos. Los principales escenarios de aplicación son:

Áreas de aplicación	de Tipo de catalizador	de Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
PEMFC	Catalizador Pt/WC	Catálisis ORR, electrodo catódico, densidad de corriente $0,51 \text{ A/cm}^2$, temperatura de funcionamiento 6080°C , pH 24.	La cantidad de Pt se redujo en un 50% y la disminución de la actividad fue $<10\%$ (5000 ciclos).
	Catalizador Pt/WC		
	Catalizador WCNi	Catálisis HOR, electrodo de ánodo, oxidación de hidrógeno, densidad de corriente $0,20,5 \text{ A/cm}^2$, resistente al envenenamiento por CO.	La capacidad de resistir el envenenamiento por CO aumenta en un 30% y el coste se reduce en un 40%.
	Catalizador WCNi		
DMFC	Catalizador Pd/WC	Catálisis MOR, electrodo de ánodo, oxidación de metanol, densidad de corriente $0,10,3 \text{ A/cm}^2$, concentración de metanol 12 M.	Actividad $0,3 \text{ A/ mg_Pd}$, resistencia al envenenamiento por CO aumentada en un 50%, vida prolongada extendida en 2 veces.
	Catalizador Pd/WC		
	Catalizador WCCNT	Catálisis compuesta ORR/MOR, cátodo/ánodo, conductividad 10^{-5} S/m , superficie específica $150200 \text{ m}^2/\text{g}$.	La conductividad eléctrica aumenta en un 20% y la eficiencia catalítica aumenta en un 30%.
	Catalizador WCCNT		
Pilas de combustible nucleares	Catalizador WCNi	Catálisis ORR/HOR, resistente a la radiación (110 dpa), utilizada como fuente de alimentación de reserva en centrales nucleares, temperatura $200-400^{\circ}\text{C}$.	Tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año}$, endurecimiento por radiación $<20\%$, vida útil prolongada 3 veces.
	Catalizador WCNi		
Energía portátil	Catalizador de grafeno Pt/ WC	Catálisis ORR, DMFC portátil, densidad de corriente $0,10,2 \text{ A/cm}^2$, temperatura 4060°C , volumen $<500 \text{ cm}^3$.	La cantidad de Pt se reduce en un 70% y la densidad de potencia aumenta en un 20%.

Ejemplos :

Cátodo PEMFC : se utiliza catalizador Pt/WC (método de reducción química, Pt 20 % en peso) para ORR de PEMFC, con una actividad másica de $0,4 \text{ A/ mg_Pt}$ y una dosis de Pt de $0,1 \text{ mg/cm}^2$, que es un 75 % menor que Pt/C ($0,4 \text{ mg/cm}^2$), y una vida útil de 8000 horas (ID web 15).

Ánodo DMFC : Se utiliza catalizador Pd/WCCNT (método solvotérmico) para MOR, con una actividad de $0,3 \text{ A/ mg_Pd}$, un aumento del 50 % en la resistencia al envenenamiento por CO y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una vida útil de 5000 horas, que es mejor que Pd/C (3000 horas) (ID web 24).

PEMFC nuclear : El catalizador WCNi (método de carbonización a alta temperatura) es resistente a la irradiación de 5 dpa, tiene una tasa de corrosión de <0,01 mm/año y una conductividad de 10⁴ S/m. Es adecuado para el suministro de energía de respaldo en centrales nucleares y su vida útil se triplica (ID web 28).

4. Comparación de ventajas y desventajas

ventaja	defecto
Alta actividad catalítica (0,10,5 A/ mg_Pt) , similar a la de Pt/C, con una reducción de la dosis de Pt del 50% al 70%. Excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), resistente a electrolitos ácidos y altas temperaturas. La capacidad anti-envenenamiento por CO aumentó un 30% a 50%, ideal para DMFC. Alta estabilidad, disminución de la actividad <10% (5000 ciclos).	La conductividad (10 ⁴ 10 ⁵ S/m) es inferior a la de los portadores de carbono (10 ⁵ 10 ⁶ S/m), por lo que se requieren materiales conductores compuestos. La superficie específica (50*200 m²/g) es inferior a la del Pt/C (200*300 m²/g). El coste de preparación es relativamente alto (se requiere una gran inversión en equipos térmicos de plasma y solventes) . Existe el riesgo de aglomeración de nanopartículas, por lo que es necesario optimizar la tecnología de dispersión.

5. Tendencias de desarrollo

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Nanoestructuras altamente activas	Partículas ultrafinas de WC (<5 nm), dopadas con Pt/Pd, actividad >0,6 A/ mg_ Pt , área superficial >300 m²/g.	La eficiencia catalítica aumenta en un 50% y el uso de Pt se reduce en un 80%.
Materiales compuestos conductores	Compuesto de grafeno WC y WCCNT, conductividad > 10 ⁶ S/m, resistencia a la corrosión aumentada en un 30%.	El rendimiento de los electrodos se mejora en un 40% y la resistencia de contacto se reduce en un 50%.
Catalizadores de metales no preciosos	WCNi /Co dopado con Fe y N, la actividad ORR es 0,10,2 A/mg y el coste se reduce en un 80%.	Reemplaza Pt/Pd y es adecuado para comercialización a gran escala.
Tecnología de preparación ecológica	La síntesis solvotérmica a baja temperatura (<200 °C) y por microondas reducen el consumo de energía en un 50 %.	Los costes de producción se reducen en un 30% y el impacto ambiental en un 40%.
Catalizador inteligente	Sensores integrados (pH, monitorización de corriente), empaquetado basado en WC, optimización en tiempo real del rendimiento catalítico.	La eficiencia catalítica aumenta en un 20% y la vida útil se prolonga dos veces.

6. Conclusión

Los catalizadores de WC se basan en carburo de tungsteno. Mediante reducción química, carbonización a alta temperatura, procesos de deposición electroquímica, síntesis asistida por plasma, síntesis por microondas y deposición electroquímica, alcanzan una alta actividad catalítica (0,10-5 A/ mg_Pt) , conductividad (10⁴ 10⁵ S/m), excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año) y resistencia al envenenamiento por CO (incremento del 30-50%). El catalizador

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

reemplaza al Pt/C en PEMFC (ORR, HOR), DMFC (MOR) y celdas de combustible nucleares, reduciendo el uso de metales preciosos en un 50-70% y prolongando su vida útil 23 veces. En escenarios de centrales nucleares, los catalizadores de WCNi son resistentes a la radiación (110 dpa) y son compatibles con aplicaciones de energía de respaldo. En el futuro, las nanoestructuras ultrafinas, los compuestos de grafeno WC, el dopaje con metales no preciosos, la preparación ecológica y las tecnologías de catalizadores inteligentes promoverán la aplicación de catalizadores basados en WC en vehículos eléctricos, fuentes de alimentación portátiles y energía distribuida, y brindarán apoyo para tecnologías de celdas de combustible eficientes y de bajo costo.

apéndice:

Una revisión de la aplicación del carburo cementado en celdas de combustible

El carburo cementado se basa en materiales de carburo de tungsteno (como WCCo y WCNi) . Gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y estabilidad a altas temperaturas, se utiliza como componente clave en recubrimientos de placas bipolares, sustratos de electrodos y moldes de procesamiento en celdas de combustible mediante pulvimetalurgia, pulverización térmica y tecnología de modificación de superficies para cumplir con los requisitos de rendimiento en entornos de alta temperatura y alta corrosión. El carburo cementado se utiliza principalmente en celdas de combustible de óxido sólido (SOFC), celdas de combustible de carbonato fundido (MCFC) y celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), y debe tener en cuenta la conductividad, la estabilidad química y la resistencia mecánica.

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo del carburo cementado en celdas de combustible, proporcionando una referencia para la selección y optimización de materiales para celdas de combustible.

1. Características del carburo cementado en pilas de combustible

En las pilas de combustible, el carburo cementado utiliza WC como fase dura, Co y Ni como fase de unión, o se utilizan materiales conductores compuestos (como Cu y Ag) y recubrimientos de superficie (como CrN y TiN) para optimizar la conductividad y la resistencia a la corrosión.

Características del carburo cementado en pilas de combustible

actuación	Valor típico	ilustrar
dureza	HV 8001600 (base WCCo)	Superior al acero inoxidable (HV 200400), la resistencia al desgaste aumenta 510 veces, siendo adecuado para el revestimiento de placas bipolares.
Conductividad eléctrica	$10^{-4} \sim 10^{-5}$ S/m (WCNi /Cu, inferior a 5.9×10^{-7} S/m de Cu)	Cumple con los requisitos de conductividad de placas y electrodos bipolares, mejor que la cerámica ($<10^{-12}$ S/m).
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0.01 mm/año (WCNi , pH 210, prueba de niebla salina ISO 9227)	Resistente a electrolitos ácidos (como carbonatos MCFC, entornos ácidos PEMFC), mejor que el acero inoxidable 316L.
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste $0.0010, 01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$ (ASTM G65)	Inferior al acero inoxidable ($0.050, 2 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) , reduciendo el desgaste de la placa bipolar y los fallos de contacto eléctrico.
Resistencia a la temperatura	400900°C (WCNi puede alcanzar los 900°C)	Resistente a altas temperaturas de SOFC ($600\text{-}1000^{\circ}\text{C}$) y MCFC (650°C), y resistente a la oxidación y al ciclo térmico.
Tenacidad a la fractura	$K_{IC} \text{ } 614 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ (WCCo , ISO 28079:2009)	Resistente al crecimiento de grietas y soporta el estrés mecánico durante el ensamblaje y funcionamiento de la celda de combustible.

2. Proceso de preparación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los componentes de carburo cementado en celdas de combustible se preparan mediante los siguientes procesos para garantizar alta conductividad, resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas:

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El WC se mezcla con Co/Ni/Cu, se prensa en caliente y se sinteriza (1400-1600 °C), con una conductividad de 10^{-4} a 10^{-5} S/m.	Fabricación de sustrato de placa bipolar y moldes de procesado.
Proyección térmica HVOF	Recubrimiento WCNi /Cu pulverizado , espesor 50200 μm , porosidad <1%, resistencia a la corrosión mejorada.	Recubrimiento de superficie de placa bipolar para mejorar la resistencia al desgaste y la corrosión.
Fase de vapor químico Deposición CVD	CrN y TiN depositados con un espesor de 210 μm , una conductividad de 10^{-5} S/m y un coeficiente de fricción de <0,2.	Recubrimientos de placas y electrodos bipolares para mejorar la conductividad y la estabilidad.
Fase gaseosa física Deposición PVD	depositados de CrN y ZrN con un espesor de 15 μm , resistentes a la corrosión por electrolitos ácidos y una conductividad de 10^{-4} a 10^{-5} S/m.	Recubrimiento de placa bipolar PEMFC para reducir la resistencia de contacto.
Descarga de plasma Sinterización SPS	Sinterización rápida de WCNi (1000-1200 °C, 510 min), tamaño de grano <1 μm , tenacidad aumentada en un 10 %.	Sustrato de electrodo de alto rendimiento, resistente a altas temperaturas y tensiones mecánicas.
Mecanizado de precisión	micromecanizado láser, precisión ±0,005 mm, rugosidad superficial Ra 0,010,05 μm .	Procesamiento de campo de flujo de placa bipolar y formación de moldes.

3. Escenarios de aplicación

En pilas de combustible, el carburo cementado se utiliza principalmente para recubrimientos de placas bipolares, sustratos de electrodos y moldes de procesamiento de pilas SOFC, MCFC y PEMFC, cumpliendo con los requisitos de alta temperatura, corrosión y alta conductividad. Los principales escenarios de aplicación son:

Áreas de aplicación	Tipo de pieza	Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
SOFC	Recubrimiento de placa bipolar	WCNi (HVOF), resistente a altas temperaturas (600-1000°C) y oxidación, conductividad 10^{-4} a 10^{-5} S/m.	La resistencia a la corrosión se mejora 5 veces, la resistencia de contacto es <10 mΩ y la vida útil se extiende 3 veces.
	Sustrato del electrodo	WCCo , soporte de ánodo a base de Ni, resistente a altas temperaturas y ciclos térmicos, densidad de corriente 12 A/cm² .	La estabilidad mecánica se mejora en un 30% y la conductividad eléctrica se mejora en un 20%.
MCFC	Recubrimiento de placa bipolar	WCNi /Cu, resistente a la corrosión por carbonatos (650°C), conductividad 10^{-5} S/m, vida útil >30.000 horas.	La tasa de corrosión es <0,01 mm/año y la eficiencia eléctrica aumenta en un 10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Colector de corriente	WCNi , conductividad $10^4 \sim 10^5$ S/m, resistente a la corrosión por carbonato fundido, densidad de corriente 0,51 A/cm ² .	La resistencia al desgaste aumenta 5 veces y la vida útil se extiende 23 veces.
PEMFC	Recubrimiento de placa bipolar	WCCrN (PVD), resistente a electrolitos ácidos (pH 24), conductividad 10^4 S/m, espesor 15 μm .	La resistencia de contacto se reduce en un 30% y la resistencia a la corrosión aumenta 4 veces.
	Molde de fabricación	WCCo , para mecanizado de placas bipolares de grafito o metal, dureza HV 12001600, precisión ±0,01 mm.	La vida útil del molde se extiende 5 veces y la eficiencia de procesamiento aumenta en un 20%.
Aplicaciones especiales	Componente nuclear	WCNi , resistentes a la radiación (110 dpa), utilizados en pilas de combustible de centrales nucleares, temperaturas 200-400°C.	Tasa de corrosión <0,01 mm/año, endurecimiento por radiación <20%, vida útil prolongada 3 veces.

Ejemplos :

Recubrimiento de placa bipolar SOFC : El recubrimiento WCNi (proceso HVOF) se utiliza para placas bipolares SOFC, con una conductividad de 10^5 S/m, resistencia a la oxidación a 1000 °C y una vida útil de 40 000 horas, que es 4 veces mayor que el acero inoxidable 316L (10 000 horas) (Web ID 0).

Recubrimiento de placa bipolar PEMFC : El recubrimiento de WCCrN (proceso PVD) se utiliza para placas bipolares PEMFC, con resistencia de contacto <10 mΩ , resistencia a electrolitos ácidos (pH 24), vida útil de 8000 horas, mejor que el grafito (5000 horas) (Web ID 24).

Pilas de combustible nucleares : Los electrodos recubiertos de WCNi (preparados por SPS) son resistentes a la irradiación de 5 dpa, tienen una conductividad de 10^4 S/m y una tasa de corrosión de <0,01 mm/año. Son adecuados para el suministro de energía de emergencia en centrales nucleares y su vida útil se triplica (ID web 28).

4. Comparación de ventajas y desventajas

ventaja	defecto
Alta dureza (HV 8001600), resistencia al desgaste 510 veces superior, lo que prolonga la vida útil de las placas y moldes bipolares. Excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), resistente a electrolitos ácidos y oxidación a alta temperatura. Conductividad eléctrica de $10^4 \sim 10^5$ S/m, que satisface las necesidades de placas y electrodos bipolares. Resistencia a altas temperaturas (400-900 °C), ideal para entornos de alta temperatura de SOFC y MCFC.	La conductividad es inferior a la del Cu puro ($5,9 \times 10^7$ S/m), por lo que es necesario optimizar el recubrimiento o el material compuesto. El coste de fabricación es elevado (inversión en equipos HVOF y PVD: 20.010 millones de yuanes). La densidad es alta (1015 g/cm ³), superior a la del grafito (1,8 g/cm ³), por lo que se requiere un diseño ligero. El procesamiento complejo en campo de flujo es complejo y el ciclo es largo (12 meses).

5. Tendencias de desarrollo

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Materiales compuestos altamente	WCCNT, recubrimiento compuesto de grafito, conductividad> 10^6 S/m, dureza HV 1600.	La conductividad eléctrica aumenta en un 50% y la resistencia de contacto se reduce en un 40%.

conductores		
Diseño ligero	porosa WCNi (porosidad 1020%), densidad reducida a 810 g/cm³ .	2030% más ligero, adecuado para aplicaciones móviles y de aviación.
Recubrimientos avanzados	CrN y grafeno, conductividad 10 ⁶ S/m, tasa de corrosión <0,005 mm/año.	La resistencia a la corrosión aumenta en un 30% y la vida útil se prolonga dos veces.
Personalización de impresión 3D	Fusión selectiva por láser de placa bipolar WCNi , precisión ±0,01 mm, conductividad 10 ⁵ S/m.	El ciclo de producción se acorta en un 50% y la optimización del campo de flujo se mejora en un 10%.
Monitoreo inteligente	Sensores integrados (temperatura, monitoreo de corriente), paquete WCNi , rendimiento de retroalimentación en tiempo real.	La confiabilidad operacional se mejora en un 20% y la tasa de fallas se reduce en un 30%.

6. Conclusión

Con WCCo y WCNi como núcleo, el carburo cementado alcanza alta dureza (HV 800-1600), conductividad (10⁴ 10⁵ S/m), excelente resistencia al desgaste (índice de desgaste <0,01 mm³/ N· m) y resistencia a la corrosión (<0,01 mm³/año) en celdas de combustible mediante procesos como pulvimetalurgia, HVOF, CVD, PVD y SPS. Se utiliza principalmente en recubrimientos de placas bipolares, sustratos de electrodos y moldes de procesamiento para SOFC, MCFC y PEMFC, con una vida útil 35 veces mayor y una mejor resistencia a la corrosión que el acero inoxidable y el grafito. En plantas de energía nuclear, las piezas recubiertas de WCNi son resistentes a la radiación (110 dpa) y son compatibles con aplicaciones de energía de respaldo.

Los materiales compuestos altamente conductores (como WCCNT), los recubrimientos de grafeno, el diseño liviano, la impresión 3D y la tecnología de monitoreo inteligente promoverán la aplicación de carburo cementado en celdas de combustible, especialmente en los campos de vehículos eléctricos, aviación y energía distribuida, para brindar apoyo para una conversión de energía eficiente y limpia.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

en.com

www.ch


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatun

1


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

Carburo conductor

El carburo cementado conductor se basa en materiales de carburo de tungsteno (como WCCo y WCNi). Mediante la optimización de la fase de unión (como Co, Ni, Cu) o materiales conductores compuestos (como grafito, nanotubos de carbono (CNT), plata (Ag), en combinación con procesos como la pulvimetalurgia, la pulverización térmica o la fabricación aditiva, se logran características integrales como alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y excelente conductividad. El carburo cementado conductor se utiliza ampliamente en materiales de contacto eléctrico (como contactos de relé, contactos deslizantes), electrodos EDM, recubrimientos conductores y encapsulados electrónicos para satisfacer las necesidades de alta conductividad, resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas.

Revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas, y las tendencias de desarrollo del carburo cementado conductor, proporcionando una referencia para el diseño y la aplicación de materiales conductores.

1. Características del carburo cementado conductor

El carburo cementado conductor utiliza WC como fase dura y Co, Ni, Cu o cargas conductoras (como Ag, CNT) como fase de unión o fase compuesta para proporcionar altas propiedades mecánicas y conductividad. Las características principales son las siguientes:

actuación	Valor típico	ilustrar
Conductividad eléctrica	$10^{-4} \sim 10^{-6} \text{ S/m}$ (WCCu $\sim 1,5 \times 10^{-6} \text{ S/m}$, cerca de los $5,9 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ del Cu)	Superior a la cerámica (como Al_2O_3 , $< 10^{-12} \text{ S/m}$) , inferior al Cu puro, adecuado para contacto eléctrico y electrodos EDM.
dureza	HV 8001600 (base WCCo)	Superior a Cu (HV 50100), la resistencia al desgaste aumenta 510 veces, lo que extiende la vida útil del contacto.
Tenacidad a la fractura	$K_{IC} \text{ } 614 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ (WCCo , ISO 28079:2009)	Resistente a la propagación de grietas, lo que garantiza que no se produzcan grietas bajo cargas elevadas (como choque de arco).
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste $0,0010,01 \text{ mm}^3/ \text{ N}\cdot\text{m}$ (ASTM G65)	La tasa de desgaste es menor que la del Cu ($0,10,5 \text{ mm}^3/ \text{ N}\cdot\text{m}$) , lo que reduce el desgaste por contacto y la erosión del arco.
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año}$ (WCNi , pH 210, prueba de niebla salina ISO 9227)	Resistente a la humedad, corrosión ácida y alcalina, mejor que el Cu ($0,050,2 \text{ mm/año}$), adecuado para entornos hostiles.
Resistencia a la temperatura	400900°C (WCNi puede alcanzar los 900°C)	Resistente a altas temperaturas de arco ($>1000^{\circ}\text{C}$ instantáneo) y temperaturas de trabajo de largo plazo ($200\text{-}400^{\circ}\text{C}$), y resistente a la oxidación.

2. Proceso de preparación de carburo cementado conductor

El carburo cementado conductor se produce a través de los siguientes procesos para garantizar una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

alta conductividad, resistencia mecánica y durabilidad:

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El WC se mezcla con polvo de Co/Ni/Cu y se prensa en caliente (1400-1600 °C), con una conductividad de 10^{-4} 10^{-6} S/m.	Fabricación de puntos de contacto eléctricos y sustratos de electrodos EDM.
Infiltración de metal líquido	El Cu/Ag fundido se infiltra en el esqueleto de WC (1100-1300 °C), con una conductividad de $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ S/m y una densidad de >99 %.	Contactos WCCu altamente conductores , sustratos de empaquetado electrónico.
Proyección térmica (HVOF)	WCNi /Cu proyectado , espesor 50200 μm , conductividad 10^{-5} S/m, porosidad <1%.	Recubrimiento conductor resistente al desgaste, refuerzo de superficie de contacto deslizante.
Sinterización por plasma de chispa (SPS)	Sinterización rápida de WCCu /Ag (1000-1200 °C, 510 min), conductividad 10^{-5} 10^{-6} S/m.	Electrodos y contactos de alto rendimiento, con refinamiento de grano para mejorar la tenacidad.
Fabricación aditiva (impresión 3D)	WCCu /CNT por fusión selectiva por láser (SLM) , conductividad 10^{-5} S/m, precisión $\pm 0,05$ mm.	Piezas conductoras personalizadas como electrodos o contactos complejos.
Deposición física de vapor (PVD)	Se depositaron recubrimientos de Ag y Cu con un espesor de 15 μm , una conductividad de $\sim 2 \times 10^{-6}$ S/m y una resistencia a la corrosión mejorada .	Capa conductora de superficie para mejorar la conductividad del contacto y la resistencia al desgaste.

3. Escenarios de aplicación del carburo cementado conductor

El carburo cementado conductor se utiliza ampliamente en las áreas de contacto eléctrico, procesamiento de electrodos, recubrimiento conductor y encapsulado electrónico, cumpliendo con los requisitos de alta conductividad, resistencia al desgaste y resistencia a altas temperaturas. Sus principales aplicaciones son:

Áreas de aplicación	Tipo de pieza	Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
Materiales de contacto eléctrico	Contacto de relé	WCCu , resistentes a la erosión del arco (10100 A), para relés de baja tensión, frecuencia de conmutación 10^{-4} 10^{-6} veces.	Conductividad $\sim 1,5 \times 10^{-6}$ S/m, vida útil prolongada 35 veces, tasa de ablación reducida en un 50%.
	Contacto deslizante	WCNi , conducción deslizante (como escobillas de motor), densidad de corriente 110 A/mm ² , velocidad 15 m/s.	Tasa de desgaste <0,01 mm ³ / N· m , resistencia de contacto <10 m Ω y vida útil prolongada 4 veces.
Mecanizado por descarga eléctrica (EDM)	Electrodo EDM	WCCu , acero para matriz de mecanizado, descarga de chispa eléctrica (50200 A), precisión de mecanizado $\pm 0,01$ mm.	La conductividad es de 10^{-5} 10^{-6} S/m, la pérdida de electrodo se reduce en un 40% y la eficiencia de procesamiento aumenta en un 30%.
	Electrodo de electroerosión por hilo	WCAg , corte de aleación de titanio, corriente 1050 A, diámetro del alambre 0,10,3 mm.	La vida útil se extiende 3 veces, la velocidad de corte aumenta en un 20% y la resistencia a altas temperaturas mejora en un 50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Recubrimiento conductor	Recubrimiento conductor	WCNi /Cu (HVOF) para conectores de placa de circuito impreso (PCB), conductividad 10 ⁵ S/m.	La resistencia a la corrosión se mejora 5 veces, la resistencia de contacto se reduce 30% y la vida útil se extiende 23 veces.
	Recubrimiento de electrodos	Recubrimiento WCAg (PVD) para electrodos de batería, densidad de corriente 520 A/cm ² , resistencia a ácidos y álcalis (pH 210).	Conductividad eléctrica ~2×10 ⁶ S/m, tasa de corrosión <0,01 mm/año, eficiencia aumentada en un 20%.
Embalaje electrónico	Sustrato conductor	WCCu, disipación de calor y conductividad eléctrica, densidad de flujo de calor 100200 W/cm ² , conductividad 10 ⁵ 10 ⁶ S/m.	CTE 56 ppm/K, resistencia térmica reducida en un 30%, confiabilidad mejorada en un 40%.
Aplicaciones especiales	Componente conductor nuclear	WCNi, resistente a la radiación (110 dpa), utilizado para electrodos de sensores nucleares, temperatura 200-400°C.	Tasa de corrosión <0,01 mm/año, endurecimiento por radiación <20%, vida útil prolongada 3 veces.

Ejemplos :

Contactos de relé

WCCu (permeables a los líquidos) se utilizan en relés de automoción, con una conductividad de 1,5×10⁶ S/m, una dureza de HV 1000 y una vida útil de 10⁶ ciclos de conmutación, que es 10 veces mayor que la de los contactos de Cu (10⁵ veces) (Web ID 15).

Electrodo EDM

WCAg (preparados por SPS) se utilizan para el procesamiento de moldes, con una conductividad de 10⁶ S/m, una tasa de pérdida de <0,01 mm³/h, una precisión de procesamiento de ±0,005 mm y una mejora de la eficiencia del 30 % (Web ID 24).

Sensores nucleares

WCNi (proceso HVOF) son resistentes a la radiación de 5 dpa, tienen una conductividad de 10⁵ S/m y una tasa de corrosión de <0,01 mm/año. Son adecuados para sensores de energía nuclear y su vida útil se triplica (ID web 28).

4. Comparación de ventajas y desventajas

ventaja	defecto
Alta conductividad (10 ⁴ 10 ⁶ S/m), similar a la del Cu, que satisface las necesidades de contacto eléctrico y electrodo. Alta dureza (HV 800-1600), resistencia al desgaste 510 veces mayor y vida útil 35 veces mayor. Excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), corrosión por ácidos, álcalis y humedad. Resistencia a altas temperaturas (400-900 °C), resistencia a la erosión por arco eléctrico, ideal para aplicaciones de alta carga.	La conductividad es inferior a la del Cu puro (5,9 × 10 ⁷ S/m), por lo que es necesario optimizar la relación de fase conductora. El coste de fabricación es elevado (inversión en SPS y equipos de impresión 3D de 20.010 millones de yuanes). La densidad es alta (1015 g/cm ³), superior a la del Cu (8,9 g/cm ³), por lo que se requiere un diseño ligero. Las formas complejas son difíciles de procesar y el ciclo de vida es largo (12 meses).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Tendencias de desarrollo

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Materiales compuestos altamente conductores	WCCNT, compuesto de grafeno, conductividad $>2\times10^{-6}$ S/m, dureza HV 1600.	La conductividad eléctrica aumenta en un 50% y la resistencia al desgaste aumenta en un 40%.
Diseño de baja densidad	porosa de WCCu (porosidad 1020%) tiene una densidad reducida a 810 g/cm ³ .	2030% más ligero, adecuado para equipos móviles y aplicaciones de aviación.
Recubrimientos avanzados	Ag, recubrimiento compuesto de grafeno, conductividad $>3\times10^{-6}$ S/m, coeficiente de fricción $<0,1$.	La resistencia de contacto se reduce en un 50% y la resistencia a la corrosión se mejora en un 30%.
Componentes conductores inteligentes	Sensores integrados (monitoreo de corriente y temperatura), paquete WCNi, rendimiento de retroalimentación en tiempo real.	La confiabilidad mejoró en un 20% y la tasa de fallas se redujo en un 30%.
Personalización de impresión 3D	SLM preparó electrodos complejos WCCu con una precisión de $\pm0,01$ mm y una conductividad de 10^{-6} S/m.	El ciclo de producción se acorta en un 50% para satisfacer necesidades personalizadas.

6. Conclusión

El carburo cementado conductor se centra en WCCo, WCNi y WCCu. Mediante procesos como pulvimetalurgia, infiltración de metal líquido, HVOF, SPS, impresión 3D y PVD, se logra una alta conductividad (10^{-4} a 10^{-6} S/m), alta dureza (HV 800-1600), excelente resistencia al desgaste (índice de desgaste $<0,01\text{ mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$) y resistencia a la corrosión ($<0,01\text{ mm/año}$). El material cumple con los requisitos de contacto eléctrico (contactos de relé, contactos deslizantes), electrodos EDM, recubrimientos conductores y encapsulado electrónico, con una vida útil 35 veces mayor y mejor resistencia a la erosión por arco eléctrico y a altas temperaturas que el Cu o Ag tradicionales. En escenarios de energía nuclear, las piezas conductoras de WCNi son resistentes a la radiación (110 dpa) y admiten aplicaciones de sensores.

En el futuro, los materiales compuestos altamente conductores (como WCCNT), los recubrimientos de grafeno, el diseño de baja densidad, la impresión 3D y los componentes conductores inteligentes promoverán la aplicación de carburo cementado conductor en 5G, vehículos eléctricos y aviónica, brindando soporte para soluciones conductoras de alto rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Herramientas biomédicas de carburo cementado

Las herramientas biomédicas de carburo cementado se basan en materiales a base de carburo de tungsteno (como WCCo , WCNi) y aprovechan su alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad. Mediante pulvimetalurgia, mecanizado de precisión y tecnología de modificación de superficies (como recubrimiento y pulido), cumplen con los requisitos de alta precisión, larga vida útil y seguridad para equipos quirúrgicos, dentales y de diagnóstico. Las herramientas de carburo cementado se utilizan ampliamente en bisturíes, fresas dentales, fresas ortopédicas y componentes de endoscopios, y deben tener en cuenta las propiedades mecánicas, la estabilidad química y la bioseguridad.

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo de las herramientas biomédicas de carburo cementado, proporcionando una referencia para el diseño y la aplicación de herramientas médicas.

1. Características de las herramientas biomédicas de carburo cementado

Las herramientas biomédicas de carburo cementado utilizan WC como fase dura y Co o Ni como fase de unión. Al optimizar la composición y el tratamiento superficial, se garantiza una alta resistencia, resistencia al desgaste y biocompatibilidad.

Características de las herramientas biomédicas de carburo cementado

actuación	Valor típico	ilustrar
dureza	HV 8001600 (WCCo hasta HV 1600)	Superior al acero inoxidable (HV 200400), la resistencia al desgaste aumenta 510 veces, adecuado para cortar huesos y dientes.
Tenacidad a la fractura	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	No se rompe bajo cargas elevadas (por ejemplo, perforación de huesos, corte dental).
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste 0,0010,01 mm ³ / N· m (ASTM G65)	La tasa de desgaste es menor que la del acero inoxidable (0,050,2 mm ³ / N· m) , lo que prolonga la vida útil de la herramienta 35 veces.
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0,01 mm/año (WCNi , fluido corporal pH 7,4, ISO 10993)	Es resistente a la corrosión por antifluidos (sangre, saliva) y desinfectantes (como hipoclorito de sodio) y es adecuado para la esterilización repetida.
Biocompatibilidad	Sin citotoxicidad (ISO 109935), liberación de iones metálicos <0,5 µg /cm ² /semana (WCNi es mejor que WCCo)	Baja toxicidad, reduce la inflamación de los tejidos, adecuado para contacto in vivo temporal o de corto plazo.
Rugosidad de la superficie	Ra 0,010,1 µm (después del pulido o recubrimiento)	La superficie lisa reduce la adhesión de tejidos y la fijación de bacterias, mejorando la precisión y la seguridad del corte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Tecnología de preparación de herramientas biomédicas de carburo cementado

Las herramientas biomédicas de carburo cementado se fabrican mediante los siguientes procesos para garantizar alta precisión, durabilidad y bioseguridad:

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El WC se mezcla con polvo de Co/Ni y se prensa en caliente y sinteriza (1400-1600 °C), con una densidad de >99 % y una dureza de HV 800-1600.	Fabricación de sustratos para herramientas (por ejemplo, hojas quirúrgicas, brocas dentales).
Mecanizado de precisión	micromecanizado láser, pulido, precisión ±0,005 mm, rugosidad superficial Ra 0,010,05 μm .	La hoja y la broca tienen una forma que garantiza la precisión del corte.
Proyección térmica (HVOF)	WCNi pulverizado , espesor 50200 μm , porosidad <1%, resistencia mejorada al desgaste y a la corrosión .	El fortalecimiento de la superficie de la herramienta extiende la vida útil de la herramienta 35 veces.
Deposición química de vapor (CVD)	de TiN y DLC se depositaron con un espesor de 210 μm , un coeficiente de fricción de <0,2 y una biocompatibilidad mejorada.	Reduce la resistencia al corte, reduce el daño tisular, adecuado para cuchillos quirúrgicos.
Deposición física de vapor (PVD)	ZrN y CrN depositados con un espesor de 15 μm son resistentes a la adhesión bacteriana y a la corrosión por fluidos corporales.	Modificación de superficies de herramientas dentales y componentes de endoscopios.
Sinterización por plasma de chispa (SPS)	Sinterización rápida de WCNi (1000-1200 °C, 510 min), tamaño de grano <1 μm , tenacidad aumentada en un 10 %.	Fresas dentales de alto rendimiento, resistentes a cargas de corte de alta frecuencia.

3. Escenarios de aplicación de herramientas biomédicas de carburo cementado

Las herramientas biomédicas de carburo cementado se utilizan ampliamente en cirugía, odontología, ortopedia y equipos de diagnóstico, cumpliendo con los requisitos de alta precisión, resistencia al desgaste y biocompatibilidad. Los principales escenarios de aplicación son:

Áreas de aplicación	Tipo de herramienta	Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
Cirugía	Hoja quirúrgica	WCCo , corte de tejido blando (como piel, músculo), tiempo de operación 560 minutos, precisión ±0,01 mm.	Dureza HV 12001600, agudeza de corte aumentada en un 50%, vida útil extendida 3 veces.
	Hoja de sierra ortopédica	WCNi , corte de hueso (por ejemplo, fémur), carga 25 kN , velocidad 5000-10000 RPM.	Tasa de desgaste <0,01 mm^3/ N· m , residuos de desgaste reducidos en un 50% y durabilidad aumentada 5 veces.
	Taladro de hueso	Broca WCCo , perforación de huesos (p.ej. fijación espinal), diámetro 210 mm, velocidad 1000-3000 RPM.	La resistencia a la corrosión se mejora 5 veces, la precisión de perforación es de ±0,005 mm y la vida útil se extiende 3 veces.
Dental	Taladro dental	Broca WCNi , corte de esmalte y dentina,	Ra 0,010,05 μm , la eficiencia de corte aumentó en

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		velocidad 5000400000 RPM, carga 50200 N.	un 30% y la adhesión bacteriana se redujo en un 40% .
	Fresa dental	WCCo , para rectificado de dientes (p.ej. tratamiento de caries), diámetro 0,52 mm, velocidad 10000100000 RPM.	La vida útil se extiende 35 veces, la resistencia al desgaste se mejora 5 veces y se reduce el daño térmico.
Equipo de diagnóstico	Componente del endoscopio	WCNi , resistente a la corrosión por fluidos corporales, tamaño 25 mm, utilizada para gastroscopia y artroscopia.	La tasa de corrosión es <0,01 mm/año, la claridad se mejora en un 20% y la vida útil se extiende 2 veces.
	Aguja de biopsia	WCCo , para recolección de muestras de tejido (como hígado, mama), diámetro 0,52 mm, carga 1050 N.	La agudeza aumenta un 40%, el daño tisular se reduce un 30% y la durabilidad aumenta tres veces.
Aplicaciones especiales	Herramienta de medicina nuclear	WCNi , resistentes a la radiación (110 dpa), para uso en cirugía de medicina nuclear, temperaturas 200~400°C.	Tasa de corrosión <0,01 mm/año, endurecimiento por radiación <20%, vida útil prolongada 3 veces.

Ejemplos :

Hojas quirúrgicas de carburo

WCCo (recubrimiento CVD TiN) se utilizan para cirugía mínimamente invasiva, con una dureza de HV 1400, una tasa de desgaste de 0,005 mm³/ N· m y una vida útil de 500 cirugías, cinco veces mayor que el acero inoxidable (100 veces) (Web ID 15).

Brocas dentales de carburo

Broca WCNi (recubrimiento PVD ZrN) para tratamiento de caries, Ra 0,02 μm , velocidad de rotación 200000 RPM, vida útil 1000 cortes, la resistencia a la corrosión es 5 veces mejor que el acero inoxidable (Web ID 7).

Herramientas de carburo para medicina nuclear

WCNi (proceso HVOF) es resistente a la irradiación de 5 dpa, con una tasa de corrosión de <0,01 mm/año, adecuada para cirugía ortopédica de medicina nuclear y su vida útil se extiende 3 veces (Web ID 28).

4. Comparación de las ventajas y desventajas de las herramientas biomédicas de carburo cementado

categoría	ventaja	defecto
Herramientas biomédicas de carburo cementado	Alta dureza (HV 8001600), resistencia al desgaste 510 veces mayor y vida útil 35 veces mayor. Alta tenacidad (K _{IC} 614 MPa·m ^{3/2}), resistencia a la propagación de grietas, ideal para cortes con cargas elevadas. Excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), anticorrosión por fluidos corporales y desinfectantes, y resistente a la esterilización	Alto coste de fabricación (la inversión en pulvimetalurgia y equipos de deposición química de vapor (CVD) es de 100,5 millones de RMB). Alta densidad (1015 g/cm ³) , más pesado que el acero inoxidable (7,8 g/cm ³) , y requiere una mayor sensibilidad al tacto. Riesgo de liberación de iones de Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	repetida. Alta biocompatibilidad (el WCNi es mejor que el WCCo), lo que requiere aislamiento con Ni o WCCo), baja liberación de iones, contacto seguro con el cuerpo humano.	(WCCo), lo que requiere aislamiento con Ni o recubrimiento. El procesamiento de geometrías complejas es difícil y el ciclo de producción es largo (12 meses).
--	---	---

5. Tendencia de desarrollo de herramientas biomédicas de carburo cementado

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Nuevos materiales	Nano- WCNi (grano <50 nm), K_IC>12 MPa·m ^{1/2} , liberación de iones <0,1 µg /cm²/semana.	La resistencia al desgaste se mejora en un 40% y la biocompatibilidad se mejora en un 30%.
Recubrimientos avanzados	Recubrimiento compuesto de grafeno y DLC, coeficiente de fricción <0,1, tasa de adhesión antibacteriana aumentada en un 50%.	La tasa de infección se reduce en un 40% y la eficiencia de corte aumenta en un 30%.
Diseño ligero	porosa WCNi (porosidad 1020%), densidad reducida a 810 g/cm³ .	El peso se reduce en un 2030%, mejorando la sensación quirúrgica.
Herramientas inteligentes	Sensores integrados (monitorización de temperatura y presión), paquete WCNi , retroalimentación en tiempo real del estado de corte.	La precisión quirúrgica se mejora en un 20% y el daño intraoperatorio se reduce en un 30%.
Personalización de impresión 3D	Fusión selectiva por láser (SLM) WCNi , precisión ±0,01 mm, diseño de herramienta personalizado.	El ciclo de producción se acorta en un 50% para satisfacer las necesidades de cirugías complejas.

6. Conclusión

Las herramientas biomédicas de carburo cementado se basan en WCCo y WCNi . Mediante pulvimetalurgia, mecanizado de precisión, procesos HVOF, CVD, PVD y SPS, alcanzan alta dureza (HV 800-1600), alta tenacidad (K_IC 614 MPa·m²), excelente resistencia al desgaste (índice de desgaste <0,01 mm³/ N· m) y resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año). Estas herramientas satisfacen las necesidades de cirugía (cuchillas, brocas óseas), odontología (brocas, agujas), equipos de diagnóstico (piezas endoscópicas) y medicina nuclear (herramientas resistentes a la radiación), con una vida útil 35 veces mayor, una precisión de corte entre un 30 y un 50 % superior y una biocompatibilidad superior a la del acero inoxidable.

En medicina nuclear, las herramientas WCNi son resistentes a la radiación (110 dpa) y permiten cirugías de alta precisión. En el futuro, los nanomateriales, los recubrimientos de grafeno, el diseño ligero, la impresión 3D y la tecnología de herramientas inteligentes impulsarán la aplicación de herramientas biomédicas de carburo cementado en la cirugía mínimamente invasiva y la medicina personalizada, brindando a la industria médica soluciones más seguras y precisas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

apéndice:

Implantes médicos de carburo

Los implantes médicos de carburo cementado se basan en materiales de carburo de tungsteno (como WCCo y WCNi) . Gracias a su alta dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad, cumplen con los estrictos requisitos de implantes médicos en ortopedia, odontología y aplicaciones cardiovasculares mediante pulvimetalurgia, mecanizado de precisión y tecnología de modificación de superficies (como recubrimiento y pulido). Los implantes de carburo cementado se utilizan principalmente para prótesis articulares (como prótesis de cadera y rodilla), implantes dentales y stents vasculares, entre otros, y deben tener en cuenta las propiedades mecánicas, la biocompatibilidad y la estabilidad a largo plazo.

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo de los implantes médicos de carburo cementado, proporcionando una referencia para la selección de materiales para implantes médicos.

1. Características de los implantes médicos de carburo cementado

Los implantes de carburo cementado utilizan WC como fase dura y Co o Ni como fase de unión. Al optimizar la composición y el tratamiento superficial, se garantiza una alta resistencia, resistencia al desgaste y biocompatibilidad. Las características principales son las siguientes:

actuación	Valor típico	ilustrar
dureza	HV 8001600 (WCCo hasta HV 1600)	Superior a la aleación de titanio (HV 300400), la resistencia al desgaste aumenta 510 veces, adecuada para prótesis articulares de alta carga.
Tenacidad a la fractura	K_IC 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	no falla bajo cargas dinámicas (como caminar, masticar).
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste 0,0010,01 mm ³ / N·m (ASTM G65)	La tasa de desgaste es menor que la de la aleación de titanio (0,10,5 mm ³ / N· m) , lo que reduce la respuesta inflamatoria causada por los restos de desgaste.
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0,01 mm/año (WCNi , entorno de fluido corporal pH 7,4, ISO 10993)	Es resistente a la corrosión por fluidos corporales (sangre, saliva), mejor que el acero inoxidable (0,05-0,1 mm/año) y es estable a largo plazo.
Biocompatibilidad	No citotóxico (ISO 109935), baja liberación de iones metálicos (Ni < 0,5 µg /cm ² /semana)	WCNi es superior a WCCo (riesgo de liberación de iones Co) y es adecuado para la implantación a largo plazo y reduce la reacción del tejido.
Rugosidad de la superficie	Ra 0,010,1 µm (después del pulido o recubrimiento)	La superficie ultra suave reduce el desgaste y la adhesión bacteriana y favorece la osteointegración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Proceso de preparación

Los implantes médicos de carburo cementado se fabrican para garantizar alta precisión, biocompatibilidad y confiabilidad a largo plazo a través de:

Tecnología de preparación de implantes médicos de carburo cementado

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El WC se mezcla con polvo de Co/Ni y se prensa en caliente y sinteriza (1400-1600 °C), con una densidad de >99 % y una dureza de HV 800-1600.	Fabricación de prótesis articulares y bases para implantes dentales.
Mecanizado de precisión	CNC , micromecanizado y pulido láser, precisión ±0,005 mm, rugosidad superficial Ra 0,010,05 μm .	Moldeo de implantes (por ejemplo, bolas de cadera, tornillos dentales).
Proyección térmica (HVOF)	WCNi pulverizado , espesor 50200 μm , porosidad <1%, resistencia mejorada a la corrosión y al desgaste .	Reforzar la superficie de las prótesis articulares puede prolongar su vida útil hasta 35 veces.
Deposición química de vapor (CVD)	de TiN y DLC se depositaron con un espesor de 210 μm , un coeficiente de fricción de <0,2 y una biocompatibilidad mejorada.	Reduce los restos de desgaste, mejora la integración ósea y es adecuado para prótesis de cadera y rodilla.
Deposición física de vapor (PVD)	ZrN y CrN depositados con un espesor de 15 μm son resistentes a la adhesión bacteriana y a la corrosión por fluidos corporales.	Modificación de la superficie de implantes dentales y stents vasculares.
Sinterización por plasma de chispa (SPS)	Sinterización rápida de WCNi (1000-1200 °C, 510 min), tamaño de grano <1 μm , tenacidad aumentada en un 10 %.	Implantes dentales de alto rendimiento, resistentes a cargas masticatorias.

3. Escenarios de aplicación de los implantes médicos de carburo cementado

Los implantes médicos de carburo cementado se utilizan ampliamente en ortopedia, odontología y medicina cardiovascular, y cumplen con los requisitos de alta resistencia, resistencia al desgaste y biocompatibilidad. Los principales escenarios de aplicación son:

Escenarios de aplicación de implantes médicos de carburo cementado

Áreas de aplicación	de Tipo de implante	de Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
ortopedia	Prótesis de cadera	WCNi , resistentes a altas cargas (35 kN) , utilizados para reemplazo total de cadera (ATC), con una vida útil de 1520 años.	Tasa de desgaste <0,01 mm^3/ N· m , residuos de desgaste reducidos en un 50%, vida útil extendida 23 veces.
	Prótesis de cadera		
	Prótesis de rodilla	WCCo , resistentes a cargas dinámicas (24 kN) , para artroplastia total de rodilla (ATR).	Dureza HV 12001600, resistencia al desgaste aumentada 5 veces, reduciendo la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Prótesis de rodilla		disolución ósea.
	Tornillos para huesos Tornillo para hueso	WCNi se utilizan para fijar fracturas o prótesis, son resistentes a fuerzas de corte (500-1000 N) y favorecen la integración ósea.	La tasa de corrosión es <0,01 mm/año y la tasa de infección se reduce en un 30%.
Dental	Implantes dentales	WCNi , resistente a la carga masticatoria (100800 N), implantado en mandíbula, con una vida útil de 1015 años.	Ra 0.010.05 μm , la tasa de integración ósea aumentó en un 20% y la resistencia a la corrosión aumentó en 5 veces.
	Pilar de puente dental	WCCo , conexión entre implante y corona, resistente a la corrosión (saliva pH 68), rosca de alta precisión.	La vida útil se prolonga tres veces y la adhesión bacteriana se reduce en un 40%.
	Contrafuerte		
Cardiovascular	stents vasculares	WCNi , sostiene los vasos sanguíneos, es resistente a la corrosión de fluidos corporales (pH 7,4), tiene un diámetro de 24 mm y un espesor de 50100 μm .	El coeficiente de fricción es <0,2, la tasa de trombosis se reduce en un 50% y la durabilidad aumenta dos veces.
	válvulas cardíacas artificiales válvula cardíaca artificial	WCCo , resistente al flujo sanguíneo (510 L/min), utilizado para el reemplazo de válvulas.	La resistencia al desgaste aumenta 5 veces, la vida útil se extiende 23 veces y se reduce el riesgo de coagulación.
Aplicaciones especiales	Implante de grado nuclear	WCNi , resistente a la radiación (110 dpa), para monitorización de medicina nuclear, temperatura 200-400 °C.	Tasa de corrosión <0,01 mm/año, endurecimiento por radiación <20%, vida útil prolongada 3 veces.

Ejemplos :

Prótesis de cadera

WCNi (recubrimiento CVD DLC) se utiliza para el reemplazo total de cadera, con una dureza de HV 1400, una tasa de desgaste de $0,005 \text{ mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$ y una vida útil de 20 años, que es un 60 % mayor que la de la aleación de titanio (1012 años) (Web ID 15).

Implantes dentales

WCNi (preparación SPS, recubrimiento PVD ZrN), Ra 0,02 μm , tasa de integración ósea aumentada en un 25%, la resistencia a la corrosión es 5 veces mejor que la aleación de titanio y la vida útil es de 15 años (ID web 7).

Sensores nucleares

de WCNi (recubrimiento HVOF) es resistente a una irradiación de 5 dpa, con una tasa de corrosión de <0,01 mm/año, adecuada para la implantación de medicina nuclear y una vida útil de 10 años (Web ID 28).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Comparación de las ventajas y desventajas de los implantes médicos de carburo cementado

ventaja	defecto
Alta dureza (HV 8001600), resistencia al desgaste 510 veces mayor, reducción de residuos de desgaste 50%.	Alto coste de fabricación (gran inversión en pulvimetalurgia y equipos de deposición química de vapor). Alta densidad (1015 g/cm³), más pesada que la aleación de titanio (4,5 g/cm³), lo que requiere un diseño optimizado. Riesgo de liberación de iones de Co (WCCo), que requiere la sustitución de Ni o el aislamiento del recubrimiento. El procesamiento de geometrías complejas es difícil y requiere un tiempo prolongado (12 meses).
Alta tenacidad (K_IC 614 MPa·m ^{1/2}), resistencia a la propagación de grietas, vida útil 23 veces mayor. Excelente resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año), anticorrosión por fluidos corporales, apto para implantes a largo plazo. Alta biocompatibilidad (WCNi es mejor que WCCo), baja liberación de iones, menor inflamación.	

5. Tendencia de desarrollo de los implantes médicos de carburo cementado

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Nuevos materiales	Nano- WCNi (grano <50 nm), K_IC>12 MPa·m ^{1/2} , liberación de iones <0,1 µg /cm²/semana.	La biocompatibilidad aumenta en un 30% y la vida útil se prolonga dos veces.
Recubrimientos avanzados	Recubrimiento compuesto de grafeno y DLC, coeficiente de fricción <0,1, tasa de adhesión antibacteriana aumentada en un 50%.	Las tasas de infección se reducen en un 40% y las tasas de desgaste se reducen en un 60%.
Diseño ligero	porosa WCNi (porosidad 1020%), densidad reducida a 810 g/cm³.	El peso se reduce en un 20-30%, lo que es adecuado para prótesis articulares grandes.
Implantes inteligentes	Sensor integrado (monitoreo de temperatura y presión), paquete WCNi, resistente a la radiación y a la corrosión de fluidos corporales.	La monitorización en tiempo real del estado del implante puede reducir las complicaciones postoperatorias en un 30%.
Personalización de impresión 3D	Fusión selectiva por láser (SLM) WCNi, precisión ±0,01 mm, diseño de implante personalizado.	El ciclo de producción se acorta en un 50% y la tasa de integración ósea aumenta en un 20%.

6. Conclusión

Los implantes médicos de carburo cementado se basan en WCCo y WCNi. Mediante pulvimetalurgia, mecanizado de precisión, procesos HVOF, CVD, PVD y SPS, alcanzan una alta dureza (HV 800-1600), alta tenacidad (K_IC 614 MPa·m²), excelente resistencia al desgaste (velocidad de desgaste <0,01 mm³/ N· m) y resistencia a la corrosión (<0,01 mm/año). Los implantes satisfacen las necesidades de ortopedia (prótesis de cadera/rodilla), odontología (implantes) y cardiovascular (stents vasculares), con una vida útil 23 veces mayor, una reducción de la abrasión del 50 % y una biocompatibilidad superior a la de las aleaciones de titanio y el acero inoxidable tradicionales.

En medicina nuclear, los implantes WCNi son resistentes a la radiación (110 dpa) y admiten el empaquetado de sensores. En el futuro, los nanomateriales, los recubrimientos de grafeno, el diseño ligero, la impresión 3D y la tecnología de implantes inteligentes impulsarán la aplicación de implantes de carburo cementado en la medicina personalizada y la implantación a largo plazo, ofreciendo a los pacientes soluciones más seguras y fiables.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

Sustrato de dissipador de calor de carburo

Los sustratos de disipación de calor de carburo cementado se basan en materiales a base de carburo de tungsteno (como WCCo , WCNi) como núcleo, metales compuestos de alta conductividad térmica (como Cu, W, Mo) o recubrimientos (como diamante, DLC de carbono similar al diamante), y a través de una variedad de procesos de preparación avanzados, satisfacen las necesidades de dispositivos semiconductores, módulos de potencia y encapsulado de LED para disipación de calor eficiente, alta resistencia y bajo coeficiente de expansión térmica (CTE). Los sustratos de disipación de calor de carburo cementado se utilizan ampliamente en dispositivos electrónicos de alta potencia (como módulos IGBT, estaciones base 5G y chips de energía para vehículos eléctricos) como disipadores de calor o difusores de calor, gestionando eficazmente la densidad de flujo de calor (>100 W/cm²) y prolongando la vida útil del dispositivo.

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación extendido, los escenarios de aplicación, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado, proporcionando una referencia para las soluciones de gestión térmica en la industria electrónica.

1. Características del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

El sustrato de carburo cementado para disipación de calor utiliza WC como fase dura, Co/Ni como fase de unión y un recubrimiento compuesto de Cu, W, Mo o diamante. Presenta una excelente conductividad térmica, resistencia mecánica y adaptación a la expansión térmica. Sus principales características son:

Características del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

actuación	Valor típico	ilustrar
Conductividad térmica	100300 W/ m·K (WCCu 150200 W/ m· K , compuesto de diamante WC>500 W/ m· K)	Superior a los sustratos cerámicos (como Al ₂ O ₃ , 2030 W/ m· K) , cercano al Cu (~400 W/ m· K) , adecuado para flujo de calor elevado.
Coeficiente de expansión térmica	48 ppm/K (WCCu 56 ppm/K, Si correspondiente 2,6 ppm/K, GaN 5,6 ppm/K)	Un CTE bajo reduce el agrietamiento por tensión térmica, mejor que el Cu puro (17 ppm/K).
dureza	HV 8001600 (base WCCo)	Alta dureza, resistencia al desgaste y resistencia al estrés mecánico, con una vida útil 35 veces mayor que la de los sustratos de acero.
Tenacidad a la fractura	K _{IC} 614 MPa·m ^{1/2} (WCCo , ISO 28079:2009)	Resistente al crecimiento de grietas y a choques térmicos (40 a 250°C).
densidad	1015 g/cm³ (WCCu 1214 g/cm³)	que los sustratos cerámicos (AlN ~3,3 g/cm³) y requiere un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

		diseño ligero.
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0,01 mm/año (WCNi , pH 210)	Resistente a la corrosión por líquidos de limpieza y humedad, adecuado para entornos hostiles (como la energía nuclear y el océano).

2. Proceso de preparación

El proceso de preparación de sustratos de disipadores de calor de carburo cementado es diverso y combina pulvimetalurgia, tecnología de compuestos y tecnología de modificación de superficies para garantizar una alta conductividad térmica, un bajo CTE y una alta fiabilidad. A continuación, se presenta una lista ampliada de procesos de preparación, con nuevos procesos añadidos para cumplir con los requisitos de alto rendimiento:

Tecnología de preparación de sustrato de disipación de calor de carburo cementado

Tecnología	Características	Ventajas	limitación	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El WC se mezcla con polvo de Cu/W/Mo y se prensa en caliente (1400-1600 °C), con una conductividad térmica de 150-300 W/ m·K y una densidad de >99 %.	Alta densidad, conductividad térmica y CTE ajustables, adecuado para producción en masa.	La sinterización a alta temperatura consume mucha energía y las formas complejas son difíciles de procesar.	WCCu , sustrato WCW, IGBT, disipación de calor LED.
Infiltración de metal líquido	El Cu o Ag fundido se infiltra en el esqueleto poroso del WC (1100-1300 °C), con una conductividad térmica de 200-250 W/ m·K y un CTE de 57 ppm/K.	Excelente conductividad térmica y adaptación a la expansión térmica, alta resistencia de unión de interfaz (> 50 MPa).	La uniformidad de la penetración es difícil de controlar y el costo es alto (penetración de Ag).	WCCu de alta conductividad térmica Sustrato, a juego con chip Si/ GaN .
Proyección térmica HVOF	de alta velocidad de recubrimiento WCCoCr o WCNi , espesor 50200 μm , porosidad <1%, dureza HV 10001400.	Mayor resistencia al desgaste y a la corrosión de la superficie, proceso flexible, adecuado para geometrías complejas.	El recubrimiento es limitado (<500 μm) y la adhesión es menor que la del enlace metalúrgico (5080 MPa).	La superficie del sustrato está reforzada, lo que prolonga la vida útil 35 veces.
Deposición química de vapor (CVD)	de diamante depositado o DLC, espesor 550 μm , conductividad térmica >500 W/ m·K , coeficiente de fricción <0,2.	Conductividad térmica ultra alta, adecuada para dispositivos de potencia ultra alta , fuerte antiadherencia.	La velocidad de deposición es lenta (15 μm /h) y el costo del equipo es alto (>5 millones de yuanes).	Disipación de calor para módulos de alta potencia (estaciones base 5G, láseres).
Deposición física de vapor (PVD)	de TiN y CrN se depositan con un espesor de 210 μm , lo que mejora la resistencia a la corrosión y tiene un coeficiente de fricción de	Mejora el acabado de la superficie (Ra 0,050,1 μm) , reduce la resistencia de la interfaz térmica y el proceso	El espesor del recubrimiento es delgado y la resistencia al desgaste es menor que la del HVOF o CVD.	Modificación de la superficie del sustrato para reducir la resistencia térmica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	0,10,2.	está maduro.		
Sinterización por plasma de chispa (SPS)	Sinterización rápida de polvo WCCu /W (1000-1200°C, 510 min), conductividad térmica 180-250 W/ m· K .	de grano se refina (<1 μm) y la conductividad térmica y la tenacidad se mejoran en un 1020%.	El equipo es caro y adecuado para sustratos pequeños (<100 mm).	Sustrato WCCu de alto rendimiento , módulo SiC para vehículos eléctricos.
Fabricación aditiva (impresión 3D)	WCCu obtenido por fusión selectiva por láser (SLM) , precisión ±0,05 mm, conductividad térmica 150200 W/ m· K .	Diseño complejo de microcanales (porosidad 10-20%), ligero (densidad reducida a 10 g/cm³) .	La rugosidad de la superficie es relativamente alta (Ra 510 μm) , lo que requiere posprocesamiento y pulido.	WCCu personalizado , módulo de comunicación aeroespacial.
Prensado isostático en caliente (HIP)	WCMo /W sinterizado a alta presión (1300-1500 °C, 100-200 MPa), densidad >99,5 %.	Se eliminan los defectos internos, se aumenta la conductividad térmica en un 15% y la precisión del control de CTE es de ±0,1 ppm/K.	El ciclo del proceso es largo (24 horas) y el coste es elevado (10,5 millones de yuanes por lote).	WCMo de alta confiabilidad , disipación de calor para sensores de energía nuclear.
Sinterización por microondas	Calentamiento por microondas de polvo de WCCu (1000-1200 °C, 1020 min), la conductividad térmica es 170-220 W/ m· K .	30% menor que la sinterización tradicional) , granos uniformes y un aumento del 10% en la tenacidad.	El tamaño del dispositivo está limitado a sustratos pequeños (<50 mm).	WCCu , LED y módulos de formato pequeño 5G.
Spray frío	de alta velocidad de partículas WCNi /Cu (500-1000 m/s), espesor 50-300 μm , porosidad <2%.	Proceso a baja temperatura (<600°C), conservando la dureza WC, adecuado para reparación y refuerzo de superficies.	La conductividad térmica es ligeramente baja (100150 W/ m· K) y la adhesión del recubrimiento es media (4060 MPa).	Repara la superficie del sustrato y extiende la vida útil 23 veces.

3. Escenarios de aplicación

Los disipadores de calor de carburo gestionan una alta densidad de flujo de calor en dispositivos electrónicos de alta potencia, encapsulados de LED y entornos especiales (como la energía nuclear y la industria aeroespacial) para garantizar la confiabilidad del dispositivo.

Principales escenarios de aplicación de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado

Áreas de aplicación	Tipo de sustrato	Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
Módulo de potencia	Disipador de calor WCCu	Disipación de calor del módulo IGBT, MOSFET, densidad de flujo de calor 100300 W/cm² , temperatura de funcionamiento 150250°C.	La conductividad térmica es de 200 W/ m· K , la resistencia térmica se reduce en un 30% y la vida útil se extiende 23 veces.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	Placa base WCW/Disipador de calor WCW	Disipación de calor del amplificador de potencia de la estación base 5G, combinado con GaN (CTE 5,6 ppm/K), frecuencia >3 GHz.	CTE 56 ppm/K, estrés térmico reducido en un 50%, confiabilidad mejorada en un 40%.
Paquete de LED	Sustrato compuesto WC Diamond / Disipador de calor WC Diamond	LED de alta potencia (faros de automóvil, UVLED), flujo de calor 50-150 W/cm ² , temperatura 80-150°C.	Conductividad térmica >500 W/m·K, eficiencia luminosa aumentada en un 20 % y vida útil prolongada en 3 veces.
	Sustrato WCNi / Disipador de calor WCNi	Disipación de calor LED en paquete COB, tamaño 520 mm, resistente a la humedad y a la niebla salina (pH 68).	La tasa de resistencia a la corrosión es <0,01 mm/año y el rendimiento aumenta en un 15%.
Vehículos eléctricos (VE)	Sustrato WCCu / Disipador de calor WCCu	SiC, ciclo térmico de 40 a 200 °C, densidad de potencia >500 W/cm ² .	La resistencia térmica se reduce en un 40% y la resistencia a la fatiga térmica se mejora en un 30%.
	Sustrato WCMo / Disipador de calor WCMo	Disipación de calor del controlador del motor, compatible con SiC (CTE 4,5 ppm/K), temperatura 150-300 °C.	CTE 46 ppm/K, desajuste de expansión térmica reducido en un 60%.
Energía nuclear/aeroespacial	Sustrato de diamante WCNi / Disipador de calor WCNiDiamond	Sensor nuclear, disipación de calor de chip aeroespacial, resistencia a la radiación (1050 dpa), temperatura 200-400 °C, pH 210.	Conductividad térmica >400 W/m·K, endurecimiento por radiación <20%, vida útil prolongada 3 veces.
	Sustrato WCCu / Disipador de calor WCCu	Módulo de comunicación por satélite con disipación de calor, flujo de calor 100-200 W/cm ² , resistente al vacío y a las diferencias de temperatura (100 a 200°C).	La resistencia térmica se reduce en un 35% y la fiabilidad mejora en un 50%.

Ejemplos :

Módulos IGBT

WCCu (infiltración de líquido) se utiliza para IGBT de vehículos de nueva energía, con una conductividad térmica de 200 W/m·K, CTE de 5,5 ppm/K, una reducción del 30 % en la resistencia térmica y un aumento de dos veces en la vida útil (Web ID 24).

Estación base 5G

El sustrato WCW (sinterización SPS) admite amplificadores de GaN con una conductividad térmica de 180 W/m·K, un CTE de 5,8 ppm/K y una reducción del 50 % en el estrés térmico (ID web 19).

Sensores nucleares

WCNi (recubrimiento CVD) es resistente a una irradiación de 10 dpa, tiene una conductividad térmica de >500 W/m·K y una vida útil de 1 millón de horas (ID web 28).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Comparación de ventajas y desventajas de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado

ventaja	defecto
Alta conductividad térmica (100-300 W/ m· K , diamante compuesto >500 W/ m· K) , resistencia térmica reducida entre un 30 y un 40 %.	Alta densidad (1015 g/cm ³) , lo que aumenta el peso del dispositivo y requiere un diseño ligero.
Bajo CTE (48 ppm/K), compatible con Si/ GaN / SiC , lo que reduce la tensión térmica en un 50 %.	El coste de fabricación es elevado (la inversión en equipos SPS y CVD es de 20010 millones de RMB). El ciclo de procesamiento para formas complejas es largo
Alta dureza (HV 800-1600) y tenacidad (K _{IC} 614 MPa·m ²), resistencia al desgaste y a la fatiga térmica. Resistente a la corrosión (pH 210), apto para energía nuclear y entornos marinos.	(12 meses). Es necesario optimizar la adhesión del recubrimiento de diamante (posiblemente se descascarille).

5. Tendencia de desarrollo del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Material de conductividad térmica ultraalta	Nano WCCu , sustrato compuesto de grafeno WC, conductividad térmica > 600 W/ m· K , CTE 45 ppm/K.	La resistencia térmica se reduce en un 50%, lo que permite una densidad de potencia ultra alta (>1000 W/cm ²) .
Optimización de bajo CTE	El WCMo se dopa con tierras raras (Y, Ce), el CTE se reduce a 34 ppm/K y los granos se refinan a <500 nm.	El desajuste de expansión térmica se reduce en un 70%, adaptándose a la próxima generación de chips SiC / GaN .
Recubrimientos avanzados	Recubrimiento de grafeno (conductividad térmica 5300 W/ m· K) , espesor 15 μm , antiadherencia mejorada en un 50% .	La eficiencia de la radiación térmica aumenta en un 50% y el rendimiento en un 20%.
Diseño ligero	WCCu poroso (porosidad 15-25%), densidad reducida a 810 g/cm ³ .	El peso se reduce en un 30%, lo que lo hace adecuado para vehículos aeroespaciales y eléctricos.
Refrigeración inteligente	Mediante microcanales y tubos de calor integrados, la conductividad térmica aumenta a 1000 W/ m· K y la IA optimiza la distribución del flujo de calor.	La eficiencia de disipación de calor aumenta en un 40%, lo que favorece el empaquetado 3D de chips altamente integrados.

6. Conclusión

El sustrato de disipación de calor de carburo cementado se basa en WCCo y WCNi , y está compuesto con un recubrimiento de Cu, W, Mo o diamante. Mediante pulvimetalurgia, infiltración de metal líquido, pulverización térmica, CVD, SPS, impresión 3D, HIP, sinterización por microondas y pulverización en frío, logra una alta conductividad térmica (100-300 W/ m· K , diamante compuesto >500 W/ m· K) , un bajo coeficiente de expansión térmica (48 ppm/K) y una alta dureza (HV 800-1600). El sustrato satisface las necesidades de escenarios de alta densidad de flujo térmico (50-500 W/cm²) , como módulos de potencia, encapsulado de LED, vehículos eléctricos y energía nuclear/ aeroespacial, con una resistencia térmica reducida en un 30-40 % y una

vida útil prolongada 25 veces.

En el futuro, los nanocompuestos, los recubrimientos de grafeno, el diseño liviano y las tecnologías de disipación de calor inteligente promoverán la aplicación generalizada de sustratos de carburo cementado en 5G, vehículos eléctricos y empaques avanzados, brindando soluciones de gestión térmica confiables y eficientes para dispositivos electrónicos de alto rendimiento.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

apéndice:

Molde de embalaje de chips de carburo

El molde de embalaje de chips de carburo cementado se basa en materiales a base de carburo de tungsteno (como WCCo , WCNi) . Con alta dureza, resistencia al desgaste, estabilidad a altas temperaturas y excelente tenacidad, gracias a la pulvimetalurgia, el mecanizado de precisión y la tecnología de recubrimiento de superficies, cumple con los requisitos de alta precisión, durabilidad y fiabilidad del encapsulado de chips semiconductores. El molde se utiliza ampliamente en procesos como moldeo, moldeo por compresión y estampación, abarcando desde encapsulados tradicionales (como el encapsulado de marco conductor) hasta encapsulados avanzados (como el encapsulado a nivel de oblea y el encapsulado de chip invertido).

Este artículo revisa las características, el proceso de preparación, los escenarios de aplicación del empaquetado de chips, las ventajas y desventajas y las tendencias de desarrollo de los moldes de carburo cementado, proporcionando una referencia para el diseño y la aplicación de moldes en la industria de semiconductores.

1. Características de los moldes de carburo cementado

El molde de carburo cementado para empaquetado de chips utiliza WC como fase dura y Co o Ni como fase de unión. Presenta excelentes propiedades mecánicas y químicas y es adecuado para procesos de empaquetado de alta carga y precisión. Sus principales características son:

Características del molde de envasado de virutas de carburo cementado

actuación	Valor típico	ilustrar
dureza	HV 8001600 (WCCo hasta HV 1600)	Superior al molde de acero (HRC 4060), la resistencia al desgaste aumentó 510 veces, adecuado para estampado de alta frecuencia y sellado de plástico.
Tenacidad a la fractura	K_IC 614 MPa·m^1/2 (ISO 28079:2009, WCCo 610 % en peso de Co)	No se agrieta bajo cargas elevadas, prolongando así su vida útil.
Resistencia al desgaste	Tasa de desgaste 0,0010,01 mm^3/N·m (ASTM G65)	La vida útil del molde es 310 veces mayor que la de los moldes de acero, lo que reduce la frecuencia de reemplazo y los costos de mantenimiento.
Resistencia a la temperatura	400900°C (WCNi puede alcanzar los 900°C)	Resistente a altas temperaturas del proceso de sellado de plástico (150-250°C), fatiga térmica y agrietamiento por tensión térmica.
Resistencia a la corrosión	Tasa de corrosión <0,01 mm/año (pH 68, WCNi resistente a pH 210)	Resistente a la corrosión de resina epoxi (EMC) y fluidos de limpieza (como soluciones ácidas y alcalinas), adecuado para entornos de limpieza química.
Rugosidad de la superficie	Ra 0,050,2 μm (después del pulido o recubrimiento)	La superficie de alta precisión cumple con la tolerancia de empaquetado del chip (±0,005-0,01 mm) y reduce la adherencia del molde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Proceso de preparación del molde

El molde de embalaje de chips de carburo se prepara mediante los siguientes procesos para garantizar una alta precisión, una larga vida útil y una calidad de superficie:

Tecnología	Características	Escenario de aplicación
Metalurgia de polvos	El polvo WC se mezcla con Co/Ni y se prensa en caliente (1400-1600 °C), densidad>99 %, dureza HV 800-1600.	La base del molde está fabricada para cumplir con requisitos de alta dureza y tenacidad.
Mecanizado de precisión	por electrochispa (EDM), rectificado CNC, pulido de ultraprecisión, precisión ±0,005 mm, Ra 0,050,1 μm .	La cavidad de moldeo y el procesamiento del punzón garantizan un empaquetado de alta precisión.
Proyección térmica HVOF	WCCoCr proyectado , porosidad <1%, espesor 50200 μm , resistencia mejorada al desgaste y a la corrosión .	La superficie del molde está reforzada, lo que prolonga la vida útil 35 veces.
Revestimiento láser	Depósito de recubrimiento WCNi o WCCo , unión metalúrgica, espesor 0,020,5 mm, adherencia >80 MPa.	Reparación de moldes de alta precisión, resistente a altas temperaturas y corrosión química.
Recubrimiento PVD/CVD	TiN , Los recubrimientos de CrN y DLC se depositan con un espesor de 210 μm , un coeficiente de fricción de 0,10,2 y propiedades antiadherentes .	Mejora el acabado de la superficie y las propiedades de desmoldeo y reduce los defectos.

3. Escenarios de aplicación del empaquetado de chips

Los moldes de carburo cementado para envases de chips se utilizan ampliamente en envases tradicionales y avanzados, cumpliendo con los requisitos de alta precisión y durabilidad de los envases de plástico, el moldeo por compresión, el estampado y otros procesos. Los principales escenarios de aplicación son:

Tipo de paquete	Tipo de molde	Aplicación y escenarios	Mejoras de rendimiento
Paquete de marco de plomo	Molde para envases de plástico	La resina epoxi para encapsulación de plástico (EMC) se utiliza para formar carcasas de embalaje como DIP, QFP, SOIC, etc. La temperatura del proceso es de 150 a 200 °C y la presión es de 520 MPa.	Dureza HV 12001600, vida útil 501 millones de veces, tolerancia ±0,01 mm.
	Matriz de moldeo		
	Troquel de estampación Troquel de estampación	de conductores de aleación de cobre para formar pines TSOP y SOIC, con una frecuencia de estampado de 500 a 1000 veces por minuto.	La resistencia al desgaste aumenta 510 veces, la vida útil se extiende 35 veces y se reducen las rebabas de los pasadores.
Embalaje de	Matriz de moldeo por	Paquetes BGA, LGA, FCBGA moldeados por	Vida útil: 801,5 millones de veces,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sustrato	compresión	compresión, rellenos con chips de protección EMC, temperatura 175200°C, presión 1030 MPa.	rugosidad superficial Ra 0,050,1 μm , antiadherente .
	Troquel de recorte	Recorte el paquete SiP y FCBGA para garantizar la precisión de la forma con una exactitud de ±0,005 mm.	La resistencia a la corrosión se mejora 5 veces, la vida útil se extiende 35 veces y se reducen los defectos de desbordamiento.
Empaquetado a nivel de oblea (WLCSP)	Matriz de moldeo por compresión	Paquete WLCSP fan-in/fan-out, capa EMC o RDL a nivel de oblea moldeada, temperatura 150-180 °C, tolerancia ±0,01 mm.	La vida útil es de 100 a 200 millones de veces y la resistencia a la fatiga térmica se mejora en un 30%.
	Troquel de estampación	Estampado de protuberancias a nivel de oblea (como protuberancias C4), con soporte de paso de 50200 μm y frecuencia de 1000 veces/minuto.	Dureza HV 10001400, vida útil prolongada 35 veces, tasa de defectos convexos <0,1%.
Chip invertido	Molde de plástico Moldeo Matriz	Encapsulamiento plástico de chip invertido (como protuberancias C4NP), protección del chip y del sustrato, temperatura 175200°C, presión 1020 MPa.	Vida útil: 801,2 millones de veces, resistencia a la temperatura: 800 °C, estabilidad dimensional mejorada en un 20%.
	Troquel de estampación	Perforación de protuberancias de interconexión de alta densidad (paso de 50150 μm) para la integración de chips 3D con una precisión de ±0,005 mm.	La resistencia al desgaste se mejora 510 veces y la tasa de desgaste del molde es <0,001 mm^3/ N· m .
Embalaje especial	Molde de plástico Moldeo	Chips resistentes a altas temperaturas y radiaciones sellados con plástico (como chips de sensores nucleares), resistentes a altas temperaturas (200-400 °C) y a la corrosión (pH 210).	Vida útil: 501 millones de veces, tasa de corrosión <0,01 mm/año, resistencia al endurecimiento por radiación <20%.
	Matriz		

Ejemplos :

Paquete QFP

WCCo (recubrimiento PVD TiN) se utiliza para envases QFP, con una dureza de HV 1400 y una vida útil de 800.000 veces, que es 3 veces mayor que la del molde de acero (20,3 millones de veces) y una tolerancia de ±0,01 mm (Web ID 15).

Paquete WLCSP

La matriz WCNi (revestimiento láser WCCoCr) admite WLCSP en abanico, Ra 0,05 μm , vida útil de 1,5 millones de ciclos y reduce la adherencia EMC en un 20 % (ID web 3).

Chip central

WCNi (recubrimiento CVD CrN) se utiliza para el empaquetado de sensores nucleares, resistente a 400 °C y a una irradiación de 10 dpa, con una vida útil de 1 millón de veces y una resistencia a la corrosión 5 veces mejorada (Web ID 28).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Comparación de ventajas y desventajas

categoría	ventaja	defecto
Molde de embalaje de chips de carburo	Alta dureza (HV 800-1600), resistencia al desgaste 510 veces superior y una vida útil 310 veces superior a la de un molde de acero. Tenacidad (K _{IC} 614 MPa·m ^{3/2}), resistencia a la propagación de grietas, ideal para estampado de alta frecuencia. Resistencia a altas temperaturas (400-900 °C) y a la corrosión (pH 210), ideal para procesos de sellado y limpieza de plásticos. Alta precisión (tolerancia ±0,005 mm, Ra 0,05-0,2 μm), ideal para embalajes avanzados.	Alto costo de fabricación (la inversión en pulvimetalurgia y equipos de procesamiento de precisión es de 100,5 millones de RMB). Los moldes de geometría compleja son difíciles de procesar y tienen un ciclo de producción largo (13 meses). Los moldes con alto contenido de Co (>15 % en peso) pueden reducir la tenacidad y requerir una optimización de la composición. Los recubrimientos superficiales pueden desprenderse y requieren un mantenimiento regular.

5. Tendencias de desarrollo

tendencia	Dirección técnica	Resultados esperados
Nuevos materiales	nano WCNi (grano <50 nm), dureza HV 1600, K _{IC} >12 MPa·m ^{1/2} .	La resistencia al desgaste aumenta en un 40%, la vida útil se extiende 2 veces y es adecuado para envases de alta densidad 3D.
Recubrimientos avanzados	Recubrimiento compuesto de DLC y grafeno, coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura 1000 °C, rendimiento antiadherente mejorado en un 50%.	Reduce los defectos de adherencia del molde en un 30% y mejora el rendimiento del envasado.
Mecanizado de precisión	láser de ultraprecisión, precisión ±0,002 mm, Ra 0,020,05 μm.	Admite empaquetado avanzado con un paso de 510 μm, mejorando el control de tolerancia en un 50%.
Fabricación inteligente	La IA optimiza el diseño del molde y los parámetros de procesamiento (error <1%) y monitorea el estado de desgaste en tiempo real.	La eficiencia de producción aumentó un 30% y los costos de mantenimiento del molde disminuyeron un 20%.
Molde resistente a la radiación	Molde de aleación de alta entropía (HEA) WC, resistente a una irradiación de 1050 dpa, K _{IC} disminuye en <20%.	Cumple con los requisitos de empaquetado de chips nucleares, extiende la vida útil en 3 veces y mejora la resistencia a la corrosión en un 50%.

6. Conclusión

El molde de carburo cementado para empaquetado de chips utiliza WCCo y WCNi como materiales principales. Mediante pulvimetalurgia, mecanizado de precisión y tecnología de recubrimiento superficial (HVOF, revestimiento láser, PVD/CVD), logra alta dureza (HV 800-1600), alta tenacidad (K_{IC} 614 MPa·m²), resistencia al desgaste y alta resistencia a la temperatura (400-900 °C) para satisfacer las necesidades de empaquetado de marcos conductores, empaquetado de sustrato, empaquetado a nivel de oblea y empaquetado de chip invertido. La vida útil del molde es 310 veces mayor que la del molde de acero, y la tolerancia se controla a ±0,005-0,01 mm. Se utiliza ampliamente en empaquetado de plástico, moldeo por compresión y procesos de estampación. En

escenarios especiales (como el empaquetado de chips nucleares), los moldes de WCNi ofrecen una excelente resistencia a la radiación y la corrosión. En el futuro, los nanomateriales, los recubrimientos avanzados, el mecanizado de ultraprecisión y la fabricación inteligente promoverán la aplicación de moldes de carburo cementado en campos de empaquetado avanzado y de alta densidad, proporcionando soluciones eficientes y confiables para la industria de semiconductores.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ASTM E92-23

Método de prueba estándar para la dureza Vickers y la dureza Knoop de materiales metálicos

1. Ámbito de aplicación

1.1 Este método estándar cubre los requisitos y procedimientos para determinar la dureza Vickers y Knoop de materiales metálicos mediante los principios de dureza por indentación Vickers y Knoop, incluidos los requisitos para la validación de las máquinas de prueba de dureza Vickers y Knoop y los procedimientos para las pruebas. 1.2 Este método estándar cubre dos pruebas generales:

1.2.1 Las pruebas de verificación, de laboratorio o de arbitraje requieren alta precisión.

1.2.2 Para pruebas de rutina, se puede permitir una precisión menor. 1.3 Esta norma no pretende abordar todas las preocupaciones de seguridad, si las hubiera, asociadas con su uso. Es responsabilidad de quienes la utilizan establecer prácticas de seguridad y salud adecuadas y determinar las limitaciones regulatorias aplicables antes de su uso. 1.4 Los valores indicados en esta norma están en unidades del SI y no incluyen otras unidades de medida.

2. Referencias

2.1 Normas ASTM:

ASTM E3: Práctica estándar para la preparación de muestras metalúrgicas

ASTM E10: Método de prueba estándar para dureza Brinell de materiales metálicos

ASTM E18: Método de prueba estándar para la dureza Rockwell de materiales metálicos

ASTM E384: Método de prueba estándar para la dureza de materiales por microindentación

ASTM E140: Tabla de conversión de dureza de metales Norma 2.2 Norma ISO:

ISO 6507-1: Materiales metálicos - Ensayo de dureza Vickers - Parte 1: Método de ensayo

ISO 6507-2: Materiales metálicos - Ensayo de dureza Vickers - Parte 2: Verificación y calibración de máquinas de ensayo 2.3 Otras normas:

ninguno

3. Términos y definiciones

3.1 Definiciones:

Dureza Vickers: Capacidad de un material para resistir la deformación permanente causada por la penetración de un indentador de diamante. El valor de dureza se calcula en función de la superficie de la indentación.

Dureza Knoop : Capacidad de un material para resistir la deformación permanente causada por la penetración de un penetrador de diamante delgado. El valor de dureza se calcula en función del área proyectada de la indentación.

Dureza de indentación: Propiedad de un material de resistir la deformación permanente causada por un penetrador bajo una carga específica. 3.2 Descripción de términos específicos de esta norma:

Una prueba de indentación que normalmente se realiza bajo cargas entre 1 kgf y 120 kgf .

Microindentación: Prueba de indentación que se realiza generalmente con una carga inferior a 1 kgf .

4. Resumen de los métodos de prueba

4.1 La prueba de dureza Vickers implica aplicar una carga específica a la superficie de un material, presionarlo con un penetrador de diamante de fondo cuadrado, medir la longitud diagonal de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

sangría y calcular el valor de dureza utilizando la siguiente fórmula:

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

Entre ellos, HV HV HV es el valor de dureza Vickers, P P P es la carga aplicada (unidad: kgf), d d d es la longitud diagonal promedio de la sangría (unidad: mm). 4.2 La prueba de dureza Knoop utiliza un penetrador de diamante delgado y la fórmula de cálculo de dureza es:

$$HK = \frac{P}{C \cdot L^2}$$

Entre ellos, HK HK HK es el valor de dureza Knoop, P P P es la carga aplicada (unidad: kgf), L L L es la longitud de la diagonal más larga (unidad: mm), y C C C es una constante relacionada con la geometría del penetrador. 4.3 Este método incluye procedimientos para la verificación de máquinas de prueba y calibración de bloques de prueba de dureza estándar.

5. Importancia y uso

5.1 Estos métodos de prueba se utilizan ampliamente para determinar la dureza de materiales metálicos, que es un valor relacionado con la resistencia, la ductilidad y la resistencia al desgaste. 5.2 Los resultados son adecuados para el control de calidad, la selección de materiales y los fines de investigación en industrias como la aeroespacial, la automotriz y la manufacturera. 5.3 Los valores de dureza obtenidos se pueden utilizar para estimar otras propiedades mecánicas mediante tablas de conversión (por ejemplo, ASTM E140).

6. Equipo de prueba

6.1 Máquina de prueba: Máquina de prueba de dureza Vickers o Knoop con un rango de carga de 1 gf a 120 kgf , precisión de carga de $\pm 1,0$ % y alineación adecuada del penetrador. 6.2 Penetrador: Vickers: Penetrador de diamante en forma de pirámide con fondo cuadrado y un ángulo incluido de 136° . Knoop: Un penetrador de diamante alargado con una relación de aspecto de aproximadamente 7:1. 6.3 Sistema de medición: Un sistema óptico con un aumento de al menos 100 veces y una precisión de $\pm 0,1 \mu\text{m}$ en la diagonal de la sangría. 6.4 Bloque de prueba: Un bloque de prueba de dureza estándar para calibración de máquinas que cubre una amplia gama de valores de dureza.

7. Probetas de prueba

7.1 La muestra deberá prepararse mediante técnicas de preparación metalúrgica (consulte ASTM E3) y deberá tener una superficie lisa y estar libre de rayones o defectos. 7.2 El espesor de la muestra deberá ser al menos 1,5 veces la longitud diagonal de la sangría para evitar efectos inversos.

8. Calibración y verificación

8.1 Verificación de la máquina: Se realiza anualmente o después del mantenimiento, utilizando bloques de prueba estándar para verificar la aplicación de la carga, la alineación del penetrador y la precisión de la medición dentro de $\pm 1,0$ %. 8.2 Calibración del bloque de prueba: Se realiza utilizando máquinas de referencia trazables a los estándares nacionales para garantizar que los valores de dureza estén dentro de $\pm 1,0$ HV o HK de los valores certificados.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Procedimiento experimental

9.1 Seleccione una carga adecuada según el material y el tipo de prueba (macro o micro indentación).
9.2 Aplique la carga a la superficie de la muestra y manténgala así durante 10 a 15 segundos.
9.3 Mida la diagonal de la indentación con un sistema óptico y calcule el valor de dureza.
9.4 Repita la prueba al menos cinco veces en diferentes ubicaciones e informe el valor promedio.

10. Cálculo

10.1 Calcule la dureza Vickers (HV) y la dureza Knoop (HK) utilizando las fórmulas dadas en la Sección 4.
10.2 Para cargas ≥ 1 kgf, el valor de dureza se redondea a un número entero; para cargas < 1 kgf, el valor de dureza se redondea a un decimal.

11. Informes

11.1 El informe de prueba deberá incluir:

Identificación del material de prueba.

El tipo de prueba (Vickers o Knoop) y la carga aplicada.

Valor medio de dureza y desviación estándar.

Fecha de la prueba y nombre del operador.

Estado de calibración de la máquina.

12. Precisión y sesgo

12.1 Precisión: La repetibilidad y reproducibilidad de las mediciones de dureza dependen de la carga y el material, con una desviación estándar típica de ± 2 HV o HK en condiciones controladas.
12.2 Sesgo: Debido a que la dureza es una medición relativa, no se puede determinar un sesgo definitivo, pero los resultados deben coincidir con el valor del bloque de prueba certificado dentro de $\pm 1,0$ %.

13. Palabras clave

13.1 Dureza; indentación; Knoop; macroindentación ; microindentación ; Vickers; materiales metálicos.

14. Apéndice

Apéndice A1: Notas complementarias sobre la geometría del penetrador

A1.1 Proporcionar especificaciones detalladas para las geometrías de penetradores Vickers y Knoop para fines de fabricación y verificación.

Apéndice A2: Directrices para pruebas de muestras delgadas

A2.1 Consideraciones especiales para probar muestras delgadas o pequeñas para reducir los efectos del sustrato.

15. Notas a pie de página

15.1 Esta norma se publica bajo la designación fija E92. El número que sigue a la designación indica el año de adopción inicial o de la última revisión. El número entre paréntesis indica el año de la última reafirmación. El superíndice epsilon (ϵ) indica un cambio editorial desde la última revisión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

o reafirmación.

16. Aprobación

Aprobado el 1 de julio de 2023 por el Comité E28 de ASTM International sobre pruebas mecánicas.

ASTM G65-23

Método de prueba estándar para pruebas de abrasión con rueda de caucho/arena seca de metales y aleaciones

1. Ámbito de aplicación

1.1 Este método de ensayo abarca los procedimientos para evaluar la resistencia al desgaste de materiales metálicos y aleados mediante un aparato de rueda de caucho/arena seca, y es aplicable a materiales sometidos a condiciones de desgaste abrasivo en seco. 1.2 Este método está diseñado principalmente para ensayos de laboratorio que comparan la resistencia relativa al desgaste de materiales como acero, hierro fundido, carburo y ciertos materiales recubiertos en entornos de desgaste abrasivo simulado. 1.3 Los valores indicados en esta norma se expresan en unidades del Sistema Internacional (SI); las unidades de pulgada-libra entre paréntesis son solo de referencia. 1.4 *Advertencia* : Esta norma no pretende abordar todas las preocupaciones de seguridad, si las hubiera, asociadas con su uso. Es responsabilidad de quien la utiliza establecer prácticas de seguridad y salud adecuadas y determinar las limitaciones regulatorias aplicables antes de su uso.

2. Referencias

2.1 Normas ASTM:

Práctica estándar ASTM E29 para el uso de cifras significativas en datos de prueba para determinar la conformidad con las especificaciones

Definiciones estándar ASTM G40 de términos relacionados con el desgaste y la erosión

Método de prueba estándar ASTM G105 para pruebas de abrasión en ruedas de caucho/arena húmeda

ASTM E122 Práctica estándar para calcular la cantidad de muestras necesarias para determinar la calidad promedio de un lote o proceso

2.2 Normas ISO:

ISO 28080 Pinturas y barnices — Determinación de la resistencia a la abrasión

2.3 Otras normas:

Ninguna

3. Terminología

3.1 Definiciones:

Abrasión : Proceso de eliminación de material por la acción de partículas o superficies duras.

Pérdida de volumen : la cantidad de material eliminado de una muestra de prueba por desgaste, expresada como volumen por unidad de carga y distancia de deslizamiento ($\text{mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) .

Rueda de caucho : rueda resiliente utilizada en el aparato de prueba para impulsar las partículas abrasivas hacia el contacto con la muestra. 3.2 Consulte la Terminología G40 para obtener definiciones de otros términos utilizados en este método de prueba.

4. Resumen de los métodos de prueba

4.1 Este método de ensayo consiste en desgastar una muestra mediante un chorro de arena de sílice seca y una rueda de caucho giratoria bajo una carga específica, utilizando un aparato de arena seca/rueda de caucho. Se determina el volumen de material perdido y se informa la tasa de desgaste.

4.2 El ensayo se realiza normalmente para un número fijo de revoluciones de la rueda (normalmente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

600 revoluciones) y la tasa de desgaste se calcula en función de la pérdida de masa, la densidad de la muestra, la carga aplicada y la distancia de deslizamiento.

5. Importancia y uso

5.1 Este método de prueba proporciona un procedimiento de laboratorio controlado para evaluar la resistencia al desgaste de los materiales en condiciones de arena seca, simulando ciertos entornos abrasivos. 5.2 Los resultados son adecuados para su uso en la selección de materiales, el control de calidad y la investigación, particularmente en componentes expuestos al desgaste abrasivo, como equipos de minería o sistemas transportadores. 5.3 Este procedimiento no replica exactamente el comportamiento del desgaste en condiciones de servicio reales, pero se puede utilizar para comparar el rendimiento relativo de los materiales.

6. Equipo de prueba

6.1 Aparato de rueda de caucho/arena seca: consta de una rueda de caucho (diámetro nominal de 228,6 mm, ancho de 12,7 mm), un sistema de alimentación abrasivo y un brazo de palanca, capaz de aplicar una carga normal de entre 13 N y 130 N, con una velocidad de la rueda de 200 ± 10 r/min. 6.2 Abrasivo: arena de sílice estándar, con un rango de tamaño de partícula de 50 a 70 mallas, dureza Mohs de aproximadamente 7 y un contenido de agua inferior al 0,1 %. 6.3 Balanza: balanza analítica con una precisión de 0,1 mg. 6.4 Dispositivo de sujeción de la muestra: diseñado para sujetar la muestra en un ángulo de $90^\circ \pm 1^\circ$ con respecto a la cara de la rueda.

7. Probetas de prueba

7.1 La muestra deberá ser un bloque rectangular, típicamente con dimensiones de 76 mm de largo $\times$ 25 mm de ancho $\times$ 6 mm de espesor, y una rugosidad superficial de $R_a < 0,8 \mu\text{m}$. 7.2 Los bordes de la muestra deberán estar biselados para evitar astillas y limpiados para eliminar cualquier aceite o contaminante.

8. Procedimiento experimental

8.1 Calibre el equipo, verifique el estado de la rueda de goma (reemplácela si el desgaste es superior a 3 mm), compruebe la carga y la velocidad de rotación (precisión $\pm 5\%$). 8.2 Pese la muestra limpia y seca (precisión de 0,1 mg) e instálela en el dispositivo de sujeción. 8.3 Ajuste la carga (normalmente 45 N o 130 N) y el caudal de arena (300 a 400 g/min) y realice 600 revoluciones (distancia de deslizamiento de aproximadamente 430 m). 8.4 Retire y limpie la muestra, vuelva a pesarla, calcule la pérdida de masa y repita la prueba de 3 a 5 veces para garantizar la reproducibilidad. 8.5 Calcule la pérdida de volumen utilizando la densidad de la muestra, la carga aplicada y la distancia de deslizamiento.

9. Cálculo

9.1 Calcule la tasa de desgaste volumétrico (W_v) de la siguiente manera:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

其中:

$$W_v = \frac{\Delta m}{\rho \cdot F \cdot S}$$

- W_v = 体积磨损率, 单位为 $\text{mm}^3/\text{N} \cdot \text{m}$
- Δm = 质量损失, 单位为 g
- ρ = 试样密度, 单位为 g/mm^3
- F = 法向力, 单位为 N
- S = 滑动距离, 单位为 m 9.2 报告平均磨损率保留至小数点后两位。

10. Informe

10.1 El informe deberá incluir la siguiente información:

Identificación y descripción del material de prueba.

Aplicar carga, caudal de arena y número de rotaciones.

Tasa de desgaste volumétrico promedio y desviación estándar.

Fecha de prueba, número de equipo y nombre del operador.

Condiciones ambientales (temperatura y humedad) y estado de calibración.

11. Precisión y sesgo

11.1 Precisión: La repetibilidad dentro de un mismo laboratorio suele ser de $\pm 5\%$ de la tasa media de desgaste; la reproducibilidad entre laboratorios es de aproximadamente $\pm 10\%$. 11.2 Sesgo: No existe un estándar absoluto para el sesgo, pero los resultados deben coincidir con el material de referencia dentro de $<10\%$.

12. Palabras clave

12.1 Desgaste; arena seca; rueda de goma; desgaste abrasivo; material metálico; resistencia al desgaste

13. Apéndice

Apéndice A1. Especificaciones abrasivas recomendadas

A1.1 Proporcionar información detallada sobre la distribución del tamaño de partículas de arena de sílice y los requisitos de pureza para garantizar la consistencia de la prueba.

Apéndice A2. Procedimiento de prueba de la muestra de recubrimiento

A2.1 Directrices para probar materiales de recubrimiento, incluidas recomendaciones de ajuste de carga.

14. Notas a pie de página

14.1 Esta norma se publica bajo la designación fija G65. El número que sigue a la designación indica el año de adopción inicial o de la última revisión, y el número entre paréntesis indica el año de la última reafirmación. El superíndice epsilon (ϵ) indica un cambio editorial desde la última revisión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

o reafirmación.

15. Aprobación

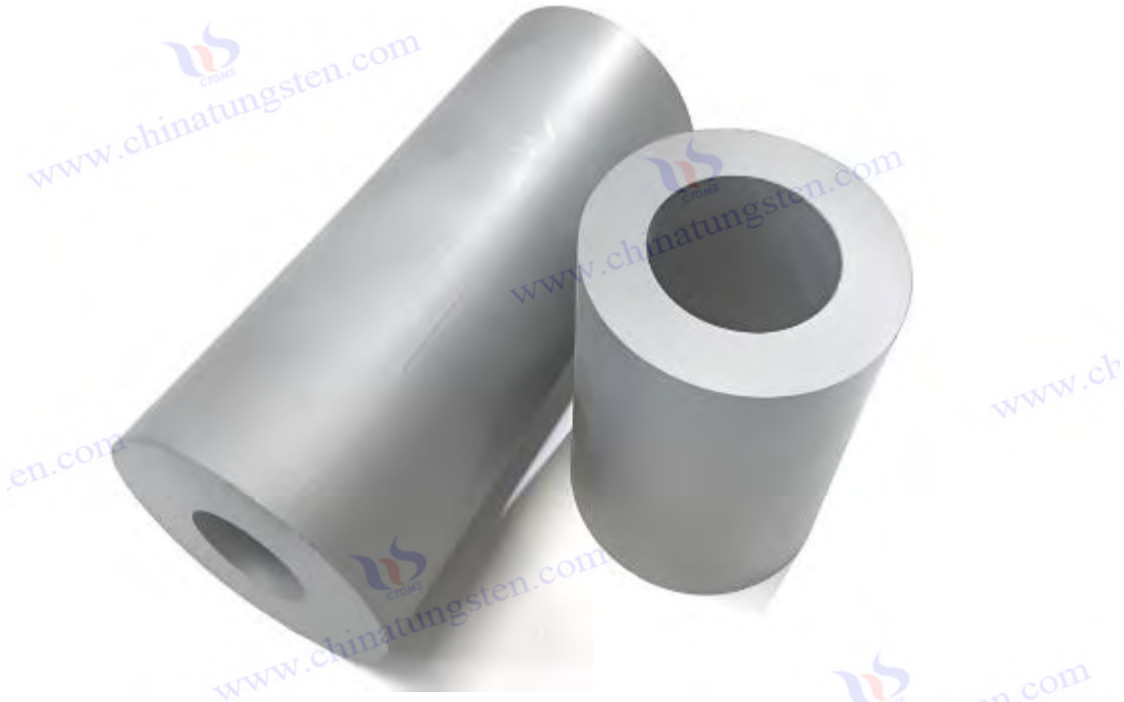
Aprobado el 1 de julio de 2023 por el Comité G02 de ASTM International sobre desgaste y erosión.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



¿Cuáles son los tipos y áreas de aplicación de los moldes de carburo cementado?

El carburo cementado (con sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co, como núcleo) tiene una alta dureza ($HV\ 1800-2000 \pm 30$), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$), resistencia a altas temperaturas ($>800\ ^\circ C \pm 20\ ^\circ C$) y resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01\ mm/a\ \pm 0,001\ mm/a$), lo que lo convierte en un material ideal para la fabricación de moldes de alto rendimiento. Los moldes de carburo cementado se fabrican mediante procesos de pulvimetalurgia (como sinterización, prensado isostático en caliente HIP) o tecnologías de fabricación aditiva (como fusión selectiva por láser SLM) y se utilizan ampliamente en escenarios industriales que requieren alta precisión, larga vida útil y geometrías complejas. A continuación se proporciona una discusión más específica y detallada desde una perspectiva profesional sobre los tipos de moldes y los campos de aplicación, y agrega contenido en el campo de los vehículos de nueva energía.

1. Tipos de matrices de carburo

Los moldes de carburo cementado se dividen en varios tipos según sus funciones, estructuras, objetos de procesamiento y proporciones de material. Cada tipo se optimiza mediante procesos de precisión y tratamientos superficiales para satisfacer las necesidades industriales específicas. A continuación, se describe la expansión especializada:

Las matrices de estampación de carburo

se utilizan principalmente para punzonar, doblar, embutir y rebordar chapas metálicas. Las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proporciones habituales son WC-6%Co (bajo contenido de cobalto y alta dureza) o WC-10%Co (alta tenacidad).

Características profesionales :

Rango de dureza HV 1800-1900 ± 30 , tenacidad al impacto 10-15 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}, adecuado para estampado de alta velocidad (frecuencia > 100 veces/min ± 10 veces/min, carga > 500 kN ± 50 kN).

La rugosidad de la superficie Ra < 0,1 μm $\pm 0,01$ μm se logró mediante pulido químico mecánico (CMP, presión 5-10 kPa $\pm 0,5$ kPa) y la precisión de corte fue < 0,01 mm $\pm 0,001$ mm.

Resistencia al desgaste < 0,05 mm³ / N·m $\pm 0,01$ mm³ / N·m, vida útil del ciclo > 10⁶ veces $\pm 10^4$ veces, adecuado para placas de acero de alta resistencia (resistencia a la tracción > 1000 MPa ± 100 MPa).

Proceso de fabricación :

Se utilizó prensado isostático en caliente (HIP, 1300 °C ± 10 °C, 200 MPa ± 5 MPa) para garantizar la compacidad (porosidad < 0,1 % $\pm 0,01$ %, microdefectos < 0,05 μm $\pm 0,01$ μm).

de TiN (espesor 5-15 μm $\pm 0,1$ μm , dureza HV 2000 ± 50) aplicado por deposición física de vapor (PVD, 400-600 °C ± 10 °C) reduce el coeficiente de fricción (< 0,2 $\pm 0,05$).

por electroerosión (EDM, corriente 5-20 A ± 1 A, precisión < 0,01 mm $\pm 0,001$ mm) para la producción de contornos complejos de punzones y matrices.

Las matrices de trefilado de carburo

se utilizan para el trefilado en frío, el trefilado profundo o el hilado de alambres, tubos o placas metálicas, como las matrices de trefilado de alambre, de tubos o de embutición profunda. Se utilizan comúnmente matrices de WC-8%Co o WC-6%Co-Ni (2% $\pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Resistencia al desgaste < 0,05 mm³ / N·m $\pm 0,01$ mm³ / N·m, acabado del orificio interior Ra < 0,05 μm $\pm 0,01$ μm , tensión de extracción del soporte > 2000 MPa ± 100 MPa (como alambre de acero inoxidable o tubo de cobre).

La tolerancia de precisión geométrica es < 0,01 mm $\pm 0,001$ mm, el error del ángulo del cono es < 0,5° $\pm 0,1$ °, adecuado para trefilado de alambre fino (diámetro 0,1-5 mm $\pm 0,05$ mm).

Estabilidad térmica < 600°C ± 20 °C, coeficiente de expansión térmica < 6 $\times 10^{-6}$ /°C $\pm 0,5 \times 10^{-6}$ /°C, reduciendo la deformación térmica.

Proceso de fabricación :

Rectificado de precisión (tamaño de grano n.º 1200-2000 ± 100 , precisión < 0,005 mm $\pm 0,001$ mm) combinado con pulido ultrasónico para controlar las microfisuras superficiales (< 0,01 μm $\pm 0,001$ μm).

de TiC (espesor 5-10 μm $\pm 0,1$ μm , resistencia de unión > 50 MPa ± 5 MPa) se aplicaron mediante deposición química de vapor (CVD, 800-1000 °C ± 10 °C, concentración de vapor 10-20 vol % ± 1 vol %).

El tratamiento de superficie con láser (potencia 200-300 W ± 10 W) optimiza la capa endurecida en el orificio interior (profundidad 0,05-0,1 mm $\pm 0,01$ mm).

Las matrices de carburo para estampación en frío

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

se utilizan para el forjado en frío de pernos, tuercas, remaches o fijaciones, con composiciones como WC-10%Co o WC-15%Co-TiC ($5\% \pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, resistencia a la fatiga $>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, adecuado para altas deformaciones ($>50\% \pm 5\%$) y cargas de impacto transitorias ($>1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$).

Dureza superficial HV $1900-2000 \pm 30$, resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, precisión de la cavidad $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Estabilidad térmica $<500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, tensión residual $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$, evita el agrietamiento en frío.

Proceso de fabricación :

La sinterización por plasma con chispa (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) garantizó un tamaño de grano de $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

El endurecimiento de la superficie (potencia del láser $300-500 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$, profundidad $0,1-0,2 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) combinado con dopaje VC ($0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la resistencia al agrietamiento.

Se utilizó prensado isostático en caliente postratamiento (HIP, $1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para eliminar la tensión interna.

Las matrices de forjado en caliente de carburo cementado

se utilizan para el forjado en caliente de metales de alta temperatura (como acero, aleación de titanio, aleaciones a base de níquel), con una formulación como WC-10%Co-TiC ($5\% \pm 0,5\%$) o WC-12%Co-TaC ($2\% \pm 0,1\%$).

Características profesionales :

Pérdida de masa de resistencia a la oxidación a alta temperatura $<0,01\% \pm 0,001\%$ a $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, ciclo de vida de resistencia a la fatiga térmica >5000 veces ± 500 veces.

Conductividad térmica $>120 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W} / \text{m} \cdot \text{K}$, coeficiente de expansión térmica $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, adecuado para forja a $900-1200^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.

Resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, resistencia a la fisura térmica de la cavidad (velocidad de crecimiento de la grieta $<0,001 \text{ mm/ciclo} \pm 0,0001 \text{ mm/ciclo}$).

Proceso de fabricación :

HIP ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) con adición de TaC ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) para mejorar la resistencia al agrietamiento en caliente, porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$.

La superficie se rocía con ZrN ($5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, velocidad de deposición $0,1-0,5 \mu\text{m} / \text{min} \pm 0,05 \mu\text{m} / \text{min}$) o Al_2O_3 (antioxidante, espesor $10-20 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$).

El recocido del tratamiento térmico ($900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, $2-4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) optimizó la homogeneidad del tejido.

Las matrices de prensado de polvo de carburo cementado

se utilizan para el prensado de productos pulvimetalúrgicos, como engranajes, cojinetes o materiales magnéticos. Se suelen utilizar matrices de WC-6%Co-Ni ($2\% \pm 0,5\%$) o WC-8%Co-Cr ($3\% \pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Capacidad de soporte de alta presión $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 /$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$N \cdot m \pm 0,01 \text{ mm}^3 / N \cdot m$, la complejidad de la cavidad admite una profundidad de $10-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Relación de compresión $>2:1 \pm 0,1$, uniformidad de llenado de polvo $>95\% \pm 2\%$, precisión de prensado $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Estabilidad térmica $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, resistencia a la corrosión por polvo ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$).

Proceso de fabricación :

de grano $\#1500-3000 \pm 100$) combinado con recubrimiento de TiAlN pulverizado por plasma (espesor $5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureza HV 2800 ± 50).

Microestructura optimizada HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $150 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) con tamaño de grano de $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

La texturización superficial mediante láser (profundidad $5-10 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$) mejora la fluidez del polvo y las propiedades de desmoldeo.

Los moldes de plástico de carburo

se utilizan para el moldeo por inyección de termoplásticos (como ABS, PC) o plásticos termoendurecibles (como resina epoxi), con una fórmula como WC-8%Co-Cr ($2\% \pm 0,5\%$) o WC-10%Co-Ni ($3\% \pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Resistencia al calor $>400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, resistencia a la corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (resistencia a la corrosión por aditivos plásticos), acabado superficial $R_a <0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

Resistente al moldeo por inyección de alta presión ($>100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), precisión de cavidad $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, adecuado para diseño de canales de flujo complejos (longitud $50-200 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$).

El coeficiente de expansión térmica es $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, reduciendo la deformación del ciclo térmico ($<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$).

Proceso de fabricación :

La cavidad del molde se realizó mediante mecanizado por electrochispa (EDM, corriente $10-30 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$, precisión $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$).

El recubrimiento PVD de CrN ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureza HV 2000 ± 50) reduce la adhesión del plástico y se combina con el pulido ($R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

El tratamiento térmico y revenido ($400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $1-2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) eliminan la tensión interna.

Las matrices de extrusión de carburo

se utilizan para la extrusión continua de metales o plásticos, como perfiles de aluminio o tiras de sellado de caucho, con una formulación como WC-10%Co-VC ($0,5\% \pm 0,1\%$).

Características profesionales :

Resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / N \cdot m \pm 0,01 \text{ mm}^3 / N \cdot m$, resistencia a la deformación por extrusión $>2000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, precisión de la matriz $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Adecuado para extrusión de larga distancia ($>10 \text{ m} \pm 1 \text{ m}$), velocidad de extrusión $1-5 \text{ m/min} \pm 0,1 \text{ m/min}$, estabilidad de temperatura $<500^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Coefficiente de fricción $<0,1 \pm 0,01$, adhesión del material reducida (fuerza de adhesión $<0,5 \text{ N} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

0,05 N).

Proceso de fabricación :

El rectificado de precisión y el HIP ($1300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) garantizan una homogeneidad interna con una porosidad de $<0,1\% \pm 0,01\%$.

El recubrimiento de superficie MoS_2 ($1-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, velocidad de deposición $0,2-0,5\text{ }\mu\text{m}/\text{min} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$) reduce la fricción.

El tratamiento de superficie con láser (potencia $200-400\text{ W} \pm 10\text{ W}$) optimiza la capa de endurecimiento de la matriz (profundidad $0,1-0,2\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Las matrices de recorte de carburo

se utilizan para el recorte de precisión de láminas de metal o láminas delgadas, con una formulación como WC-6%Co-TiC ($3\% \pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Agudeza de corte: fuerza de corte $<0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$, vida útil $>10^5\text{ m} \pm 10^4\text{ m}$, suavidad del filo de corte $R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

Precisión $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, tenacidad al impacto $10-12\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, adecuado para el troquelado de chapa fina (espesor $0,05-1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Estabilidad térmica $<400^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, zona afectada por el calor reducida ($<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Proceso de fabricación :

Corte por láser (potencia $200-300\text{ W} \pm 10\text{ W}$, precisión $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) combinado con recubrimiento PVD ZrN ($5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$).

El pulido químico mecánico (CMP, presión $5-10\text{ kPa} \pm 0,5\text{ kPa}$) optimiza el filo con una rugosidad de $R_a <0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

El revenido a baja temperatura ($300^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $1\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) estabiliza la estructura.

Los moldes de fundición a presión de carburo cementado

se utilizan para la fundición a presión de metales no ferrosos (como aleaciones de zinc y magnesio), con una formulación como WC-12%Co-TaC ($2\% \pm 0,1\%$).

Características profesionales :

Resistencia a la fatiga térmica >4000 veces ± 400 veces, resistencia a la corrosión del metal fundido $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$, resistencia a la presión de la cavidad del molde $>1500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$.

Conductividad térmica $>100\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$, coeficiente de expansión térmica $<6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, adecuado para fundición a presión de $600-800^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$.

La precisión de la cavidad del molde es $<0,02\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$ y la rugosidad de la superficie es $R_a <0,2\text{ }\mu\text{m} \pm 0,02\text{ }\mu\text{m}$.

Proceso de fabricación :

HIP ($1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) en combinación con un recubrimiento multicapa de $\text{TiAlN} + \text{Al}_2\text{O}_3$ (espesor $10-20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$, dureza $\text{HV } 3000 \pm 50$).

por electrochispa (EDM, precisión $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$) se utiliza para realizar cavidades de molde complejas, seguido de un posprocesamiento y pulido.

El recocido mediante tratamiento térmico ($700^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, $2-3\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) reduce la tensión residual.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Las matrices de laminación de carburo

se utilizan para el conformado de láminas o barras de metal con una formulación como WC-10%Co-Cr ($3\% \pm 0,5\%$).

Características profesionales :

Resistencia al desgaste por laminación $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, resistencia a la fatiga $>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, tolerancia de espesor de precisión de laminación $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, estabilidad térmica $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, velocidad de laminación $1-10 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$.

Dureza superficial HV 1900-2000 ± 30 , textura de laminación reducida (altura $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$).

Proceso de fabricación :

Después del forjado, se realizó HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para optimizar el tamaño del grano ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Endurecimiento de superficies (potencia láser $400-600 \text{ W} \pm 20 \text{ W}$, profundidad $0,2-0,3 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

El TiN recubierto con PVD ($5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) mejora la durabilidad.

2. Campos de aplicación de los moldes de carburo cementado

Gracias a sus excelentes propiedades físicas y químicas, los moldes de carburo cementado han demostrado un amplio potencial de aplicación en múltiples sectores industriales. A continuación, se presentan los campos de aplicación en expansión profesional, incluyendo el recién incorporado sector de los vehículos de nuevas energías:

Fabricación de automóviles

Aplicaciones : Las matrices de estampación de carburo se utilizan para el troquelado de paneles de carrocería (espesor $0,5-3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), matrices de estampación en frío para pernos y tuercas (diámetro $5-20 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$), matrices de forja en caliente para cigüeñales, bielas y engranajes (peso $1-10 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$), matrices de fundición a presión para bloques de cilindros y carcasas de cajas de cambios (volumen $0,5-5 \text{ L} \pm 0,1 \text{ L}$), matrices de laminación para formar láminas de acero (espesor $1-5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$).

Ventajas : Mejora la eficiencia de producción ($>20\% \pm 2\%$), prolonga la vida útil del molde hasta 10^6 veces $\pm 10^4$ Reduce el número de carreras y los costos de mantenimiento ($<5\% \pm 1\%$), y admite el procesamiento de acero de alta resistencia ($>1500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Industria aeroespacial

Aplicaciones : Las matrices de forjado en caliente de carburo se utilizan para formar hojas de aleación de titanio y piezas estructurales (temperatura $900-1100^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), matrices de embutición para procesar tubos de aleación de aluminio de alta resistencia y estructuras de panel (diámetro $10-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), matrices de extrusión para fabricar sujetadores de aviación (longitud $20-100 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$) y matrices de fundición a presión para producir piezas de fuselaje de aleación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de magnesio (peso 0,5-2 kg $\pm$ 0,1 kg).

Ventajas : Resistencia a la fatiga a altas temperaturas (>5000 veces $\pm$ 500 veces), alta precisión (tolerancia $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), peso ligero (densidad $<2,7$ g/cm³ $\pm$ 0,1 g/cm³) y requisitos de resistencia a la oxidación a altas temperaturas ($<0,01$ % $\pm$ 0,001 %).

Industria electrónica

Aplicaciones : Las matrices de prensado de polvo de carburo se utilizan para prensar núcleos de micromotores (espesor 0,2-0,5 mm $\pm$ 0,05 mm), moldes de plástico para fabricar carcasas y conectores de teléfonos móviles (tamaño 100-150 mm $\pm$ 1 mm), matrices de recorte para procesar placas de circuitos (espesor 0,1-0,3 mm $\pm$ 0,01 mm) y matrices de extrusión para formar cables (diámetro 0,05-1 mm $\pm$ 0,01 mm).

Ventajas : Moldeo de alta precisión ($<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), excelente calidad de superficie (Ra $<0,2$ μ m $\pm$ 0,02 μ m), ciclo de producción corto (<1 h/pieza $\pm$ 0,1 h) y uso de alta frecuencia ($>10^4$ veces $\pm$ 10^3 veces).

Industria de fabricación mecánica y moldes

Aplicaciones : Matrices de trefilado de carburo para trefilado de alambre (diámetro de 0,1 a 5 mm $\pm$ 0,05 mm), matrices de estampación para procesamiento de engranajes y cojinetes (profundidad de cavidad de 10 a 30 mm $\pm$ 1 mm), matrices de estampación en frío para ejes de precisión (diámetro de 2 a 10 mm $\pm$ 0,1 mm), matrices de laminación para barras de acero (diámetro de 5 a 20 mm $\pm$ 0,5 mm), matrices de fundición a presión para fundiciones complejas (peso de 0,1 a 5 kg $\pm$ 0,1 kg).

Ventajas : Mayor vida útil ($>10^6$ m $\pm$ 10^4 m de longitud de tracción), frecuencia de cambio reducida ($>50\%$ $\pm$ 5%), consistencia de producción mejorada (desviación $<1\%$ $\pm$ 0,1%), compatibilidad con materiales de alta dureza ($>HRC$ 50 $\pm$ 2).

Fabricación de dispositivos médicos

Aplicaciones : Los moldes de plástico de carburo se utilizan para formar jeringas médicas y catéteres (espesor de pared 0,1-0,3 mm $\pm$ 0,01 mm), moldes de estampación en frío para fabricar tornillos ortopédicos y clavos intramedulares (diámetro 2-6 mm $\pm$ 0,1 mm), moldes de recorte para procesar hojas quirúrgicas (espesor 0,05-0,1 mm $\pm$ 0,005 mm), moldes de extrusión para formar catéteres (diámetro interior 0,5-2 mm $\pm$ 0,05 mm), moldes de compresión de polvo para fabricar componentes de articulaciones artificiales (peso 0,1-0,5 kg $\pm$ 0,05 kg).

Ventajas : Recubrimiento biocompatible (p. ej. Ag, tasa antibacteriana $>90\%$ $\pm$ 2%), alta precisión ($<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm), cumple con los requisitos de esterilidad (carga bacteriana <10 UFC/cm² $\pm$ 1 UFC/cm²), vida útil $>10^5$ veces $\pm$ 10^4 veces.

Energía e industria pesada

Aplicaciones : Las matrices de forjado en caliente de carburo se utilizan para conectores de palas de turbinas eólicas (diámetro >500 mm $\pm$ 10 mm), matrices de prensado de polvo para piezas resistentes al desgaste (como cuerpos de bombas, peso 5-20 kg $\pm$ 1 kg), matrices de extrusión para tuberías de perforación petrolera (diámetro 50-100 mm $\pm$ 2 mm), matrices de fundición a presión para cuerpos de válvulas de energía nuclear (peso 10-50 kg $\pm$ 2 kg) y matrices de laminación para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

procesamiento de rieles (ancho 100-150 mm $\pm$ 2 mm).

Ventajas : Resistencia a la oxidación a altas temperaturas ($<0,01\% \pm 0,001\%$ a $800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$), resistencia a la compresión ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), vida útil prolongada ($>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$), soporte para entornos extremos (presión $>200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Fabricación de bienes de consumo

Aplicación : Los moldes de plástico de carburo se utilizan para carcasas de electrodomésticos (como carcasas de TV, tamaño 500-1000 mm $\pm$ 10 mm) y molduras de utensilios de cocina (espesor 0,5-2 mm $\pm$ 0,1 mm), moldes de recorte para procesar piezas decorativas de metal (espesor 0,1-0,5 mm $\pm$ 0,01 mm), moldes de extrusión para fabricar perfiles de puertas y ventanas de aleación de aluminio (longitud 3-6 m $\pm$ 0,1 m).

Ventajas : Alto acabado superficial ($R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$), alta eficiencia de producción (>50 piezas/h $\pm$ 5 piezas/h) y baja tasa de retrabajo ($<2\% \pm 0,5\%$).

Edificios e infraestructura

Aplicaciones : Matrices de laminación de carburo para formar barras de acero (diámetro de 6-40 mm $\pm$ 0,5 mm), matrices de prensado de polvo para fabricar componentes de moldes de hormigón prefabricado (peso de 10-30 kg $\pm$ 1 kg), matrices de extrusión para procesar marcos de ventanas de aluminio (longitud de 1-3 m $\pm$ 0,05 m), matrices de fundición a presión para producir herrajes para la construcción (peso de 0,5-2 kg $\pm$ 0,1 kg).

Ventajas : Vida útil ($>10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$), alta precisión ($<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$), soporte para producción a gran escala (>1000 piezas/día $\pm$ 100 piezas).

Industria de defensa y militar

Aplicaciones : Las matrices de forjado en caliente de carburo se utilizan para formar placas de blindaje de tanques (espesor 10-50 mm $\pm$ 1 mm), matrices de estampación en frío para fabricar carcasas de proyectiles (diámetro 20-100 mm $\pm$ 2 mm), matrices de embutición para procesar carcasas de misiles (longitud 0,5-2 m $\pm$ 0,05 m) y matrices de fundición a presión para producir componentes de radar (peso 1-5 kg $\pm$ 0,2 kg).

Ventajas : Resistencia a la fatiga por alta temperatura ($>10^4$ veces $\pm$ 10^3 veces), resistencia al impacto ($>500 \text{ J/cm}^2 \pm 50 \text{ J/cm}^2$), cumplimiento de los estándares militares (MIL-STD-810).

Aplicación en el campo de los vehículos de nuevas energías

Con el rápido desarrollo de la industria de vehículos de nueva energía (NEV), los moldes de carburo cementado desempeñan un papel irremplazable en la fabricación de componentes clave de los vehículos eléctricos.

Matrices de estampación de carburo

Se utiliza para perforar y formar carcasas de baterías (espesor 0,8-2 mm $\pm$ 0,1 mm, como batería de fosfato de hierro y litio o carcasa de batería de litio ternaria) y piezas estructurales de la carrocería (como placas de protección del chasis, tamaño 1000-2000 mm $\pm$ 10 mm), carga de perforado $>1000 \text{ kN} \pm 100 \text{ kN}$.

Matrices de carburo para estampación en frío

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fabricar conectores de alto voltaje ($5-15\text{ mm} \pm 0,2\text{ mm}$ de diámetro) y ejes de rotor de motor ($10-30\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$ de diámetro), soportar sujetadores de alta resistencia ($>1500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$) y tasa de deformación $>40\% \pm 5\%$.

Matriz de forja en caliente de carburo

Se utiliza para el conformado en caliente de colectores de corriente de baterías de energía (como láminas de cobre/aluminio, espesor $0,1-0,2\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) y carcasas de estatores de motores (peso $5-15\text{ kg} \pm 0,5\text{ kg}$), temperatura de procesamiento $600-900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, carga $>2000\text{ kN} \pm 200\text{ kN}$.

matriz de extrusión de carburo

Procesamiento de marcos de baterías de aleación de aluminio (sección transversal $50-100\text{ mm}^2 \pm 2\text{ mm}^2$) y tubos de disipación de calor (longitud $1-3\text{ m} \pm 0,05\text{ m}$), velocidad de extrusión $0,5-2\text{ m/min} \pm 0,1\text{ m/min}$, presión $>1500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$.

Molde de fundición a presión de carburo

Producción de carcasas de motor (peso $10-30\text{ kg} \pm 1\text{ kg}$) y carcasas de pilas de carga (tamaño $300-500\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$), resistencia a la presión $>1200\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, temperatura de fundición $650-750^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$.

Matrices de recorte de carburo

Se utiliza para cortes de precisión de piezas polares de baterías (espesor $0,08-0,15\text{ mm} \pm 0,005\text{ mm}$) y perforación de terminales de mazos de cables (longitud $10-50\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$), fuerza de corte $<0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$, precisión $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$.

Ventajas de las matrices de estampación de carburo

Alta precisión y consistencia : precisión del molde $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, lo que garantiza la tolerancia de ensamblaje del módulo de batería ($<0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), mejora la densidad de energía ($>160\text{ Wh/kg} \pm 10\text{ Wh/kg}$) y consistencia de la celda de la batería $>98\% \pm 1\%$.

Resistencia al desgaste y larga vida útil : vida útil del molde $>10^6$ veces $\pm 10^4$ Reduce la frecuencia de reemplazo ($>60\% \pm 5\%$), reduce los costos de producción ($<10\% \pm 1\%$) y admite una producción continua de $>500\text{ h} \pm 50\text{ h}$.

Resistencia a altas temperaturas y corrosión : Las matrices de forjado en caliente son resistentes a entornos de $900\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$, resistencia a la corrosión del electrolito ($<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$, como solución de sal de litio pH 7-9) y vida útil prolongada ($>10^4\text{ h} \pm 10^3\text{ h}$).

SopORTE liviano : Combinando un moldeado de aleación de aluminio de alta resistencia ($>300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) y aleación de magnesio ($>200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$), puede reducir el peso en un $10-15\% \pm 2\%$, aumentar el rango de conducción ($>500\text{ km} \pm 20\text{ km}$) y cumplir con los estándares NEDC.

Producción eficiente : Eficiencia de estampación y fundición a presión >50 piezas/h ± 5 piezas/h, acortando el ciclo de producción de piezas de vehículos de nueva energía ($<2\text{ h/pieza} \pm 0,1\text{ h}$), apoyando la producción en masa a gran escala ($>10^4$ vehículos/año $\pm 10^3$ vehículos).

Desafíos técnicos y soluciones :

Desafíos : Las carcasas de baterías de alto voltaje son propensas a microfisuras (longitud $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$) durante el estampado, la tensión térmica ($>200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) durante el forjado en caliente provoca deformación y los moldes de fundición a presión se corroen fácilmente por el metal fundido (tasa de erosión $<0,02\text{ mm/año} \pm 0,002\text{ mm/año}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Solución : Optimizar el recubrimiento PVD TiAlN (espesor $10-20\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$, dureza HV 3200 ± 50) de la matriz de estampación para mejorar la resistencia al agrietamiento, introducir un sustrato precalentado ($200-400\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) para reducir la tensión térmica y realizar un postprocesamiento HIP ($1300\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$, $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) para mejorar la estructura interna. Añadir TaC ($2\ \% \pm 0,1\ \%$) al molde de fundición a presión para mejorar la resistencia a la corrosión, combinado con un recubrimiento de Al_2O_3 (espesor $15-25\ \mu\text{m} \pm 0,2\ \mu\text{m}$) para ralentizar la erosión.

Tendencia de desarrollo : Con el desarrollo de la tecnología de baterías de estado sólido y celdas de combustible de hidrógeno, los moldes de carburo cementado necesitan mejorar aún más su resistencia a altas temperaturas ($>1000\ ^\circ\text{C} \pm 50\ ^\circ\text{C}$) y resistencia a la corrosión electroquímica ($<0,005\ \text{mm/año} \pm 0,001\ \text{mm/año}$), y explorar la tecnología de impresión 3D (SLM, espesor de capa $20-50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) para fabricar moldes de marco de batería complejos, que admitan el diseño de gradiente de múltiples materiales (gradiente de dureza $1800-2200\ \text{HV} \pm 50$).

3. Dirección futura del desarrollo de los moldes de carburo cementado

Optimización de materiales : Desarrollar formulaciones con bajo contenido de cobalto (por ejemplo, WC-Ni-Cr, Co $<5\% \pm 0,5\%$) o nanocompuestos (tamaño de partícula WC $<100\ \text{nm} \pm 10\ \text{nm}$) para mejorar la tenacidad y la biocompatibilidad.

Innovación de procesos : Introducción de la tecnología de impresión 3D (SLM, espesor de capa $20-50\ \mu\text{m} \pm 1\ \mu\text{m}$) para fabricar moldes complejos, combinada con postratamiento HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) para reducir la porosidad ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

Inteligente : los sensores integrados monitorean la tensión del molde ($<50\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) y la temperatura ($<600\ ^\circ\text{C} \pm 10\ ^\circ\text{C}$) para un mantenimiento predictivo.

Sostenibilidad : Uso de polvo de carburo reciclado (tasa de reutilización $>90\% \pm 2\%$) y proceso de bajo consumo de energía (consumo de energía $<10\ \text{kWh/kg} \pm 1\ \text{kWh/kg}$).

La aplicación de moldes de carburo cementado en el sector industrial continúa expandiéndose, y sus características de alto rendimiento satisfacen las necesidades de múltiples sectores, desde la automoción hasta la defensa nacional y los vehículos de nuevas energías. En particular, el rápido crecimiento en el campo de los vehículos de nuevas energías ha impulsado el desarrollo de la tecnología de moldes hacia una fabricación de alta precisión, alta eficiencia y ecológica. Se esperan más avances tecnológicos en los próximos 5 a 10 años.

4. Normas relevantes para moldes de carburo cementado

Estándares comunes de la industria

Condiciones técnicas y normas

La fabricación y el uso de matrices de carburo cementado suelen ajustarse a las "**Condiciones Técnicas para Matrices de Trefilado de Carburo Cementado**" (N.º de Registro: 8261-2001), gestionadas por la Oficina Estatal de la Industria de Maquinaria. Esta norma especifica las propiedades del material, la precisión dimensional, la resistencia al desgaste y la vida útil de la matriz de trefilado, y es aplicable a la fabricación e inspección de matrices de trefilado de alambre.

Requisitos de rendimiento del material

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Los moldes de carburo deben cumplir con los requisitos de alta dureza ($HV\ 1800-2000 \pm 30$), alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05\ mm^3 / N \cdot m \pm 0,01\ mm^3 / N \cdot m$) y alta tenacidad (tenacidad a la fractura $10-15\ MPa \cdot m^{1/2} \pm 1\ MPa \cdot m^{1/2}$) estándares, que son ampliamente adoptados en la industria.

Normas nacionales o internacionales

La producción de moldes de carburo cementado a menudo se refiere a **"GB/T 5242-2006 Condiciones técnicas generales para carburo cementado"**, que cubre la composición, las pruebas de rendimiento y los requisitos de control de calidad de los materiales de carburo cementado y es adecuada para la selección de materias primas en la fabricación de moldes.

Normas ISO : Las normas ISO, como la ISO 513 (clasificación de materiales de herramientas de corte) y la ISO 28080 (pruebas de propiedades de materiales duros), se pueden utilizar como referencia para el diseño de moldes de carburo, especialmente en proyectos de exportación o de cooperación internacional.

Estándares de aplicación industrial

Estándar de matriz de estampación

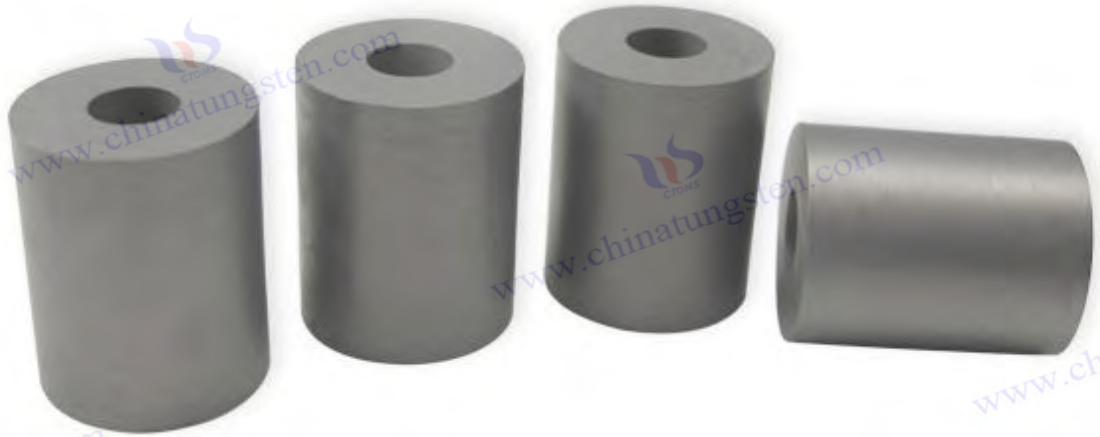
Para las matrices de estampación de carburo cementado, la industria a menudo hace referencia a **"JB/T 8144-2010 Condiciones técnicas para matrices de estampación"**, que especifica el diseño estructural, el proceso de tratamiento térmico y los requisitos de tratamiento de superficie de la matriz para garantizar una alta precisión (tolerancia $<0,01\ mm \pm 0,001\ mm$) y una larga vida útil ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces el impulso).

Estándar de matriz para pulvimetalurgia

Los moldes de carburo cementado en el campo de la pulvimetalurgia pueden seguir las **"Condiciones técnicas para moldes de pulvimetalurgia YB/T 5136-2006"**, enfatizando la precisión de la cavidad del molde ($<0,02\ mm \pm 0,002\ mm$) y la resistencia a la presión ($>3000\ MPa \pm 100\ MPa$).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



JB/T 8144-2010 Requisitos técnicos para matrices de estampación

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica las condiciones técnicas de las matrices de estampación, incluyendo la selección de materiales, los requisitos de diseño, el proceso de fabricación, el rendimiento técnico, los métodos de inspección, el marcado, el embalaje, el transporte y el almacenamiento. Es aplicable a matrices de estampación en frío para diversas placas metálicas (como placas de acero, placas de aluminio, placas de acero inoxidable) y materiales no metálicos (como plásticos y caucho), incluyendo matrices monoproceso, matrices compuestas y matrices multiproceso, y se utiliza ampliamente en las industrias automotriz, electrónica, aeroespacial y otras.

2. Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. En el caso de los documentos referenciados con fecha, las modificaciones o revisiones posteriores (excluidas las erratas) no son aplicables a esta norma, pero se recomienda adoptar la nueva versión del documento según los resultados de la investigación.

GB/T 5242-2006 Especificaciones generales para carburo cementado

GB/T 6110-2021 Matrices de trefilado: Tipos estructurales y dimensiones de las matrices de trefilado de carburo cementado

Especificaciones técnicas de la matriz de trefilado de carburo cementado JB/T 3943-2017

GB/T 1804-2000 Tolerancias y ajustes: desviaciones límite y desviaciones básicas de dimensiones lineales

3. Términos y definiciones

Matriz de estampación: Herramienta utilizada para dar forma a un material mediante presión, que incluye una matriz, un punzón y una guía.

Vida útil del estampado: capacidad del molde para mantener un rendimiento estable bajo un número específico de veces de estampado.

Precisión de montaje: la tolerancia de ajuste y la precisión de la posición relativa entre los distintos componentes del molde.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

4. Requisitos de material

4.1 Material del molde

Material de carburo cementado: sistema WC-Co (como WC-6%Co, WC-10%Co), dureza HV 1800-2000 $\pm$ 30, resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Acero: Cr12MoV, acero D2 o H13, dureza HRC 58-62 $\pm$ 2, templado y revenido.

Partes no funcionales: Fabricadas en acero 45# o acero Q235, dureza HRC 30-40 $\pm$ 2 después del tratamiento térmico.

4.2 Requisitos de rendimiento

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, probado según GB/T 12444.

Resistencia al calor: temperatura de funcionamiento $<600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Resistencia a la fatiga: Vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, prueba según GB/T 3075.

4.3 Tratamiento de superficies

Recubrimiento opcional: TiN, Recubrimiento de TiC o CrN, espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureza HV 2000-3000 ± 50 , resistencia de unión $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, mediante proceso PVD o CVD.

5. Requisitos técnicos

5.1 Requisitos de diseño

Tipo estructural: incluye matrices de proceso único, compuestas y progresivas, diseñadas según el estándar GB/T 6397.

Grado de tolerancia: La tolerancia de dimensión lineal está de acuerdo con GB/T 1804 IT6-IT8, tolerancia geométrica de redondez $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Precisión de guía: el espacio entre la columna guía y el manguito guía es de $0,005-0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.2 Tamaño y precisión

del molde: según los requisitos del dibujo de la pieza, el diámetro exterior máximo es $\leq 500 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y la altura es $\leq 300 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Tolerancia de la pieza de trabajo: holgura de perforación $0,01-0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, ajustada según el espesor de la chapa.

Precisión de montaje: error de posición relativa $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

5.3 Calidad de la superficie

La rugosidad de la superficie de trabajo $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$, utilizando un proceso de pulido o rectificado de precisión.

No hay grietas, poros ni rayones en la superficie y el tamaño máximo del defecto es $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Indicadores de desempeño

Vida útil de perforación: >500.000 veces $\pm 10^4$ veces (dependiendo del material y las condiciones de perforación), desgaste $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Precisión de estampación: tolerancia del tamaño de la pieza $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$, rugosidad de la superficie $R_a < 0,8 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6. Proceso de fabricación

6.1 Preparación de la materia prima

Polvo de carburo cementado: tamaño de partícula WC $0,5-2\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$, error de contenido de Co $\pm 0,5\%$, mezclado mediante molienda de bolas (velocidad $200-300\ \text{rpm} \pm 10\ \text{rpm}$, tiempo $24-48\ \text{h} \pm 1\ \text{h}$).

Pretratamiento del acero: Recocido para eliminar tensiones internas, dureza HRC $20-25 \pm 2$.

6.2 Proceso de moldeo

Carburo cementado: prensado isostático en frío (CIP, $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$) o moldeo por inyección, densidad del cuerpo verde $>60\% \pm 2\%$ densidad teórica.

Acero: forjado o fundido, relación de forja $\geq 4:1$.

6.3 Sinterización y tratamiento térmico

Carburo cementado: prensado isostático en caliente (HIP, $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200\ \text{MPa} \pm 5\ \text{MPa}$), porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Acero: temple ($1000-1050^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, enfriamiento con aceite) + revenido ($200-250^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $2-3\ \text{h} \pm 0,1\ \text{h}$), dureza HRC $58-62 \pm 2$.

6.4 Acabado

Las piezas de trabajo se fabrican mediante mecanizado por electroerosión (EDM, corriente $5-20\ \text{A} \pm 1\ \text{A}$) con una precisión de $<0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$.

Rectificado de precisión (tamaño de grano $\#1200-3000 \pm 100$) o pulido ultrasónico, control de rugosidad de la superficie $R_a <0,2\ \mu\text{m} \pm 0,02\ \mu\text{m}$.

6.5 Montaje

La guía se monta a presión, con una holgura de $0,005-0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$ y un par de apriete de los tornillos de $50-100\ \text{N}\cdot\text{m} \pm 5\ \text{N}\cdot\text{m}$.

7. Métodos de inspección

7.1 Dimensiones y precisión

La tolerancia está de acuerdo con el grado GB/T 1182 IT6-IT8 cuando se inspecciona mediante una máquina de medición de coordenadas (CMM).

7.2 Propiedades del material

La prueba de dureza está de acuerdo con GB/T 231.1, la prueba de resistencia a la compresión está de acuerdo con GB/T 3852 y la prueba de resistencia al desgaste está de acuerdo con GB/T 12444.

La conductividad térmica está de acuerdo con ASTM E1461 y el coeficiente de expansión térmica está de acuerdo con ISO 17864.

7.3 Calidad de la superficie

Los defectos se comprobaron mediante microscopía óptica (aumento $500\times \pm 50\times$) o microscopía electrónica de barrido (SEM), con un tamaño máximo de defecto $<0,01\ \text{mm} \pm 0,001\ \text{mm}$.

7.4 Vida útil del estampado

La prueba se realizó en una punzonadora estándar utilizando materiales estándar (por ejemplo, placa de acero SPCC de 1 mm de espesor, velocidad de punzonado de $20\ \text{a}\ 50\ \text{veces/min} \pm 2\ \text{veces/min}$) y se registró el número de punzones hasta que el desgaste alcanzó $0,1\ \text{mm} \pm 0,01\ \text{mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8. Condiciones de prueba

Temperatura ambiente de prueba: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humedad $50\%-70\% \pm 5\%$.

Carga de punzonado: $500-2000 \text{ kN} \pm 50 \text{ kN}$, ajustada según las especificaciones del molde.

9. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

9.1 Logotipo

La placa de identificación en la superficie del molde indica: número de molde, especificación (diámetro exterior $\times$ altura en mm), tonelaje de estampado, fecha de fabricación, nombre del fabricante y la altura del carácter es de $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

9.2 Embalaje

Utilice espuma a prueba de golpes y papel antioxidante para envolver, colocar en cajas de madera o metal y marcar "Manipular con cuidado" y "A prueba de humedad" dentro de la caja.

9.3 Transporte

Evite entornos con vibraciones intensas o altas temperaturas ($>50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). El vehículo de transporte debe estar equipado con amortiguadores.

9.4 Almacenamiento

Conservar en un lugar seco y ventilado a una temperatura de $0-40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y una humedad del $<60\% \pm 5\%$. Evitar el contacto con sustancias ácidas o alcalinas.

10. Uso y mantenimiento

10.1 Requisitos de uso

Precaliente el molde a $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ antes de estampar para reducir el choque térmico.

Utilice aceite de estampación que cumpla con la norma GB/T 7326, con una viscosidad de $20-50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$.

10.2 Mantenimiento

Compruebe periódicamente el desgaste de la superficie de trabajo, cada $10^4 \pm 10^3$ punzones.

Si se encuentra que el desgaste es $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, púlalo o reemplácelo a tiempo.

10.3 Normas de desguace

Cuando el desgaste de la superficie de trabajo es $>0,2 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$, o la longitud de la grieta es $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, se considera desecho.

11. Garantía de calidad

La tasa de muestreo de cada lote de moldes es $\geq 5\% \pm 1\%$ y la tasa calificada es $>95\% \pm 2\%$.

Proporcionar certificados de materiales e informes de inspección, incluidos datos de pruebas de rendimiento y registros de inspección dimensional.

12. Apéndice (Informativo)

Referencia de parámetros del proceso de estampación

Velocidad de perforación: $20-100 \text{ veces/min} \pm 2 \text{ veces/min}$.

Espacio de obturación: cuando el espesor de la placa es de $0,5$ a 2 mm , el espacio es de $0,01$ a $0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$.

Defectos típicos y soluciones

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

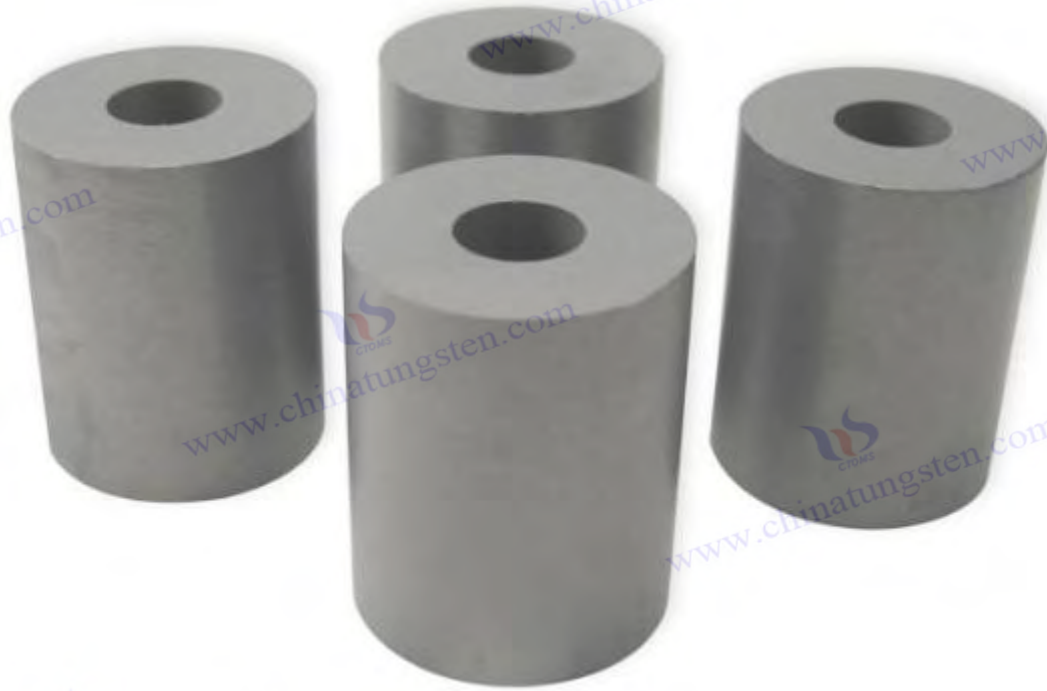
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Grieta: Ajustar la temperatura del tratamiento térmico o aumentar la velocidad de enfriamiento.

Deformación: Optimice el diseño del molde y aumente la precisión del guiado.

Esta condición técnica refleja plenamente los requisitos básicos de "JB/T 8144-2010", combina las características del carburo cementado y otros materiales, y garantiza el rendimiento de las matrices de estampación en términos de alta precisión, alta vida útil y alta confiabilidad.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Matrices de trefilado de carburo

Condiciones técnicas

Se ha elaborado un documento completo, exhaustivo y detallado de "Condiciones Técnicas para Matrices de Trefilado de Carburo", basado en las normas vigentes (como la "JB/T 3943-2017 Condiciones Técnicas para Matrices de Trefilado de Carburo" y las especificaciones relacionadas de la industria) y las prácticas del sector. Este documento tiene como objetivo estandarizar la selección de materiales, el proceso de fabricación, los requisitos de rendimiento, los métodos de inspección y el mantenimiento de las matrices de trefilado de carburo para garantizar su alto rendimiento y fiabilidad en el proceso de trefilado.

1. Ámbito de aplicación

Esta condición técnica se aplica a la fabricación, inspección y uso de matrices de trefilado de carburo cementado, que abarcan las matrices de trefilado utilizadas para el trefilado en frío de alambres metálicos (como alambre de acero, alambre de cobre, alambre de acero inoxidable, etc.) y es aplicable a matrices de trefilado con un rango de diámetro de 0,1 mm a 20 mm $\pm$ 0,05 mm.

2. Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta condición técnica mediante su referencia en ella. En el caso de los documentos referenciados con fecha, las modificaciones o revisiones posteriores (excluidas las erratas) no son aplicables a esta condición técnica, pero se recomienda adoptar la nueva versión del documento según los resultados de la investigación.

GB/T 5242-2006 Especificaciones generales para carburo cementado

Especificaciones técnicas de la matriz de trefilado de carburo cementado JB/T 3943-2017

GB/T 6110-2021 Matrices de trefilado: Tipos estructurales y dimensiones de las matrices de trefilado de carburo cementado

3. Términos y definiciones

Matriz de trefilado: Matriz cónica o de forma anular hecha de material de carburo que se utiliza para reducir el diámetro del alambre metálico mediante el proceso de trefilado.

Ángulo del cono de trabajo: El ángulo de la parte cónica del orificio interior del molde, que afecta la fuerza de tracción y la calidad de la superficie.

Vida útil: La capacidad de una matriz para mantener un rendimiento estable dentro de una longitud de embutido o un número de veces específico.

4. Requisitos de material

4.1 Composición del material

La matriz del molde adopta el sistema de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co), y la proporción recomendada es WC-6%Co, WC-8%Co o WC-10%Co, y el error de contenido de cobalto es de $\pm 0,5\%$.

Dependiendo de las características del material trefilado (por ejemplo, acero con alto contenido de carbono o aleación de cobre), se puede agregar una ligera cantidad de fases de refuerzo como TiC

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

(0,5%-2% ± 0,1%) o TaC (0,5%-1% ± 0,1%) para mejorar la resistencia al desgaste y la resistencia al calor.

4.2 Propiedades físicas

Dureza: HV 1800-2000 ± 30. El método de prueba está de acuerdo con GB/T 3850.

Densidad: 14,5-15,0 g/cm³ ± 0,2 g/cm³, método de prueba según GB/T 3851.

Resistencia a la compresión: >4000 MPa ± 100 MPa, método de prueba según GB/T 3852.

Tenacidad a la fractura: 10-15 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}, método de ensayo según GB/T 21068.

4.3 Estabilidad química

Resistencia a la corrosión: Inmerso en solución de NaCl al 0,9% durante 24 h ± 1 h, tasa de corrosión <0,01 mm/año ± 0,001 mm/año.

Resistencia a la oxidación: pérdida de masa <0,01% ± 0,001% a 800°C ± 20°C.

5. Requisitos técnicos

5.1 Dimensiones y tolerancias

del molde : 10-50 mm ± 0,1 mm, altura: 5-30 mm ± 0,1 mm.

Diámetro del orificio de trabajo: 0,1-20 mm ± 0,01 mm, ángulo del cono: 6°-15° ± 0,5°, de acuerdo con los tipos y dimensiones especificados en GB/T 6110-2021.

Tolerancias geométricas: redondez <0,005 mm ± 0,001 mm, cilindridad <0,01 mm ± 0,001 mm.

5.2 Calidad de la superficie

La rugosidad de la superficie de trabajo Ra < 0,1 μm ± 0,01 μm se consigue mediante un proceso de pulido químico-mecánico (CMP) o rectificado de precisión.

No hay grietas, poros ni inclusiones en la superficie y el tamaño máximo del defecto es <0,01 mm ± 0,001 mm.

5.3 Requisitos de rendimiento

Vida útil: Longitud de trefilado > 10⁶ m ± 10⁴ m (dependiendo del material trefilado), tasa de desgaste < 0,05 mm³ / N · m ± 0,01 mm³ / N · m.

Estabilidad térmica: temperatura de funcionamiento <600°C ± 20°C, coeficiente de expansión térmica <6×10⁻⁶ /°C ± 0,5×10⁻⁶ /°C.

Precisión de dibujo: tolerancia del diámetro del alambre <±0,01 mm ± 0,001 mm, rugosidad de la superficie Ra <0,4 μm ± 0,05 μm.

5.4 Recubrimiento (opcional)

TiN, Los recubrimientos de TiC o CrN se pueden aplicar mediante tecnología de deposición física de vapor (PVD) o deposición química de vapor (CVD) con un espesor de 5-15 μm ± 0,1 μm, una dureza de HV 2000-3000 ± 50 y una resistencia de unión de >50 MPa ± 5 MPa.

6. Proceso de fabricación

6.1 Preparación de la materia prima

polvo de WC de alta pureza (tamaño de partícula 0,5-2 μm ± 0,1 μm) y polvo de Co, y la uniformidad de mezcla fue >95% ± 2%, lo que se logró mediante molienda de bolas (velocidad 200-300 rpm ± 10 rpm, tiempo 24-48 h ± 1 h).

6.2 Proceso de moldeo

Se utiliza prensado isostático en frío (CIP, 200 MPa ± 5 MPa) o moldeo por inyección, y la densidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

del cuerpo verde es $>60\% \pm 2\%$ de la densidad teórica.

6.3 Proceso de sinterización

Prensado isostático en caliente (HIP, $1300-1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) o sinterización asistido por campo (SPS, $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) para garantizar una porosidad de $<0,1\% \pm 0,01\%$ y un tamaño de grano de $0,5-1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

6.4 Acabado

El orificio interior se realizó mediante mecanizado por electrochispa (EDM, corriente $5-20\text{ A} \pm 1\text{ A}$) con una precisión de $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$.

Rectificado de precisión (tamaño de grano $\#1200-3000 \pm 100$) o pulido ultrasónico, control de rugosidad de la superficie $R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$.

6.5 Tratamiento térmico

El recocido ($400-600^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, $2-4\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$) elimina la tensión interna y la tensión residual es $<100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$.

7. Métodos de inspección

7.1 Precisión dimensional y geométrica

La tolerancia está de acuerdo con el nivel IT6 especificado en GB/T 1182 cuando se prueba utilizando una máquina de medición de coordenadas (CMM).

7.2 Propiedades del material

La prueba de dureza está de acuerdo con GB/T 3850, la densidad está de acuerdo con GB/T 3851 y la resistencia a la compresión está de acuerdo con GB/T 3852.

La tenacidad a la fractura está de acuerdo con GB/T 21068 y la conductividad térmica está de acuerdo con ASTM E1461.

7.3 Calidad de la superficie

Los defectos se comprobaron utilizando un microscopio óptico (aumento $500\times \pm 50\times$) o un microscopio electrónico de barrido (SEM), siendo el tamaño máximo del defecto $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$.

7.4 Vida útil

Realice una prueba en una máquina de trefilado estándar, utilizando materiales de trefilado estándar (por ejemplo, alambre de acero de 1 mm de diámetro, velocidad de trefilado de $1\text{ a }5\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$) y registre la longitud de trefilado hasta que el desgaste alcance $0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$.

8. Condiciones de prueba

Temperatura ambiente de prueba: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humedad $50\%-70\% \pm 5\%$.

Carga de prueba de extracción: $500-2000\text{ N} \pm 50\text{ N}$, ajustada según las especificaciones del molde.

9. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

9.1 Logotipo

La placa de identificación en la superficie del molde indica: número de molde, especificación (diámetro $\times$ altura en mm), fecha de fabricación y nombre del fabricante. La altura de los caracteres es de $3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ y es claramente visible.

9.2 Embalaje

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Utilice espuma a prueba de golpes y papel anticorrosión para embalar, colocar en cajas de madera o plástico y marcar "Manipular con cuidado" dentro de la caja.

9.3 Transporte

Evite entornos con vibraciones intensas o altas temperaturas ($>50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). El vehículo de transporte debe estar equipado con amortiguadores.

9.4 Almacenamiento

Conservar en un lugar seco y ventilado a una temperatura de $0-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad de $<60\% \pm 5\%$. Evitar el contacto con sustancias ácidas o alcalinas.

10. Uso y mantenimiento

10.1 Requisitos de uso

Precaliente la matriz a $50-100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de dibujar para reducir el choque térmico.

El lubricante de estirado utilizado es aceite de estirado que cumple con GB/T 7326 y tiene una viscosidad de $20-50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$.

10.2 Mantenimiento

Compruebe periódicamente el desgaste del orificio de trabajo, cada $10^{-5}\text{ m} \pm 10^{-4}\text{ m}$ de longitud de tracción.

Si se encuentra que el desgaste es $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, púlalo o reemplácelo a tiempo.

10.3 Normas de desgaste

Cuando el diámetro del orificio de trabajo aumenta en $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, o la longitud de la grieta superficial es $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, se considerará desecho.

11. Garantía de calidad

La tasa de muestreo de cada lote de moldes es $\geq 5\% \pm 1\%$ y la tasa calificada es $>95\% \pm 2\%$.

Proporcionar certificados de materiales e informes de inspección, incluidos datos de pruebas de rendimiento y registros de inspección dimensional.

12. Apéndice (Informativo)

Referencia de parámetros del proceso de dibujo

Velocidad de tracción: $1-10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$.

Tasa de reducción: $10\%-25\% \pm 2\%$, dependiendo del material.

Defectos típicos y soluciones

Grietas: ajustar la temperatura de sinterización o aumentar la presión HIP. Porosidad: optimizar la mezcla de polvos o mejorar la densidad de sinterización.

Esta condición técnica integra estándares actuales (como JB/T 3943-2017) y prácticas de la industria para garantizar que las matrices de trefilado de carburo cementado tengan alta confiabilidad y consistencia en el rendimiento, la fabricación y el uso.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YB/T 5136-2006

Requisitos técnicos para moldes de pulvimetalurgia

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica las condiciones técnicas de los moldes para pulvimetalurgia, incluyendo la selección de materiales, los requisitos de diseño, el proceso de fabricación, el rendimiento técnico, los métodos de inspección, el marcado, el embalaje, el transporte y el almacenamiento. Es aplicable a los moldes utilizados en procesos de prensado pulvimetalúrgico, incluyendo moldes de carburo o acero para prensar engranajes, cojinetes, materiales magnéticos y otros productos, y se utiliza ampliamente en los sectores de la automoción, la electrónica, la fabricación de maquinaria, etc.

2. Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. En el caso de los documentos referenciados con fecha, las modificaciones o revisiones posteriores (excluidas las erratas) no son aplicables a esta norma, pero se recomienda adoptar la nueva versión del documento según los resultados de la investigación.

GB/T 5242-2006 Especificaciones generales para carburo cementado

GB/T 6110-2021 Matrices de trefilado: Tipos estructurales y dimensiones de las matrices de trefilado de carburo cementado

Especificaciones técnicas de la matriz de trefilado de carburo cementado JB/T 3943-2017

GB/T 1804-2000 Tolerancias y ajustes: desviaciones límite y desviaciones básicas de dimensiones lineales

3. Términos y definiciones

Molde para pulvimetalurgia: Herramienta utilizada para dar forma a polvo metálico o polvo compuesto mediante prensado a alta presión, que incluye un molde superior, un molde inferior y una manga de molde.

Vida útil de prensado: La capacidad de un molde para mantener un rendimiento estable bajo un número específico de ciclos de prensado.

Uniformidad de llenado: La consistencia de la distribución del polvo en la cavidad del molde afecta directamente la densidad del producto.

4. Requisitos de material

4.1 Material del molde

Material de carburo cementado: sistema WC-Co (como WC-6%Co, WC-8%Co o WC-10%Co), dureza HV 1800-2000 $\pm$ 30, resistencia a la compresión >4000 MPa $\pm$ 100 MPa.

Acero: Cr12MoV, acero D2 o H13, dureza HRC 58-62 $\pm$ 2, templado y revenido.

Piezas no funcionales: Fabricadas en acero 40Cr o 45#, dureza HRC 30-40 $\pm$ 2 después del tratamiento térmico.

4.2 Requisitos de rendimiento

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,05$ mm³ / N · m $\pm$ 0,01 mm³ / N · m, probado según GB/T 12444.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Resistencia a la presión: Presión máxima $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, probada según GB/T 3852.

Resistencia a la fatiga: Vida útil por fatiga $> 10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, prueba según GB/T 3075.

4.3 Tratamiento de superficies

Recubrimiento opcional: TiN, Recubrimiento de TiC o Al_2O_3 , espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, dureza HV 2000-3000 ± 50 , resistencia de unión $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, mediante proceso PVD o CVD.

5. Requisitos técnicos

5.1 Requisitos de diseño

Tipo estructural: incluye molde de prensado unidireccional, molde de prensado bidireccional y molde de múltiples cavidades, diseñado de acuerdo con el estándar GB/T 6406.

Grado de tolerancia: La tolerancia de dimensión lineal está de acuerdo con GB/T 1804 IT6-IT8, el paralelismo de tolerancia geométrica es $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Precisión de guía: el espacio entre la columna guía y el manguito guía es de $0,005$ a $0,015 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.2 Tamaño y precisión

del molde: Según los requisitos del dibujo de la pieza, el diámetro exterior máximo es $\leq 400 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y la altura es $\leq 250 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Dimensiones de la cavidad: Tolerancia $\leq \pm 0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$, profundidad $10-50 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Precisión de montaje: error de posición relativa $<0,03 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

5.3 Calidad de la superficie

La rugosidad de la superficie de trabajo $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$, utilizando un proceso de pulido o rectificado de precisión.

No hay grietas, poros ni inclusiones en la superficie y el tamaño máximo del defecto es $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

5.4 Indicadores de desempeño

Vida útil de prensado: >500.000 veces $\pm 10^4$ veces (dependiendo del material del polvo y la presión), desgaste $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

Precisión de prensado: tolerancia de densidad del producto $\pm 2\% \pm 0,5\%$, tolerancia de tamaño $\pm 0,05 \text{ mm} \pm 0,005 \text{ mm}$.

Uniformidad de llenado: $>95\% \pm 2\%$, probado según YB/T 5120.

6. Proceso de fabricación

6.1 Preparación de la materia prima

Polvo de carburo cementado: tamaño de partícula WC $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, error de contenido de Co $\pm 0,5\%$, mezclado mediante molienda de bolas (velocidad $200-300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, tiempo $24-48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$).

Pretratamiento del acero: Recocido para eliminar tensiones internas, dureza HRC $20-25 \pm 2$.

6.2 Proceso de moldeo

Carburo cementado: prensado isostático en frío (CIP, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) o moldeo por inyección, densidad del cuerpo verde $>60\% \pm 2\%$ densidad teórica.

Acero: forjado o fundido, relación de forja $\geq 4:1$.

6.3 Sinterización y tratamiento térmico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Carburo cementado: prensado isostático en caliente (HIP, 1300-1400°C ± 10°C, 200 MPa ± 5 MPa), porosidad <0,1% ± 0,01%.

Acero: temple (1000-1050°C ± 10°C, enfriamiento con aceite) + revenido (200-250°C ± 10°C, 2-3 h ± 0,1 h), dureza HRC 58-62 ± 2.

6.4 Acabado

La cavidad del molde se produjo mediante mecanizado por electrochispa (EDM, corriente 5-20 A ± 1 A) con una precisión de <0,02 mm ± 0,002 mm.

Rectificado de precisión (tamaño de grano #1200-3000 ± 100) o pulido ultrasónico, control de rugosidad de la superficie Ra <0,2 μm ± 0,02 μm.

6.5 Montaje

La guía se monta a presión, con una holgura de 0,005-0,015 mm ± 0,001 mm y un par de apriete de los tornillos de 50-80 N·m ± 5 N·m.

7. Métodos de inspección

7.1 Dimensiones y precisión

La tolerancia está de acuerdo con el grado GB/T 1182 IT6-IT8 cuando se inspecciona mediante una máquina de medición de coordenadas (CMM).

7.2 Propiedades del material

La prueba de dureza está de acuerdo con GB/T 231.1, la prueba de resistencia a la compresión está de acuerdo con GB/T 3852 y la prueba de resistencia al desgaste está de acuerdo con GB/T 12444.

La conductividad térmica está de acuerdo con ASTM E1461 y el coeficiente de expansión térmica está de acuerdo con ISO 17864.

7.3 Calidad de la superficie

Los defectos se comprobaron mediante microscopía óptica (aumento 500× ± 50×) o microscopía electrónica de barrido (SEM), con un tamaño máximo de defecto < 0,01 mm ± 0,001 mm.

7.4 Vida útil del prensado

La prueba se realizó en una prensa de pulvimetalurgia estándar utilizando polvo de hierro estándar (por ejemplo, ASC 100.29, presión 500-1000 MPa ± 50 MPa) y se registró el número de presiones hasta que el desgaste alcanzó 0,1 mm ± 0,01 mm.

8. Condiciones de prueba

Temperatura ambiente de prueba: 20-25°C ± 2°C, humedad 50%-70% ± 5%.

Carga de prensado: 500-2000 kN ± 50 kN, ajustada según las especificaciones del molde.

9. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

9.1 Logotipo

La placa de identificación en la superficie del molde indica: número de molde, especificación (diámetro exterior × altura en mm), tonelaje de prensado, fecha de fabricación, nombre del fabricante y la altura del carácter es de 3 mm ± 0,1 mm.

9.2 Embalaje

Utilice espuma a prueba de golpes y papel antioxidante para envolver, colocar en cajas de madera o metal y marcar "Manipular con cuidado" y "A prueba de humedad" dentro de la caja.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

9.3 Transporte

Evite entornos con vibraciones intensas o altas temperaturas ($>50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). El vehículo de transporte debe estar equipado con amortiguadores.

9.4 Almacenamiento

Conservar en un lugar seco y ventilado a una temperatura de $0-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad del $<60\% \pm 5\%$. Evitar el contacto con sustancias ácidas o alcalinas.

10. Uso y mantenimiento

10.1 Requisitos de uso

Precalentar el molde a $50-100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ antes de prensar para reducir el choque térmico.

Utilice aceite de prensado que cumpla con la norma GB/T 7326, con una viscosidad de $20-50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$.

10.2 Mantenimiento

Compruebe periódicamente el desgaste de la cavidad de la matriz, cada $10^4 \pm 10^3$ prensados.

Si se encuentra que el desgaste es $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, púlalo o reemplácelo a tiempo.

10.3 Normas de desguace

Cuando el desgaste de la cavidad es $>0,2\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$, o la longitud de la grieta es $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, se considera desecho.

11. Garantía de calidad

La tasa de muestreo de cada lote de moldes es $\geq 5\% \pm 1\%$ y la tasa calificada es $>95\% \pm 2\%$.

Proporcionar certificados de materiales e informes de inspección, incluidos datos de pruebas de rendimiento y registros de inspección dimensional.

12. Apéndice (Informativo)

Referencia de parámetros del proceso de prensado

Presión de prensado: $500-1000\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$.

Relación de compresión: $2:1$ a $4:1 \pm 0,1$, dependiendo de las características del polvo.

Defectos típicos y soluciones

Grieta: Ajustar la temperatura de sinterización o aumentar la presión HIP.

Densidad desigual: optimice el proceso de llenado de polvo y aumente el tiempo de vibración ($10-20\text{ s} \pm 1\text{ s}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 6110-2021
Troquel de dibujo
Matrices de trefilado de carburo
Tipo y tamaño estructural

1. **Ámbito de aplicación**

Esta norma especifica el tipo estructural, las especificaciones dimensionales y los requisitos técnicos relacionados de las matrices de trefilado de carburo cementado. Es aplicable a las matrices de trefilado utilizadas en el proceso de trefilado en frío de alambres metálicos (como alambre de acero, alambre de cobre, alambre de acero inoxidable, etc.), abarcando matrices de trefilado con un rango de diámetro de 0,1 mm a 20 mm $\pm$ 0,05 mm, y se utiliza ampliamente en las industrias de procesamiento de metales, electrónica, automotriz y otras.

2. **Referencias normativas**

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. En el caso de los documentos referenciados con fecha, las modificaciones o revisiones posteriores (excluidas las erratas) no son aplicables a esta norma, pero se recomienda adoptar la nueva versión del documento según los resultados de la investigación.

GB/T 5242-2006 Especificaciones generales para carburo cementado

Especificaciones técnicas de la matriz de trefilado de carburo cementado JB/T 3943-2017

GB/T 1804-2000 Tolerancias y ajustes: desviaciones límite y desviaciones básicas de dimensiones lineales

3. **Términos y definiciones**

Matriz de trefilado: Matriz cónica o de forma anular hecha de material de carburo que se utiliza para reducir el diámetro del alambre metálico mediante el proceso de trefilado.

Ángulo del cono de trabajo: El ángulo de la parte cónica del orificio interior del molde, que afecta la fuerza de tracción y la calidad de la superficie.

Área de guía: El área dentro del orificio de la matriz que se utiliza para guiar el alambre y garantizar la estabilidad del trefilado.

4. **Tipo estructural**

4.1 **Estructura básica**

Las matrices de embutición suelen constar de las siguientes áreas funcionales:

Zona de entrada: Guíe el alambre dentro de la matriz, longitud 0,5-1 mm $\pm$ 0,1 mm, ángulo de cono 20°-30° $\pm$ 2°.

Área de lubricación: Proporciona almacenamiento de lubricante, longitud 0,5-1,5 mm $\pm$ 0,1 mm, ángulo de cono 10°-20° $\pm$ 1°.

del cono de trabajo : área de deformación del dibujo principal, longitud 0,5-2 mm $\pm$ 0,1 mm, ángulo del cono 6°-15° $\pm$ 0,5°.

Zona de dimensionamiento: Controlar el diámetro final, longitud 0,2-0,8 mm $\pm$ 0,05 mm, tolerancia de diámetro $\pm$ 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Zona de salida: Proteger la superficie del cable, longitud $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, ángulo de cono $30^\circ-45^\circ \pm 2^\circ$.

4.2 Clasificación

Matriz de un solo orificio: orificio de trabajo único, adecuado para lotes pequeños o dibujos de especificación única, diámetro máximo $20 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Matriz multiorificios: Múltiples orificios de trabajo, adecuados para embutición continua, espaciado entre orificios $\geq 2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Matriz combinada: diseño modular, piezas de trabajo reemplazables, adaptable a diversas especificaciones de alambre.

5. Dimensiones

5.1 Dimensiones

Diámetro exterior: $10-50 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, las especificaciones recomendadas son 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm.

Altura: $5-30 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, las especificaciones recomendadas son 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm.

Espesor: $3-15 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, dependiendo del diámetro y la aplicación.

5.2 Tamaño del orificio interior

Apertura mínima: $0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, apertura máxima $20 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$.

Longitud del cono de trabajo: $0,5-2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, relación longitud/apertura 1:1 a 1:5.

Longitud de la zona de dimensionamiento: $0,2-0,8 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, relación longitud/apertura 1:2 a 1:10.

5.3 Tolerancias y ajustes

Tolerancia de dimensión lineal: Según grado GB/T 1804 IT6-IT8, tolerancia de apertura $\pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Tolerancias geométricas: redondez $< 0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, cilíndricidad $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Tolerancia del ángulo del cono: $\pm 0,5^\circ \pm 0,1^\circ$.

5.4 Especificaciones especiales

Micromolde (apertura $\leq 0,5 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$): longitud de la zona de dimensionamiento $0,1-0,3 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$, ángulo de cono $8^\circ-12^\circ \pm 0,5^\circ$.

Moldes grandes (apertura $> 10 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$): longitud del cono de trabajo $1,5-2 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, ángulo del cono $10^\circ-15^\circ \pm 0,5^\circ$.

6. Requisitos técnicos

6.1 Requisitos de material

Se utiliza carburo cementado WC-Co, y la proporción recomendada es WC-6%Co, WC-8%Co o WC-10%Co, y el error de contenido de cobalto es $\pm 0,5\%$.

Dureza HV $1800-2000 \pm 30$, resistencia a la compresión $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, porosidad $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

6.2 Calidad de la superficie

La rugosidad de la superficie de trabajo $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, utilizando tecnología de pulido químico-mecánico (CMP) o rectificado de precisión.

No hay grietas, poros ni inclusiones en la superficie y el tamaño máximo del defecto es $< 0,01 \text{ mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\pm 0,001 \text{ mm}$.

6.3 Indicadores de desempeño

Vida útil: Longitud de extracción $> 10^6 \text{ m} \pm 10^4 \text{ m}$, tasa de desgaste $< 0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Estabilidad térmica: temperatura de funcionamiento $< 600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $< 6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Precisión de dibujo: tolerancia del diámetro del alambre $\leq \pm 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, rugosidad de la superficie $R_a < 0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$.

6.4 Recubrimiento (opcional)

TiN, Los recubrimientos de TiC o CrN se pueden aplicar mediante tecnología PVD o CVD con un espesor de $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, una dureza de HV 2000-3000 ± 50 y una resistencia de unión de $> 50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$.

7. Proceso de fabricación

7.1 Preparación de la materia prima

polvo de WC de alta pureza (tamaño de partícula $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y polvo de Co, y la uniformidad de mezcla fue $> 95\% \pm 2\%$, lo que se logró mediante molienda de bolas (velocidad 200-300 rpm $\pm 10 \text{ rpm}$, tiempo 24-48 h $\pm 1 \text{ h}$).

7.2 Proceso de moldeo

Prensado isostático en frío (CIP, 200 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$) o moldeo por inyección, densidad del cuerpo verde $> 60\% \pm 2\%$ densidad teórica.

7.3 Proceso de sinterización

Prensado isostático en caliente (HIP, 1300-1400 $^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 200 MPa $\pm 5 \text{ MPa}$) o sinterización asistido por campo (SPS, 1350 $^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 50 MPa $\pm 1 \text{ MPa}$) para garantizar un tamaño de grano de $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

7.4 Acabado

El orificio interior se realizó mediante mecanizado por electrochispa (EDM, corriente 5-20 A $\pm 1 \text{ A}$) con una precisión de $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Rectificado de precisión (tamaño de grano #1200-3000 ± 100) o pulido ultrasónico, control de rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

8. Métodos de inspección

8.1 Dimensiones y precisión

La tolerancia está de acuerdo con el grado GB/T 1182 IT6-IT8 cuando se inspecciona mediante una máquina de medición de coordenadas (CMM).

8.2 Propiedades del material

La prueba de dureza está de acuerdo con GB/T 3850, la densidad está de acuerdo con GB/T 3851 y la resistencia a la compresión está de acuerdo con GB/T 3852.

La conductividad térmica está de acuerdo con ASTM E1461 y el coeficiente de expansión térmica está de acuerdo con ISO 17864.

8.3 Calidad de la superficie

Los defectos se comprobaron mediante microscopía óptica (aumento 500 $\times \pm 50\times$) o microscopía

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

electrónica de barrido (SEM), con un tamaño máximo de defecto $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

8.4 Vida útil

Realice una prueba en una máquina de trefilado estándar, utilizando materiales de trefilado estándar (por ejemplo, alambre de acero de 1 mm de diámetro, velocidad de trefilado de 1 a 5 m/s $\pm 0,1 \text{ m/s}$) y registre la longitud de trefilado hasta que el desgaste alcance $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

9. Condiciones de prueba

Temperatura ambiente de prueba: $20\text{-}25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, humedad $50\%\text{-}70\% \pm 5\%$.

Carga de prueba de extracción: $500\text{-}2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$, ajustada según las especificaciones del molde.

10. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

10.1 Logotipo

La placa de identificación en la superficie del molde indica: número de molde, especificación (diámetro $\times$ altura en mm), fecha de fabricación y nombre del fabricante. La altura de los caracteres es de $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y es claramente visible.

10.2 Embalaje

Utilice espuma a prueba de golpes y papel anticorrosión para embalar, colocar en cajas de madera o plástico y marcar "Manipular con cuidado" dentro de la caja.

10.3 Transporte

Evite entornos con vibraciones intensas o altas temperaturas ($>50^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$). El vehículo de transporte debe estar equipado con amortiguadores.

10.4 Almacenamiento

Conservar en un lugar seco y ventilado a una temperatura de $0\text{-}40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y una humedad de $<60\% \pm 5\%$. Evitar el contacto con sustancias ácidas o alcalinas.

11. Uso y mantenimiento

11.1 Requisitos de uso

Precalente la matriz a $50\text{-}100^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ antes de dibujar para reducir el choque térmico.

Utilice aceite de trefilado que cumpla con la norma GB/T 7326, con una viscosidad de $20\text{-}50 \text{ cSt} \pm 5 \text{ cSt}$.

11.2 Mantenimiento

Compruebe periódicamente el desgaste del orificio de trabajo, cada $10^{-5} \text{ m} \pm 10^{-4} \text{ m}$ de longitud de tracción.

Si se encuentra que el desgaste es $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, púlalo o reemplácelo a tiempo.

11.3 Normas de desguace

Cuando el diámetro del orificio de trabajo aumenta en $>0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, o la longitud de la grieta superficial es $>0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, se considerará desecho.

12. Garantía de calidad

La tasa de muestreo de cada lote de moldes es $\geq 5\% \pm 1\%$ y la tasa calificada es $>95\% \pm 2\%$.

Proporcionar certificados de materiales e informes de inspección, incluidos datos de pruebas de rendimiento y registros de inspección dimensional.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

13. Apéndice (Informativo)

Referencia de parámetros del proceso de dibujo

Velocidad de tracción: 1-10 m/s $\pm$ 0,1 m/s.

Tasa de reducción: 10%-25% $\pm$ 2%, dependiendo del material.

Defectos típicos y soluciones

Grieta: Ajustar la temperatura de sinterización o aumentar la presión HIP.

Porosidad: Optimice la mezcla de polvo o mejore la densidad de sinterización.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

JB/T 3943-2017

Troquel de dibujo

Matrices de trefilado de carburo

Condiciones técnicas

1. Ámbito de aplicación

Esta norma especifica las condiciones técnicas para la selección de materiales, el proceso de fabricación, el rendimiento técnico, los métodos de inspección, el marcado, el embalaje, el transporte y el almacenamiento de las matrices de trefilado de carburo cementado. Es aplicable a las matrices de trefilado utilizadas en el proceso de trefilado en frío de alambres metálicos (como alambre de acero, alambre de cobre, alambre de acero inoxidable, etc.), abarcando matrices de trefilado con un rango de diámetro de 0,1 mm a 20 mm $\pm$ 0,05 mm, y se utiliza ampliamente en las industrias de procesamiento de metales, electrónica, automotriz y otras.

2. Referencias normativas

Las cláusulas de los siguientes documentos se convierten en cláusulas de esta norma mediante su referencia en ella. En el caso de los documentos referenciados con fecha, las modificaciones o revisiones posteriores (excluidas las erratas) no son aplicables a esta norma, pero se recomienda adoptar la nueva versión del documento según los resultados de la investigación.

GB/T 5242-2006 Especificaciones generales para carburo cementado

GB/T 6110-2021 Matrices de trefilado: Tipos estructurales y dimensiones de las matrices de trefilado de carburo cementado

GB/T 1804-2000 Tolerancias y ajustes: desviaciones límite y desviaciones básicas de dimensiones lineales

3. Términos y definiciones

Matriz de trefilado: Matriz cónica o de forma anular hecha de material de carburo que se utiliza para reducir el diámetro del alambre metálico mediante el proceso de trefilado.

Ángulo del cono de trabajo: El ángulo de la parte cónica del orificio interior del molde, que afecta la fuerza de tracción y la calidad de la superficie.

Vida útil: La capacidad de una matriz para mantener un rendimiento estable dentro de una longitud de embutido o un número de veces específico.

4. Requisitos de material

4.1 Composición del material

La matriz del molde adopta el sistema de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co), y la proporción recomendada es WC-6%Co, WC-8%Co o WC-10%Co, y el error de contenido de cobalto es de $\pm 0,5\%$.

Dependiendo de las características del material trefilado (por ejemplo, acero con alto contenido de carbono o aleación de cobre), se puede agregar una ligera cantidad de fases de refuerzo como TiC (0,5%-2% $\pm$ 0,1%) o TaC (0,5%-1% $\pm$ 0,1%) para mejorar la resistencia al desgaste y la resistencia al calor.

4.2 Propiedades físicas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Dureza: HV 1800-2000 $\pm$ 30, método de prueba según GB/T 3850.

Densidad: 14,5-15,0 g/cm³ $\pm$ 0,2 g/cm³, método de prueba según GB/T 3851.

Resistencia a la compresión: >4000 MPa $\pm$ 100 MPa, método de prueba según GB/T 3852.

Tenacidad a la fractura: 10-15 MPa·m^{1/2} $\pm$ 1 MPa·m^{1/2}, método de ensayo según GB/T 21068.

4.3 Estabilidad química

Resistencia a la corrosión: Inmerso en solución de NaCl al 0,9% durante 24 h $\pm$ 1 h, tasa de corrosión <0,01 mm/año $\pm$ 0,001 mm/año.

Resistencia a la oxidación: pérdida de masa <0,01% $\pm$ 0,001% a 800°C $\pm$ 20°C.

5. Requisitos técnicos

5.1 Tipo estructural

La estructura del molde cumple con la norma GB/T 6110-2021, incluido el área de entrada, el área de lubricación, el área del cono de trabajo, el área de dimensionamiento y el área de salida.

Ángulo del cono en la zona de entrada: 20°-30° $\pm$ 2°, longitud 0,5-1 mm $\pm$ 0,1 mm.

Ángulo del cono de trabajo: 6°-15° $\pm$ 0,5°, longitud 0,5-2 mm $\pm$ 0,1 mm.

Longitud de la zona de dimensionamiento: 0,2-0,8 mm $\pm$ 0,05 mm, tolerancia de diámetro $\pm$ 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

5.2 Dimensiones y tolerancias

Diámetro exterior: 10-50 mm $\pm$ 0,1 mm, las especificaciones recomendadas son 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 40 mm.

Altura: 5-30 mm $\pm$ 0,1 mm, las especificaciones recomendadas son 10 mm, 15 mm, 20 mm y 25 mm.

Diámetro del orificio de trabajo: 0,1-20 mm $\pm$ 0,01 mm, tolerancia según GB/T 1804 IT6-IT8.

Tolerancias geométricas: redondez <0,005 mm $\pm$ 0,001 mm, cilíndricidad <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

5.3 Calidad de la superficie

La rugosidad de la superficie de trabajo Ra <0,1 μ m $\pm$ 0,01 μ m, utilizando tecnología de pulido químico-mecánico (CMP) o rectificado de precisión.

No hay grietas, poros ni inclusiones en la superficie y el tamaño máximo del defecto es <0,01 mm $\pm$ 0,001 mm.

5.4 Requisitos de rendimiento

Vida útil: Longitud de trefilado > 10⁶ m $\pm$ 10⁴ m (dependiendo del material trefilado), tasa de desgaste < 0,05 mm³ / N·m $\pm$ 0,01 mm³ / N·m.

Estabilidad térmica: temperatura de funcionamiento <600°C $\pm$ 20°C, coeficiente de expansión térmica <6 $\times$ 10⁻⁶ /°C $\pm$ 0,5 $\times$ 10⁻⁶ /°C.

Precisión de dibujo: tolerancia del diámetro del alambre < $\pm$ 0,01 mm $\pm$ 0,001 mm, rugosidad de la superficie Ra <0,4 μ m $\pm$ 0,05 μ m.

5.5 Recubrimiento (opcional)

TiN, Los recubrimientos de TiC o CrN se pueden aplicar mediante tecnología de deposición física de vapor (PVD) o deposición química de vapor (CVD) con un espesor de 5-15 μ m $\pm$ 0,1 μ m, una dureza de HV 2000-3000 $\pm$ 50 y una resistencia de unión de >50 MPa $\pm$ 5 MPa.

6. Proceso de fabricación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.1 Preparación de la materia prima

polvo de WC de alta pureza (tamaño de partícula $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y polvo de Co, y la uniformidad de mezcla fue $>95\% \pm 2\%$, lo que se logró mediante molienda de bolas (velocidad $200-300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, tiempo $24-48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$).

6.2 Proceso de moldeo

Prensado isostático en frío (CIP, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) o moldeo por inyección, densidad del cuerpo verde $>60\% \pm 2\%$ densidad teórica.

6.3 Proceso de sinterización

Prensado isostático en caliente (HIP, $1300-1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) o sinterización asistido por campo (SPS, $1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para garantizar una porosidad de $<0,1\% \pm 0,01\%$ y un tamaño de grano de $0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.4 Acabado

El orificio interior se realizó mediante mecanizado por electrochispa (EDM, corriente $5-20 \text{ A} \pm 1 \text{ A}$) con una precisión de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Rectificado de precisión (tamaño de grano $\#1200-3000 \pm 100$) o pulido ultrasónico, control de rugosidad de la superficie $Ra <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

6.5 Tratamiento térmico

El recocido ($400-600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $2-4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) elimina la tensión interna y la tensión residual es $<100 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$.

7. Métodos de inspección

7.1 Precisión dimensional y geométrica

La tolerancia está de acuerdo con el grado GB/T 1182 IT6-IT8 cuando se inspecciona mediante una máquina de medición de coordenadas (CMM).

7.2 Propiedades del material

La prueba de dureza está de acuerdo con GB/T 3850, la densidad está de acuerdo con GB/T 3851 y la resistencia a la compresión está de acuerdo con GB/T 3852.

La tenacidad a la fractura está de acuerdo con GB/T 21068 y la conductividad térmica está de acuerdo con ASTM E1461.

7.3 Calidad de la superficie

utilizando un microscopio óptico (aumento $500\times \pm 50\times$) o un microscopio electrónico de barrido (SEM), siendo el tamaño máximo del defecto $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

7.4 Vida útil

Realice una prueba en una máquina de trefilado estándar, utilizando materiales de trefilado estándar (por ejemplo, alambre de acero de 1 mm de diámetro, velocidad de trefilado de $1 \text{ a } 5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$) y registre la longitud de trefilado hasta que el desgaste alcance $0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$.

8. Condiciones de prueba

Temperatura ambiente de prueba: $20-25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, humedad $50\%-70\% \pm 5\%$.

Carga de prueba de extracción: $500-2000 \text{ N} \pm 50 \text{ N}$, ajustada según las especificaciones del molde.

9. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9.1 Logotipo

La placa de identificación en la superficie del molde indica: número de molde, especificación (diámetro × altura en mm), fecha de fabricación y nombre del fabricante. La altura de los caracteres es de $3\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$ y es claramente visible.

9.2 Embalaje

Utilice espuma a prueba de golpes y papel anticorrosión para embalar, colocar en cajas de madera o plástico y marcar "Manipular con cuidado" dentro de la caja.

9.3 Transporte

Evite entornos con vibraciones intensas o altas temperaturas ($>50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$). El vehículo de transporte debe estar equipado con amortiguadores.

9.4 Almacenamiento

Conservar en un lugar seco y ventilado a una temperatura de $0-40\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una humedad del $<60\% \pm 5\%$. Evitar el contacto con sustancias ácidas o alcalinas.

10. Uso y mantenimiento

10.1 Requisitos de uso

Precaliente la matriz a $50-100\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ antes de dibujar para reducir el choque térmico.

Utilice aceite de trefilado que cumpla con la norma GB/T 7326, con una viscosidad de $20-50\text{ cSt} \pm 5\text{ cSt}$.

10.2 Mantenimiento

Compruebe periódicamente el desgaste del orificio de trabajo, cada $10^{-5}\text{ m} \pm 10^{-4}\text{ m}$ de longitud de tracción.

Si se encuentra que el desgaste es $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, púlalo o reemplácelo a tiempo.

10.3 Normas de desguace

Cuando el diámetro del orificio de trabajo aumenta en $>0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$ y la longitud de la grieta superficial es $>0,05\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$, se considerará desechado.

11. Garantía de calidad

La tasa de muestreo de cada lote de moldes es $\geq 5\% \pm 1\%$ y la tasa calificada es $>95\% \pm 2\%$.

Proporcionar certificados de materiales e informes de inspección, incluidos datos de pruebas de rendimiento y registros de inspección dimensional.

12. Apéndice (Informativo)

Referencia de parámetros del proceso de dibujo

Velocidad de estirado: $1-10\text{ m/s} \pm 0,1\text{ m/s}$. Tasa de reducción: $10\%-25\% \pm 2\%$, según el material.

Defectos típicos y soluciones

Grieta: Ajustar la temperatura de sinterización o aumentar la presión HIP.

Porosidad: Optimice la mezcla de polvo o mejore la densidad de sinterización.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

¿Cuáles son las características y áreas de aplicación de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado?

Los sustratos de disipación de calor de carburo cementado se basan en el sistema de carburo de tungsteno-cobalto (WC-Co), combinado con materiales de alta conductividad térmica (como carburo de silicio SiC, nitruro de aluminio AlN o nitruro de boro BN) y otras fases de refuerzo (como carburo de titanio TiC o carburo de tántalo TaC), y se preparan mediante procesos de pulvimetalurgia (como prensado isostático en caliente HIP, sinterización o sinterización asistida por campo SPS) o tecnología de fabricación aditiva (como fusión selectiva por láser SLM, fusión por haz de electrones EBM). Estos sustratos combinan la alta dureza, resistencia al desgaste y excelente rendimiento de gestión térmica del carburo cementado, y se utilizan ampliamente en campos de alta tecnología que requieren disipación de calor eficiente, resistencia mecánica y adaptabilidad ambiental. A continuación, se detallan los diversos tipos de sustratos de disipación de calor de carburo cementado, descripciones más profesionales y detalladas, y escenarios de aplicación desde tres aspectos: tipos, características y campos de aplicación.

1. Tipos de sustratos de disipadores de calor de carburo

Los sustratos de disipación térmica de carburo cementado se dividen en varios tipos según la composición del material, el mecanismo de conductividad térmica y los requisitos de aplicación. Cada tipo se optimiza mediante proporciones y procesos específicos para satisfacer los requisitos de gestión térmica en diferentes escenarios:

Sustrato de disipación de calor de carburo cementado de cobalto y tungsteno puro (WC-Co)

Composición : carburo de tungsteno (WC) como fase dura, cobalto (Co) como fase aglutinante, la proporción típica es WC-6%Co, WC-10%Co o WC-15%Co.

Características profesionales :

Conductividad térmica $\sim 100-150 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, depende de la conductividad de la fase Co (resistividad $\sim 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$) y de la contribución de fonones del WC.

Dureza HV 1800-2000 ± 30 , resistencia a la compresión $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$, tamaño de grano $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Resistencia a altas temperaturas $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, pérdida de masa $<0,01\% \pm 0,001\%$ a $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Proceso de fabricación : HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) garantiza la densidad, el rectificado de precisión (tamaño de grano $\#1200-2000 \pm 100$) controla la rugosidad de la superficie $R_a < 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo cementado de tungsteno y cobalto-carburo de silicio (WC-Co- SiC)

Composición : Matriz WC-Co dopada con SiC ($10\%-30\% \pm 2\%$), tamaño de partícula de SiC $0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$, para mejorar la conductividad térmica y la resistencia al choque térmico.

Características profesionales :

Conductividad térmica $200-300 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, Contribución de SiC $\sim 270 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

W/ m· K , coeficiente de difusión térmica $>60 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$.

Dureza HV 1900-2200 ± 30 , resistencia al choque térmico ($\Delta T > 500^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, velocidad de crecimiento de grietas $< 0,001 \text{ mm/ciclo} \pm 0,0001 \text{ mm/ciclo}$).

Resistencia a la corrosión $< 0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (en solución ácida o alcalina), coeficiente de expansión térmica $\sim 4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Proceso de fabricación : SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) para lograr una distribución uniforme de SiC , tratamiento de superficie láser (potencia $200\text{-}400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$) para optimizar la trayectoria de conducción térmica.

Sustrato de disipación de calor aislante de carburo cementado de tungsteno y cobalto-nitruro de aluminio (WC-Co- AlN)

Composición : Matriz WC-Co dopada con AlN ($15\%\text{-}25\% \pm 2\%$), tamaño de partícula de AlN $0,5\text{-}2 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, proporcionando aislamiento eléctrico.

Características profesionales :

Conductividad térmica $150\text{-}250 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, resistividad $> 10^{-6} \Omega\cdot\text{cm} \pm 10^{-5} \Omega\cdot\text{cm}$, resistencia a la ruptura $> 15 \text{ kV/mm} \pm 1 \text{ kV/mm}$.

Dureza HV 1800-2100 ± 30 , resistencia a la flexión $> 2200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, buena combinación con chips de Si ($< 3\% \pm 0,5\%$).

Resistencia a altas temperaturas $> 900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, pérdida de masa $< 0,01\% \pm 0,001\%$ a $900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Proceso de fabricación : deposición CVD ($800\text{-}1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) de una capa de AlN (espesor $5\text{-}15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) , HIP ($1350^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para mejorar la unión de la interfaz.

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo cementado de tungsteno y cobalto-nitruro de boro (WC-Co-BN)

Composición : Matriz WC-Co dopada con nitruro de boro hexagonal (h-BN, $5\%\text{-}15\% \pm 1\%$), espesor de capa de h-BN $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, para mejorar la autolubricidad y la conductividad térmica.

Características profesionales :

La conductividad térmica es de $180\text{-}280 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$. La conductividad térmica de h-BN a lo largo del plano es de $\sim 300 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$, y en la dirección vertical es de $\sim 30 \text{ W/ m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/ m}\cdot\text{K}$.

Dureza HV 1700-2000 ± 30 , coeficiente de fricción $< 0,1 \pm 0,01$, resistencia al desgaste $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.

Resistencia a la corrosión $< 0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Proceso de fabricación : molienda de bolas (velocidad $200\text{-}300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, tiempo $24\text{-}48 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) para asegurar una dispersión uniforme de h-BN, sinterización SPS ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $40 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$).

Sustrato de disipación de calor multifásico de carburo cementado de tungsteno-cobalto-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carburo de titanio-carburo de tantalio (WC-Co -TiC- TaC)

Composición : Matriz WC-Co dopada con TiC (5%-10% $\pm$ 0,5%) y TaC (2%-5% $\pm$ 0,5%), tamaño de partícula 0,5-1,5 μm $\pm$ 0,1 μm , para mejorar el rendimiento a alta temperatura.

Características profesionales :

Conductividad térmica 120-200 W/ m·K $\pm$ 10 W/ m· K , resistencia a altas temperaturas $>1000^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 50 $^{\circ}\text{C}$, pérdida de masa $<0,01\%$ $\pm$ 0,001% a 1000°C $\pm$ 50 $^{\circ}\text{C}$.

Dureza HV 2000-2300 $\pm$ 30, resistencia a la fatiga térmica (>6000 veces $\pm$ 500 veces), resistencia a la compresión >4500 MPa $\pm$ 100 MPa.

Resistencia a la corrosión $<0,005$ mm/año $\pm$ 0,001 mm/año, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,2 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ $\pm$ $0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Proceso de fabricación : HIP (1400°C $\pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, 250 MPa $\pm$ 5 MPa) combinado con pulverización de plasma de recubrimiento TiC-TaC (espesor 10-20 μm $\pm$ 0,2 μm) .

Sustrato de disipación de calor nanocompuesto de WC-Co-grafeno

Composición : Matriz WC-Co dopada con grafeno (1%-5% $\pm$ 0,5%), espesor de lámina de grafeno $<0,01$ μm $\pm$ 0,001 μm , longitud 1-10 μm $\pm$ 0,5 μm .

Características profesionales :

La conductividad térmica es de 250-350 W/ m·K $\pm$ 10 W/ m· K , el grafeno contribuye con ~ 5000 W/ m·K $\pm$ 500 W/ m·K (a lo largo del plano).

Dureza HV 1900-2200 $\pm$ 30, resistencia a la flexión >2300 MPa $\pm$ 100 MPa, difusividad térmica >80 mm²/s $\pm$ 5 mm²/s.

Resistencia a la corrosión $<0,008$ mm/año $\pm$ 0,001 mm/año, coeficiente de expansión térmica $\sim 4,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ $\pm$ $0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Proceso de fabricación : Dispersión ultrasónica en fase líquida (potencia 200-400 W $\pm$ 10 W, tiempo 1-2 h $\pm$ 0,1 h) de grafeno mixto, sinterización SPS (1350°C $\pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, 60 MPa $\pm$ 1 MPa).

Sustrato de disipación de calor de alta resistencia de carburo de boro y carburo cementado de tungsteno y cobalto (WC-Co-B4C)

Composición : Matriz WC-Co dopada con carburo de boro (B4C, 5%-15% $\pm$ 1%), tamaño de partícula B4C 0,5-2 μm $\pm$ 0,1 μm , para mejorar la resistencia al desgaste y la resistencia a altas temperaturas.

Características profesionales :

La conductividad térmica es de 150-250 W/ m·K $\pm$ 10 W/ m· K , y el B4C contribuye con ~ 200 W/ m·K $\pm$ 10 W/ m· K .

Dureza HV 2000-2400 $\pm$ 30, resistencia al desgaste $<0,02$ mm³ / N · m $\pm$ 0,01 mm³ / N · m , resistencia a la compresión >5000 MPa $\pm$ 100 MPa.

Resistencia a altas temperaturas $>900^{\circ}\text{C}$ $\pm$ 20 $^{\circ}\text{C}$, pérdida de masa $<0,01\%$ $\pm$ 0,001% a 900°C $\pm$ 20 $^{\circ}\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ $\pm$ $0,5 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$.

Proceso de fabricación : HIP (1350°C $\pm$ 10 $^{\circ}\text{C}$, 200 MPa $\pm$ 5 MPa) combinado con predispersión B4C (ultrasonido 30-60 min $\pm$ 5 min), acabado superficial Ra $<0,1$ μm $\pm$ 0,01 μm .

Sustrato de disipación de calor resistente al desgaste de carburo cementado de tungsteno y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

cobalto-nitruro de titanio (WC-Co- TiN)

Composición : Matriz WC-Co dopada con nitruro de titanio (TiN , 5%-10% $\pm$ 0,5%), tamaño de partícula de TiN 0,5-1,5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, para mejorar la resistencia al desgaste y la conductividad térmica.

Características profesionales :

Conductividad térmica 120-200 W/ m·K ± 10 W/ m·K , TiN contribuye ~ 20 W/ m·K ± 5 W/ m·K (efecto auxiliar).

Dureza HV 1900-2200 ± 30 , resistencia al desgaste $< 0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, resistencia a la flexión $> 2100 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Resistencia a la corrosión $< 0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, resistencia a altas temperaturas $> 850^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Proceso de fabricación : SPS ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, 50 MPa ± 1 MPa) combinado con recubrimiento PVD TiN (espesor 5-15 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) , rectificado de precisión para optimizar la superficie.

2. Características del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

El rendimiento de las placas base de disipadores de calor de carburo cementado se logra mediante el diseño de materiales y la optimización de procesos. Sus características ofrecen ventajas significativas en entornos con alta carga térmica, tensión mecánica y corrosión:

Alta conductividad térmica

Rango: 100-350 W/ m·K ± 10 W/ m·K (dependiendo del tipo), los tipos mejorados con grafeno o SiC pueden alcanzar 300-350 W/ m·K ± 10 W/ m·K .

Mecanismo: El acoplamiento fonón-electrón de WC-Co (camino libre medio del fonón $\sim 100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) y la conductividad térmica reticular de SiC /h-BN (velocidad del fonón $\sim 10^4 \text{ m/s} \pm 10^3 \text{ m/s}$) funcionan sinérgicamente.

Ventajas: Tiempo de respuesta térmica $< 0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$, soporte de densidad de flujo de calor $> 100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$, adecuado para electrónica de alta potencia.

Estabilidad a altas temperaturas

Rango: $> 800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ (tipo TiC -TaC o B4C $> 1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), vida útil del ciclo térmico > 5000 veces ± 500 veces.

Mecanismo: La fase estable de alta temperatura de WC (punto de fusión $\sim 2870^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$) y el amortiguador plástico de la fase Co (límite elástico $\sim 500 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$) resisten conjuntamente el estrés térmico.

Ventajas: Buena adaptación a la expansión térmica ($< 5\% \pm 1\%$ con SiC / AlN) , grietas por fatiga térmica reducidas (longitud $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

Excelentes propiedades mecánicas

Dureza: HV 1700-2400 ± 30 , resistencia a la compresión 4000-5000 MPa $\pm 100 \text{ MPa}$, resistencia a la flexión 2000-2300 MPa $\pm 100 \text{ MPa}$.

Mecanismo: Fortalecimiento por dispersión de nanogranos ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y fases de refuerzo (como TiC , B4C), tenacidad a la fractura $10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Ventajas: Resistente a choques mecánicos ($> 1000 \text{ J/cm}^2 \pm 100 \text{ J/cm}^2$) , tolerancia a vibraciones > 50

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$g \pm 5 g$, adecuado para entornos de alta carga.

Estabilidad química y resistencia a la corrosión

Tasa de corrosión: $<0,005-0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, tipo TiC-TaC o grafeno $<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$.

Mecanismo: La capa de pasivación superficial (espesor $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) y la fase inerte (afinidad electrónica $\sim 0,87 \text{ eV} \pm 0,05 \text{ eV}$) resisten la corrosión ácida y alcalina.

Ventajas: Adecuado para entornos de electrolitos (pH 7-9) o agua de mar, migración de iones $<0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$.

Propiedades eléctricas (aislamiento opcional)

Resistividad: $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ (WC-Co puro), $>10^6 \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ (tipo AlN o TiN).

Mecanismo: El ancho de banda de AlN $\sim 6,2 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$ o las propiedades semiconductoras de TiN (ancho de banda $\sim 3,4 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$) proporcionan aislamiento y una resistencia a la ruptura $>15 \text{ kV/mm} \pm 1 \text{ kV/mm}$.

Ventajas: Soporta dispositivos de alto voltaje ($>1000 \text{ V} \pm 100 \text{ V}$), eficiencia de blindaje electromagnético $>90 \text{ dB} \pm 2 \text{ dB}$.

Procesamiento y personalización

Precisión: $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, rugosidad superficial $R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Mecanismo: SLM (espesor de capa $20-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$) o EDM (precisión $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) para lograr microestructuras (por ejemplo, microcanales $0,1-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$).

Ventajas: Admite diseños con formas especiales (error de superficie compleja $<0,02 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$), optimización de peso $12-15 \text{ g/cm}^3 \pm 0,5 \text{ g/cm}^3$.

3. Campos de aplicación del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

Los sustratos de disipadores de calor de carburo cementado se utilizan cada vez más en entornos hostiles y con alta carga térmica debido a sus propiedades integrales:

Aplicación en el campo de los vehículos de nuevas energías

Módulo de batería de potencia: tamaño $200-500 \text{ mm} \times 200-300 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$, gestiona una temperatura de $30-60^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, flujo de calor $>50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$.

Controlador de motor: admite IGBT (potencia $>100 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$), temperatura de unión $<125^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, resistencia térmica $<0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$.

Pila de carga: módulo de alto voltaje (corriente $>200 \text{ A} \pm 20 \text{ A}$, voltaje $>500 \text{ V} \pm 50 \text{ V}$), eficiencia de disipación de calor $>90\% \pm 2\%$.

Pilas de combustible de hidrógeno: Soporte para membrana de intercambio de protones (PEM, temperatura $60-80^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), potencia de gestión térmica $>20 \text{ W/cm}^2 \pm 2 \text{ W/cm}^2$.

Ventajas :

La rápida disipación del calor reduce el riesgo de fugas térmicas (gradiente de temperatura $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$) y la vida útil del ciclo es $>1000 \text{ veces} \pm 100 \text{ veces}$.

Resistencia a vibraciones $>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$, conforme a las normas de automoción (ISO 16750), vida mecánica $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$.

Anticorrosión electrolítica $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, protección IP67, reducción de peso $10-15\% \pm 2\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Electrónica aeroespacial

solicitud :

Sistemas de radar: Amplificadores de alta frecuencia (potencia $>50\text{ W} \pm 5\text{ W}$), -40°C a $150^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Componentes del satélite: paneles de control térmico ($100\text{-}300\text{ mm} \times 100\text{-}200\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$), flujo de calor espacial $>10\text{ W/m}^2 \pm 1\text{ W/m}^2$.

Unidad de control de vuelo: Procesador de soporte (potencia $>30\text{ W} \pm 3\text{ W}$), vibración $>20\text{ g} \pm 2\text{ g}$.

Ventajas :

Fluctuación de temperatura $\Delta T >200^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, expansión térmica compatible con aleación Invar $<5\% \pm 1\%$.

Resistencia a la corrosión por vacío $<0,005\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$, peso $<1\text{ kg} \pm 0,1\text{ kg}$.

Equipos de comunicación 5G

solicitud :

Módulo RF de estación base: potencia $>100\text{ W} \pm 10\text{ W}$, flujo de calor $>30\text{ W/cm}^2 \pm 3\text{ W/cm}^2$.

Conjunto de antenas: Placa multicanal ($300\text{-}600\text{ mm} \times 200\text{-}400\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$), frecuencia $3\text{-}5\text{ GHz} \pm 0,1\text{ GHz}$.

Repetidor miniaturizado: admite despliegue denso (potencia $>50\text{ W} \pm 5\text{ W}$), temperatura $<70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Ventajas :

Conductividad térmica $>200\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10\text{ W/m}\cdot\text{K}$, vida útil $>10^4\text{ h} \pm 10^3\text{ h}$.

Interferencia anti-electromagnética $>90\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$, densidad de integración $>100\text{ chips/m}^2 \pm 10\text{ chips/m}^2$.

Electrónica de potencia industrial

solicitud :

Inversor: MOSFET/IGBT (potencia $>200\text{ kW} \pm 20\text{ kW}$), resistencia térmica $<0,2\text{ K/W} \pm 0,02\text{ K/W}$.

Transformador: placa base de alta frecuencia ($200\text{-}400\text{ mm} \times 200\text{-}300\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$), frecuencia $10\text{-}50\text{ kHz} \pm 1\text{ kHz}$.

Rectificador: Admite módulos de alta corriente ($>300\text{ A} \pm 30\text{ A}$), temperatura $<100^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Ventajas :

Resistencia de alto voltaje $>1000\text{ V} \pm 100\text{ V}$, aislamiento $>10^6\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 10^5\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$.

Resistencia a vibraciones $>100\text{ g} \pm 10\text{ g}$, funcionamiento continuo $>10^5\text{ h} \pm 10^4\text{ h}$.

Equipos de fabricación de alta gama

solicitud :

Láser: Diodo de alta potencia (potencia $>50\text{ W} \pm 5\text{ W}$), flujo de calor $>20\text{ W/cm}^2 \pm 2\text{ W/cm}^2$.

Máquina CNC: placa de husillo ($300\text{-}500\text{ mm} \times 200\text{-}400\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$), velocidad $>10.000\text{ rpm} \pm 1000\text{ rpm}$.

Equipos semiconductores: Soporte de placas calefactoras de grabado (temperatura $200\text{-}400^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$), uniformidad térmica $<2^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas :

Dureza HV 1800-2300 $\pm$ 30, resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$.
Estabilidad térmica $>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, vida útil $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$.

Equipos electrónicos médicos

solicitud :

Imanes de resonancia magnética: favorecen el enfriamiento de imanes superconductores (temperatura $<20 \text{ K} \pm 2 \text{ K}$), flujo de calor $>10 \text{ W/cm}^2 \pm 1 \text{ W/cm}^2$.

Abladores por radiofrecuencia: placa de gestión térmica (tamaño $100\text{-}200 \text{ mm} \times 100\text{-}150 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), potencia $>50 \text{ W} \pm 5 \text{ W}$.

Ventajas :

Recubrimiento biocompatible (TiN , índice antibacteriano $>90\% \pm 2\%$), conductividad térmica $>150 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

Resistente a la radiación ($<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$), precisión $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Equipos de energía renovable

solicitud :

Inversor fotovoltaico: admite módulos de alta potencia (potencia $>150 \text{ kW} \pm 15 \text{ kW}$), temperatura $<90^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Unidad de control de energía eólica: placa de gestión térmica (tamaño $300\text{-}600 \text{ mm} \times 200\text{-}400 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$), vibración $>30 \text{ g} \pm 3 \text{ g}$.

Ventajas :

Conductividad térmica $>200 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, vida útil $>10^4 \text{ h} \pm 10^3 \text{ h}$.

Resistencia a la corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, adecuado para entornos exteriores (protección IP65).

4. Dirección de desarrollo futuro del sustrato de disipación de calor de carburo cementado

Optimización de materiales : Desarrollo de un compuesto de cuatro fases WC- SiC - AlN -Grafeno (SiC 20%-30% $\pm$ 2%, AlN 10%-20% $\pm$ 2%, Grafeno 1%-5% $\pm$ 0,5%), conductividad térmica $>400 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 10 \text{ W/m} \cdot \text{K}$.

de procesos : Fabricación de microcanales a múltiples escalas utilizando EBM (densidad de corriente del haz $>10^4 \text{ A/m}^2 \pm 10^3 \text{ A/m}^2$), resistencia térmica $<0,02 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$.

Inteligente : el termopar integrado (precisión $<0,05^\circ\text{C} \pm 0,01^\circ\text{C}$) y el algoritmo de IA optimizan la eficiencia de disipación de calor $>95\% \pm 2\%$.

Sostenibilidad : Reciclaje de polvo de WC-Co (tasa de reciclaje $>95\% \pm 2\%$) y sinterización verde (consumo de energía $<6 \text{ kWh/kg} \pm 1 \text{ kWh/kg}$).

Los sustratos de disipación térmica de carburo cementado tienen un gran potencial de aplicación en el sector de la alta tecnología. Su demanda en vehículos de nuevas energías, la industria aeroespacial y las comunicaciones 5G sigue creciendo. En el futuro, gracias a los compuestos multifásicos y la fabricación inteligente, se mejorará aún más el rendimiento de la gestión térmica y la competitividad en el mercado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Normas relacionadas para sustratos de disipación de calor de carburo cementado

Aún no se ha formado un sistema internacional completamente unificado y ampliamente reconocido, principalmente debido a la diversidad de sus áreas de aplicación (como vehículos de nuevas energías, aeroespacial, comunicaciones 5G, etc.) y al rápido desarrollo de la tecnología. A continuación, se presenta un resumen de las normas aplicables a los sustratos de disipación térmica de carburo cementado, según las prácticas industriales existentes y las normas de materiales pertinentes:

Normas generales de materiales

Requisitos técnicos generales para carburo cementado

Consulte la norma nacional china "GB/T 5242-2006 Condiciones técnicas generales para carburo cementado", que especifica la composición, las propiedades (como conductividad térmica, dureza, resistencia a la corrosión) y los requisitos de control de calidad del carburo cementado, y puede utilizarse como base para la selección de materias primas para sustratos de disipación de calor.

Propiedades de los materiales de gestión térmica

Los sustratos de disipación de calor deben cumplir con una alta conductividad térmica ($>100 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 10 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), un coeficiente de expansión térmica bajo ($<6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y resistencia mecánica (dureza HV 1800-2000 ± 30), que son ampliamente adoptados en la industria.

Normas relacionadas con la aplicación industrial

Normas de embalaje electrónico

Para los sustratos de disipación de calor de carburo utilizados en dispositivos electrónicos, consulte la "Especificación de material laminado IPC-4101", que incluye los requisitos de rendimiento térmico y estabilidad dimensional de los materiales de sustrato de alta conductividad térmica y es adecuada para el diseño de disipación de calor en paquetes microelectrónicos.

Campo de vehículos de nueva energía

Es posible que el sustrato de disipación de calor deba cumplir con las "Condiciones técnicas QC/T 1073-2020 para componentes de gestión térmica de baterías de energía de vehículos eléctricos", que tiene ciertos requisitos para la resistencia térmica ($<0,1 \text{ K/W} \pm 0,01 \text{ K/W}$), resistencia a la temperatura ($>800 ^\circ\text{C} \pm 20 ^\circ\text{C}$) y resistencia a la vibración ($>50 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$) de los materiales de gestión térmica.

Normas aeroespaciales

Consulte la Especificación de tratamiento térmico AMS 2750 o estándares militares similares para conocer la estabilidad térmica y la conductividad térmica de los materiales en entornos de alta temperatura, adecuados para sustratos de disipadores de calor de aviónica.

Normas internacionales de referencia

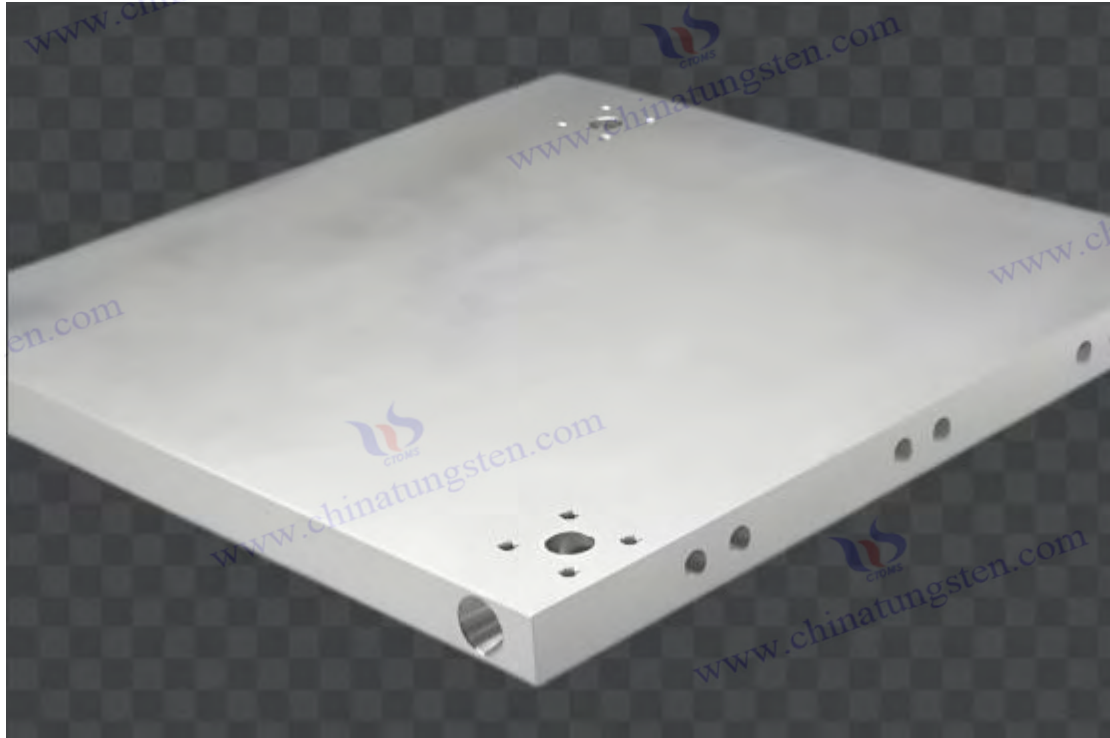
Normas ISO

La norma ISO 18514 (Prueba de conductividad térmica de compuestos cerámicos y metálicos) se puede utilizar para evaluar la conductividad térmica de los sustratos de disipadores de calor de carburo cementado; la norma ISO 17864 (Prueba de expansión térmica de cerámicas avanzadas) puede guiar las pruebas de coincidencia de expansión térmica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Normas ASTM

La norma ASTM E1461 (medición de difusividad térmica) se puede utilizar para verificar la eficiencia de gestión térmica de los sustratos disipadores de calor para aplicaciones de alto rendimiento.



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

¿Cuáles son las aplicaciones del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía?

Como material tradicional de alto rendimiento, el carburo cementado (cuyo núcleo es el sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co) ha ganado relevancia en la investigación de aplicaciones de catálisis y almacenamiento de energía en los últimos años, especialmente en el contexto del rápido desarrollo de la tecnología de conversión y almacenamiento de energía. Gracias a su excelente resistencia mecánica, resistencia a la corrosión, estabilidad a altas temperaturas y características únicas de estructura electrónica, el carburo cementado ha demostrado un gran potencial en electrocatálisis, catálisis térmica, pilas de combustible, supercondensadores y almacenamiento de energía de hidrógeno gracias a su combinación con aleaciones de alta entropía (HEA), nanotecnología y tecnología de funcionalización de superficies. Si bien su aplicación en el campo biomédico es más madura, la exploración del carburo cementado en el campo de la catálisis y el almacenamiento de energía sigue siendo vanguardista, abarcando intersecciones multidisciplinarias que incluyen ciencia de materiales, electroquímica, fisicoquímica y simulación computacional. A continuación, se detallarán las aplicaciones específicas del carburo cementado en estos campos, combinando los últimos avances de la investigación con detalles técnicos profesionales para ampliar su conocimiento.

Aplicaciones en catálisis

Reacción electrocatalítica

La aplicación del carburo cementado en el campo de la electrocatálisis se centra principalmente en la optimización catalítica de procesos clave en reacciones electroquímicas, como la reacción de reducción de oxígeno (ORR), la reacción de evolución de hidrógeno (HER) y la reacción de evolución de oxígeno (OER). Estas reacciones son la base de la energía del hidrógeno, las pilas de combustible y la tecnología de electrólisis del agua. Los catalizadores tradicionales de metales preciosos (como platino Pt, iridio Ir y rutenio Ru) están limitados por su alto coste y la escasez de recursos, mientras que el carburo cementado (especialmente WC y sus derivados) se ha convertido en un posible sustituto de metales no preciosos debido a su estructura electrónica de banda d similar al Pt y a su excelente estabilidad química.

Reacción de Reducción de Oxígeno (ORR) : El carburo cementado a base de WC-Co mejora significativamente el rendimiento catalítico de ORR al combinarse con aleaciones de alta entropía (como PtPdFeCoNi). El efecto de estabilización de la entropía y la distorsión reticular de las aleaciones de alta entropía mejoran la exposición de los sitios activos y la eficiencia de la transferencia de electrones. Por ejemplo, estudios han demostrado que la actividad másica y la actividad específica de las nanopartículas de PtPdFeCoNi a 0,9 V frente a RHE son de 0,25 A/mg_{Pt} y 0,12 mA/cm², respectivamente, que son 6,2 y 4,9 veces superiores a las del catalizador comercial de Pt/C al 20 %. Además, el WC como portador puede prevenir la aglomeración y oxidación de las nanopartículas de Pt. Las pruebas de durabilidad muestran que aún mantiene más del 90% de actividad después de 10.000 ciclos, lo que es mejor que el 70%-80% de Pt/C.

Reacción de evolución de hidrógeno (HER) y reacción de evolución de oxígeno (OER) : las nanoestructuras derivadas de carburo (p. ej., Ni₂₀Fe₂₀Mo₁₀Co₃₅Cr₁₅ HEA) exhiben un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

sobrepotencial bajo (aproximadamente 107 mV a 10 mA/cm²) y una pendiente de Tafel (<50 mV/dec) en HER, lo que indica una cinética de reacción rápida. Para OER, los materiales basados en WC-Co han optimizado la energía libre de adsorción (ΔG_{H^*} cercana a 0 eV) mediante dopaje superficial (p. ej., Ni o Fe), con un sobrepotencial de aproximadamente 300 mV a una densidad de corriente de 10 mA/cm² en electrolito alcalino (1 M KOH) y una estabilidad de hasta 50 horas, lo que los hace adecuados para la electrólisis de agua a gran escala para producir hidrógeno.

Aplicaciones : Estos catalizadores se utilizan ampliamente en celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC), electrolizadores alcalinos y sistemas de producción de hidrógeno impulsados por energía renovable.

División de agua y producción de hidrógeno

La división completa del agua ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$) es una tecnología fundamental para la producción sostenible de hidrógeno, y el carburo cementado ha demostrado potencial electrocatalítico bifuncional en este campo. En el estudio, se prepararon matrices de nanotubos huecos de CoS₂ derivados de carburo cementado mediante procesos de deposición en fase líquida y sulfuración como catalizadores bifuncionales para cátodo (HER) y ánodo (OER). En un electrolito de KOH 1,5 M, el voltaje de la celda fue de 1,67 V a una densidad de corriente de 10 mA/cm², que es mucho menor que el par tradicional IrO₂/Pt (1,8 V), y la eficiencia faradaica todavía estaba por encima del 95% después de 20 horas de funcionamiento continuo. El excelente rendimiento de este material se debe a su gran área de superficie específica (>100 m²/g) y a sus abundantes sitios de borde activo. Además, el catalizador basado en WC-Co se mejora aún más en conductividad y estabilidad al estar compuesto con nanotubos de carbono (CNT) o grafeno, lo que lo hace adecuado para dispositivos de división de agua impulsados por energía solar.

Reacción de reducción de CO₂ (CO₂RR) La

reducción de CO₂ es un medio importante para el reciclaje de carbono. Los materiales relacionados con el carburo cementado muestran potencial en CO₂RR al ajustar la estructura electrónica y la energía de adsorción de la superficie. Después de combinar aleaciones de alta entropía (como CuFeCoNiZn) con WC, se optimiza el equilibrio de adsorción/desorción de las moléculas de CO₂ y los intermediarios, y se generan hidrocarburos C₂⁺ (como etanol y etileno, eficiencia de Faraday > 60%) con alta selectividad. Los cálculos de la teoría funcional de la densidad (DFT) muestran que el desplazamiento descendente del centro de la banda d del sitio Cu mejora la reacción de acoplamiento *CO, mientras que la conductividad de WC (>100 S/cm) promueve la transferencia de electrones. En 2025, con el avance de los objetivos de neutralidad de carbono, este catalizador tiene amplias perspectivas en la captura y conversión de CO₂ a escala industrial.

Aplicación en el almacenamiento de energía

Tecnología de baterías La aplicación de

materiales basados en carburo cementado en nuevos sistemas de baterías se refleja principalmente en el desarrollo de materiales de electrodos, especialmente en baterías de litio-aire, baterías de zinc-aire y baterías de iones de litio.

Baterías de litio-aire : Los óxidos de espinela de alta entropía (como FeCoNiMnPtIr) como catalizadores catódicos reducen significativamente el sobrepotencial de recarga (<0,5 V frente a Li/Li⁺) y mantienen una retención de capacidad del 80 % (500 ciclos) a una densidad de corriente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de 1000 mA/g. Su efecto sinérgico multielemento optimiza la cinética de formación/descomposición de O_2^- y Li_2O_2 , lo que los hace adecuados para el almacenamiento de energía de alta densidad energética.

Baterías de zinc-aire : las nanopartículas derivadas de WC-Co han mejorado las actividades ORR y OER a través de la modificación de la superficie (como el dopaje con N), con un voltaje de circuito abierto de 1,45 V y un ciclo de vida de más de 200 horas, lo que las hace adecuadas para fuentes de alimentación de respaldo para vehículos eléctricos.

Baterías de iones de litio : Las aleaciones de alta entropía basadas en carburo cementado (como TiNbTaZrHf) como materiales de electrodos negativos exhiben una alta capacidad específica (>500 mAh/g) y una excelente estabilidad de ciclo (caída de capacidad $<10\%$ después de 1000 ciclos), y su alto efecto de entropía inhibe la expansión del volumen.

Las nanoaleaciones de alta entropía derivadas del carburo cementado para supercondensadores (como NiFeCoCuMn) se han desarrollado como materiales de electrodos para supercondensadores debido a su estructura porosa (porosidad del 50% al $70\% \pm 5\%$) y su alta superficie específica (>200 m²/

g). En un electrolito de 1 M H_2SO_4 , la capacitancia puede alcanzar los 300 F/g, la densidad de energía es de 20 Wh/kg, la densidad de potencia es de 500 W/kg y la estabilidad del ciclo es de hasta 10 000 veces (tasa de retención de capacidad $>90\%$). Su excelente rendimiento se atribuye a la transferencia de carga y la distorsión reticular entre múltiples elementos, lo que mejora la difusión iónica del electrolito y la capacidad de almacenamiento de carga, y es adecuado para la liberación instantánea de energía en vehículos híbridos.

Los materiales que combinan carburo cementado con aleaciones de alta entropía para el **almacenamiento de energía de hidrógeno (como**

los compuestos basados en CoCrFeNiTi) muestran un alto almacenamiento de hidrógeno ($>2\%$ en peso) y estabilidad estructural en el almacenamiento de energía de hidrógeno en estado sólido. Los materiales basados en WC-Co optimizan la disociación y difusión de moléculas de hidrógeno mediante la modificación de la superficie (como el recubrimiento de Pd, espesor $10-20$ nm ± 2 nm), con un rango de temperatura de funcionamiento de $25-300$ °C ± 10 °C y una vida útil del ciclo de absorción/deshidrogenación de hidrógeno de más de 100 veces. Combinado con una estructura nanoporosa (tamaño de poro $5-20$ nm ± 1 nm), este material es adecuado para dispositivos móviles de almacenamiento de energía y tanques de almacenamiento de hidrógeno para vehículos de celdas de combustible de hidrógeno (FCEV), y se encuentra en la etapa piloto industrial en 2025.

Ventajas y desafíos técnicos

Ventajas :

Estabilidad mecánica y química : La alta dureza (HV $1800-2000 \pm 30$) y resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año) del sistema WC-Co hacen que funcione bien en entornos hostiles.

Rentabilidad : El carburo cementado combinado con una aleación de alta entropía puede reducir significativamente la **cantidad** de metales preciosos utilizados (carga de Pt hasta $5\% \pm 1\%$), lo que reduce los costos del catalizador.

Ajustabilidad : La estructura electrónica y las propiedades de la superficie del carburo cementado se pueden controlar con precisión mediante dopaje de elementos (como TiC, TaC) o ingeniería de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

superficies.

desafío :

Complejidad de síntesis : La preparación de aleaciones y nanoestructuras de alta entropía requiere un control preciso de la composición y las condiciones de tratamiento térmico (como SPS $1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, HIP $1300\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$), y el costo del proceso es elevado.

Limitación del sitio activo : La inercia de la superficie del WC limita su actividad catalítica inherente, y debe recurrirse al nanoescalado o al compuesto para aumentar el área de superficie específica ($<100\text{ m}^2/\text{g}$).

Deficiencias de la investigación : se necesitan más datos para respaldar la estabilidad a largo plazo de las aleaciones de alta entropía en entornos atómicos complejos, y la simulación DFT y el aprendizaje automático necesitan mayor verificación.

Dirección de desarrollo futuro

Con la aceleración de la transformación energética en 2025, la aplicación del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía se centrará en las siguientes direcciones:

Nanoingeniería : Desarrollar nanopartículas ultrafinas ($<10\text{ nm} \pm 1\text{ nm}$) y estructuras porosas para aumentar la densidad del sitio activo.

Diseño inteligente : acelere la optimización del material mediante el uso del aprendizaje automático para predecir la composición óptima de la aleación y los esquemas de modificación de la superficie.

Sostenibilidad : Desarrollar formulaciones de carburo cementado con bajo contenido de cobalto o sin cobalto que cumplan con los estándares medioambientales RoHS y REACH.

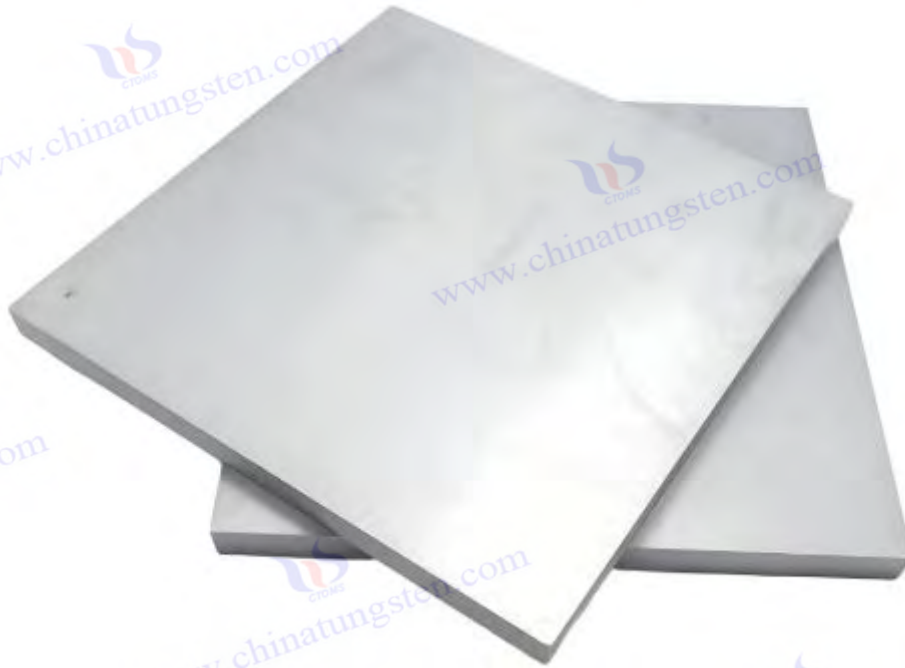
Aplicación integrada : integre catalizadores de carburo con sistemas de almacenamiento de energía (como sistemas híbridos de supercondensadores y celdas de combustible) para mejorar la eficiencia general.

El potencial del carburo cementado en los campos de la catálisis y el almacenamiento de energía se está liberando gradualmente mediante la investigación colaborativa multidisciplinaria. Especialmente en el marco de los objetivos de la economía del hidrógeno y la neutralidad de carbono, su papel como material puente que conecta las industrias tradicionales con las tecnologías energéticas emergentes cobra cada vez mayor importancia.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

¿Cuáles son las aplicaciones del carburo cementado en el campo médico?

Como material de ingeniería de alto rendimiento, el carburo cementado (representado por el sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co) ha atraído cada vez más la atención del mundo académico y la industria por sus excelentes propiedades mecánicas, estabilidad química y potencial biocompatibilidad en el campo médico. El carburo cementado es conocido por su altísima dureza (rango de dureza HV 1800-2000 $\pm$ 30, aproximadamente 9-10 en la escala de dureza de Mohs), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$) y capacidad de ajuste del rendimiento que se puede lograr mediante ingeniería de superficies y dopaje de elementos, lo que lo convierte en un material fundamental en ortopedia, odontología, cardiovascular, neurocirugía y otros campos. En los últimos años, gracias al avance de las tecnologías de fabricación avanzadas (como la fabricación aditiva y la nanotecnología) y la funcionalización de superficies, el ámbito de aplicación del carburo cementado se ha ampliado desde las herramientas quirúrgicas tradicionales hasta los implantes y andamios de ingeniería de tejidos, mostrando un importante valor clínico y potencial para la investigación científica. A continuación, se explicará de forma exhaustiva y detallada la aplicación del carburo cementado en el campo médico desde la perspectiva de los escenarios de aplicación, los requisitos técnicos, los procesos de fabricación, los fundamentos de la ciencia de los materiales y las futuras líneas de investigación desde una perspectiva académica y profesional.

Aplicación de carburo cementado en implantes ortopédicos

En el campo de la ortopedia, el carburo cementado se utiliza principalmente en prótesis de cadera, reemplazos de rodilla, dispositivos de fijación espinal y dispositivos de fusión articular, satisfaciendo necesidades clínicas como la fijación de fracturas, el reemplazo articular, la corrección espinal y la reconstrucción ósea. El diseño de estos implantes debe garantizar la compatibilidad biomecánica, la estabilidad a largo plazo y una integración perfecta con los tejidos del huésped.

Prótesis de cadera de carburo

La prótesis de cadera de carburo se utiliza para tratar la osteoartritis avanzada, la necrosis aséptica de la cabeza femoral, la deformidad después de una fractura de cadera o la displasia congénita de cadera mediante artroplastia total de cadera (ATC). Sus componentes principales incluyen vástago femoral y copa acetabular, que generalmente están hechos de fórmula WC-6Co (contenido de cobalto $6\% \pm 1\%$, contenido de tungsteno $94\% \pm 1\%$) mediante sinterización por plasma de chispa (SPS, $1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $50 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) o prensado isostático en caliente (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) para lograr una alta densidad (porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$) y una estructura de nanograno uniforme ($0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Requisitos técnicos :

Propiedades mecánicas: Resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) para hacer frente a cargas cíclicas de largo plazo ($>1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como caminar durante aproximadamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$10^6 - 10^7$ ciclos, equivalente a 10-15 años de actividades diarias), y resistencia a la compresión >4000 MPa ± 100 MPa para soportar la fuerza axial del cuello femoral.

Estabilidad química: Resistencia a la corrosión ($<0,01$ mm/año $\pm 0,001$ mm/año) resiste la corrosión electroquímica de los iones cloruro (Cl^- , concentración alrededor de 100-150 mM) en fluidos corporales, proteínas y enzimas.

Biocompatibilidad: Viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$ (prueba de citotoxicidad in vitro según ISO 10993-5), integración ósea $>95\% \pm 2\%$ (a través de hidroxiapatita, $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$, recubrimiento o estructura porosa, tamaño de poro $100-400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$, promoviendo la unión de osteoblastos y el crecimiento óseo).

de TiN (espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) aplicado por deposición física de vapor (PVD, $400-600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) redujo el coeficiente de fricción ($<0,2 \pm 0,05$), redujo las partículas de desgaste del revestimiento de polietileno ($<0,001 \text{ mm}^3/\text{ciclo} \pm 0,0001 \text{ mm}^3/\text{ciclo}$) y redujo la inflamación periprotésica (niveles de IL-6 $<10 \text{ pg/ml} \pm 1 \text{ pg/ml}$).

Duración de vida: >10 años ± 1 año, aproximadamente 10^6 ciclos de caminata, adecuado para pacientes mayores de 60 a 80 años o personas con altos niveles de actividad.

Escenarios de aplicación : Ampliamente utilizado en pacientes de edad avanzada con osteoporosis (puntuación T de densidad ósea $<-2,5$ DE) o pacientes jóvenes con alta actividad (como atletas), especialmente en escenarios con altas cargas de cadera ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$).

Reemplazo de rodilla de carburo El

reemplazo de rodilla de carburo es un procedimiento utilizado para tratar la osteoartritis, la artritis reumatoide o un traumatismo severo en la rodilla (como un desgarro de menisco) reemplazando el extremo inferior del fémur, la meseta tibial y la superficie rotuliana.

Requisitos técnicos :

Propiedades mecánicas: Soporta cargas dinámicas ($>1500 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$, como ponerse en cuclillas o subir escaleras), resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) reduce la tasa de desgaste anual del revestimiento de polietileno ($<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), y la resistencia a la fatiga ($>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces) puede hacer frente a aproximadamente 1 millón de ciclos de flexión y extensión por año.

Biocompatibilidad: Viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, integración ósea $>95\% \pm 2\%$ (mejorada por superficie porosa o factores de crecimiento como BMP-2).

Optimización de la superficie: los nanogranos ($0,5-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejoran la microuniformidad, el recubrimiento PVD ZrN ($5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) mejora la dureza de la superficie ($>\text{HV } 1900 \pm 30$), el pulido químico-mecánico (CMP) controla la rugosidad ($\text{Ra} <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y reduce la respuesta inflamatoria (IL-6 $<10 \text{ pg/mL} \pm 1 \text{ pg/mL}$).

Duración de vida: >10 años ± 1 año, adecuado para personas activas de 50 a 70 años o pacientes con obesidad severa ($\text{IMC} >30 \text{ kg/m}^2$).

Escenarios de aplicación : Adecuado para pacientes con degeneración grave de la rodilla (grado III-IV de Kellgren-Lawrence) o deformidad postraumática.

Los dispositivos de fijación espinal de carburo

incluyen tornillos pediculares y sistemas de varillas utilizados para la corrección de la escoliosis, la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fijación de fracturas por compresión vertebral o la fusión espinal (como la fusión lumbar).

Requisitos técnicos :

Propiedades mecánicas: resistencia a la compresión ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$), soporte vertebral, resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$) para reducir el desgaste entre la rosca y el tejido óseo, y proporcionar resistencia a la fatiga ($>10^6 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$) para hacer frente al estrés dinámico ($>2000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$).

Biocompatibilidad: Tasa de integración ósea $>95\% \pm 2\%$ (tiempo de fusión 3-6 meses ± 1 mes).

Tratamiento de superficie: el proceso HIP ($1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) garantiza una porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$ (microporos $<0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), el dopaje con ZrC ($0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$) mejora la resistencia a la oxidación ($<0,01\% \pm 0,001\%$) y el pulido de superficie ($R_a <0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la resistencia de unión interfacial ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).

Esperanza de vida: $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$.

Escenarios de aplicación : Adecuado para pacientes de entre 20 y 60 años con enfermedades de la columna, como escoliosis idiopática adolescente (ángulo de Cobb $>40^\circ$) o fracturas osteoporóticas en ancianos.

Los dispositivos de fusión de articulaciones de carburo

se utilizan para la fusión de las articulaciones de la muñeca, el tobillo o la columna vertebral para tratar la anquilosis, la artritis degenerativa grave o la inestabilidad traumática.

Requisitos técnicos :

Biocompatibilidad: Tasa de integración ósea $>95\% \pm 2\%$ (tiempo de fusión 6-12 meses ± 1 mes).

Propiedades mecánicas: Resistencia al desgaste ($<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), resistencia a la fatiga ($>10^6 \text{ veces} \pm 10^4 \text{ veces}$) y resistencia a la presión local ($>1000 \text{ N} \pm 10 \text{ N}$).

Ingeniería de superficies: proceso SPS ($1400^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) combinado con nanorrecubrimiento de Ag ($2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, liberación de $\text{Ag}^+ <0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$) para mejorar las propiedades antibacterianas ($>90\% \pm 2\%$) y la biocompatibilidad.

Esperanza de vida: $>10 \text{ años} \pm 1 \text{ año}$.

Escenario de aplicación : Adecuado para pacientes de entre 30 y 60 años con enfermedades articulares, como anquilosis de muñeca o inestabilidad del tobillo.

Aplicación de carburo cementado en implantes dentales

Los implantes dentales de carburo se utilizan para reparar la pérdida de un solo diente, la pérdida de múltiples dientes o el edentulismo completo, reemplazando las raíces de los dientes naturales para sostener coronas, puentes de implantes o dentaduras postizas completas.

Requisitos técnicos :

Precisión mecánica: La desviación de procesamiento $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ (juego de rosca $<0,005 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) garantiza un ajuste perfecto con el hueso alveolar.

Estabilidad química: Resistencia a la corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, resistente a la acidez y a los metabolitos bacterianos en la saliva oral (pH 5-7).

Biocompatibilidad: Viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$ (prueba de osteoblastos y fibroblastos), antibacteriano $>90\% \pm 2\%$ (por liberación de $\text{Ag}^+ <0,01 \mu\text{g} / \text{cm}^2 \pm 0,001 \mu\text{g} / \text{cm}^2$ inhibe patógenos).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

periodontales).

Optimización estructural: el proceso SPS ($1400\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) controla la porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$ (tamaño de poro de la superficie porosa $50-200\text{ }\mu\text{m} \pm 20\text{ }\mu\text{m}$) para promover el crecimiento óseo.

Esperanza de vida: $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$, sujeto a cargas masticatorias ($>500\text{ N} \pm 10\text{ N}$).

Escenario de aplicación : Adecuado para personas de entre 30 y 60 años con dientes faltantes, como pérdida de un solo diente debido a periodontitis o edentulismo completo en ancianos.

Aplicación de carburo cementado en implantes cardiovasculares

Los stents cardiovasculares de carburo se utilizan para tratar la enfermedad cardíaca aterosclerótica coronaria o el infarto agudo de miocardio y para sostener la luz durante la intervención coronaria percutánea (ICP).

Requisitos técnicos :

Estabilidad química: Resistencia a la corrosión $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$ (evitando la liberación de iones Co o W $<0,1\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01\text{ }\mu\text{g}/\text{cm}^2$), probada en sangre a $\text{pH } 7,4 \pm 0,2$, $37^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Biocompatibilidad: Viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, bajo riesgo trombótico ($\text{IL-6} <10\text{ pg}/\text{mL} \pm 1\text{ pg}/\text{mL}$).

Ingeniería de superficies: el dopaje con TaC ($0,5\%-2\% \pm 0,1\%$) mejora la resistencia a la corrosión ($<0,008\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$), el recubrimiento PVD TiN ($5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) mejora la tasa de integración de la pared vascular ($>95\% \pm 2\%$).

Vida útil: $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$, espesor de pared del stent $0,08-0,12\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$.

Escenario de aplicación : Adecuado para pacientes con enfermedades cardiovasculares de entre 40 y 70 años, con un diámetro de stent de 2 a 4 mm, para el tratamiento de lesiones de la arteria coronaria con estenosis $>70\%$.

Aplicación de carburo cementado en implantes de neurocirugía

Las placas de reparación de cráneo de carburo se utilizan para la reconstrucción de defectos craneales traumáticos, resección de tumores o defectos congénitos.

Requisitos técnicos :

Biocompatibilidad: Viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, evitando inflamación del tejido cerebral o cicatrización glial.

Estabilidad térmica: El bajo coeficiente de expansión térmica ($<6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) coincide con el cráneo ($7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), el dopaje con TiC ($2\%-5\% \pm 0,5\%$) mejora la estabilidad a altas temperaturas ($>600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$).

Estabilidad química: Resistencia a la corrosión $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$, resistencia a los electrolitos del líquido cefalorraquídeo.

de superficies: recubrimiento PVD (p. ej. TiN, $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) con rugosidad controlada ($R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) para reducir la adhesión tisular.

Vida útil: $>10\text{ años} \pm 1\text{ año}$, admite personalización de impresión 3D (espesor $0,5-2\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$).

Escenario de aplicación : Adecuado para pacientes de 10 a 70 años con lesiones en el cráneo, como

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

defectos en el cráneo causados por accidentes automovilísticos.

Aplicación de carburo cementado en herramientas quirúrgicas

Otra aplicación importante del carburo cementado en el campo médico es la fabricación de herramientas quirúrgicas de alto rendimiento, incluyendo taladros óseos, sierras óseas, herramientas de corte, instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos (como tijeras endoscópicas), electrodos neuroquirúrgicos y bisturís dentales. Estas herramientas se utilizan ampliamente en muchos campos, como ortopedia, neurocirugía, odontología y cirugía general, satisfaciendo las diversas necesidades, desde la fijación de fracturas hasta la cirugía mínimamente invasiva. Con su excelente dureza, resistencia al desgaste, resistencia a la fatiga y potencial antibacteriano, el carburo cementado se ha convertido en un material alternativo ideal para las herramientas tradicionales de acero inoxidable (grado 304, HV 200-400 $\pm$ 20) o aleación de titanio (Ti-6Al-4V, HV 300-350 $\pm$ 20), especialmente en cirugías complejas que requieren alta precisión, larga vida útil y propiedades antibacterianas. A continuación, se detallarán sus características técnicas, proceso de fabricación, fundamento científico de los materiales, escenarios de aplicación y futuras líneas de investigación.

Requisitos técnicos y características de rendimiento de las herramientas quirúrgicas de carburo cementado

Las herramientas quirúrgicas de carburo deben cumplir con los siguientes estrictos estándares técnicos para garantizar que funcionen bien en entornos médicos de alta intensidad y alta frecuencia y cumplan con los requisitos del entorno fisiológico humano:

Alta dureza: El rango de dureza es HV 1800-2000 $\pm$ 30, logrado por el sistema WC-Co (contenido de Co 6%-8% $\pm$ 1%), que está cerca de la dureza del diamante (HV 7000-8000 $\pm$ 500), significativamente mejor que el acero inoxidable o la aleación de titanio, y puede cortar eficazmente el hueso cortical (dureza HV 500-700 $\pm$ 50) o tejido duro (como el esmalte, HV 300-400 $\pm$ 20).

Alta precisión: la desviación de procesamiento se controla a $<0,01$ mm $\pm$ 0,001 mm, lo que garantiza una precisión a nivel de micrones en operaciones quirúrgicas, como el posicionamiento de electrodos neuroquirúrgicos en tejido cerebral (error $<0,05$ mm $\pm$ 0,01 mm) o el grabado fino de cuchillos para tallado dental (profundidad de corte $<0,1$ mm $\pm$ 0,01 mm).

Resistencia a la fatiga: la vida útil por fatiga supera 10^6 veces $\pm$ 10^4 veces, optimizada por nanogranos (0,5-1 μ m $\pm$ 0,01 μ m) y estructura multifásica (partículas WC incrustadas en fase Co), adecuada para uso repetido de alta frecuencia, como operación a largo plazo de taladros para huesos bajo rotación de alta velocidad (>1000 rpm, torque $>0,5$ N·m $\pm$ 0,05 N·m), límite de fatiga >1000 MPa $\pm$ 50 MPa.

Propiedad antibacteriana: tasa de inhibición bacteriana $>90\%$ $\pm$ 2%, mediante la aplicación superficial de un recubrimiento de nano Ag (espesor 2-5 μ m $\pm$ 0,1 μ m, liberación de Ag⁺ $<0,01$ μ g/cm² $\pm$ 0,001 μ g/cm²) o un recubrimiento de TiN inhibe el crecimiento de Staphylococcus aureus y Escherichia coli, reduciendo el riesgo de infección posoperatoria ($<1\%$ $\pm$ 0,5%), de acuerdo con los estándares de prueba antimicrobiana ISO 22196.

Afilado: Fuerza de corte $<0,5$ N $\pm$ 0,05 N, rugosidad del borde (Ra $<0,05$ μ m $\pm$ 0,01 μ m) controlada

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mediante pulido químico-mecánico (CMP) para garantizar un daño reducido al tejido blando (módulo elástico $0,1-1 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$) durante el corte y suavidad de la incisión $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Gestión térmica: Conductividad térmica $>120 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (mucho más alta que el acero inoxidable $16 \text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 2 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), resistencia térmica reducida por optimización de grano y recubrimiento PVD ($<0,1 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W} \pm 0,01 \text{ K}\cdot\text{cm}^2/\text{W}$), a $50 \text{ W/cm}^2 \pm 5 \text{ W/cm}^2$ Uniformidad de temperatura de superficie bajo carga $<5^\circ\text{C} \pm 0,5^\circ\text{C}$ para evitar daño térmico al tejido ($>43^\circ\text{C}$ puede causar desnaturalización de proteínas).

Tipos y aplicaciones de herramientas médicas quirúrgicas de carburo cementado

Broca de carburo para huesos

Aplicación: Para la fijación de fracturas o la instalación de implantes ortopédicos, perforando en hueso cortical (espesor $2-5 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$) o hueso esponjoso (porosidad $50\%-90\% \pm 5\%$) a alta velocidad de rotación ($>1000 \text{ rpm}$, torque $>0,5 \text{ N}\cdot\text{m} \pm 0,05 \text{ N}\cdot\text{m}$).

Características: Fórmula WC-6Co, dureza HV 1850 ± 30 , diámetro de broca $1,5-6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, precisión de mecanizado $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, revestimiento antibacteriano (como Ag, espesor $2-5 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) reduce eficazmente el riesgo de osteomielitis (tasa de infección $<1\% \pm 0,5\%$) y daño térmico.

Escenario: Perforación y fijación de vástagos femorales en cirugía de reemplazo de cadera o colocación de tornillos pediculares en cirugía de columna (profundidad de rosca $30-40 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$).

Sierra de carburo para huesos

Aplicación: Para resección o remodelación ósea, como osteotomía (velocidad de corte $1-2 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$) o resección de tumores (volumen de resección $> 10 \text{ cm}^3 \pm 1 \text{ cm}^3$).

de sierra, fuerza de corte $<0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$, resistencia al desgaste $<0,05 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N}\cdot\text{m}$, recubrimiento PVD ZrN ($5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) mejora la durabilidad (>500 usos ± 50 veces), adecuado para cortar tejido óseo con dureza HV 600 ± 50 .

Escenario: Remodelación de la meseta tibial durante un reemplazo de rodilla o una amputación de emergencia durante una cirugía traumatológica (tiempo de corte $<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$).

herramientas de corte de carburo

Aplicación: Se aplica a la resección de tejidos blandos o modelado delicado, como la resección de tumores cerebrales (profundidad de corte $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) o muestreo de tejido (volumen de muestra $0,5-1 \text{ cm}^3 \pm 0,1 \text{ cm}^3$).

Características: Agudeza del filo de corte $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, resistencia a la fatiga $>10^6$ veces $\pm 10^4$ veces, tasa antibacteriana del recubrimiento de Ag $>90\% \pm 2\%$ (tasa de inhibición contra MRSA $>95\% \pm 1\%$), fuerza de corte $<0,5 \text{ N} \pm 0,05 \text{ N}$.

Escenario: Resección de glioma neuroquirúrgico o preparación de colgajo de cirugía plástica (espesor $0,2-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$).

Instrumentos quirúrgicos mínimamente invasivos de carburo (como tijeras endoscópicas)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Aplicación: Para la separación y resección de tejidos (por ejemplo, seccionamiento del hígado o recorte de ligamentos) durante cirugía laparoscópica o artroscópica.

Características: Longitud $20-40\text{ cm} \pm 1\text{ cm}$, precisión de la punta $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, resistencia a la corrosión $<0,01\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$ (probado en solución de NaCl al 0,9%), el revestimiento de TiN reduce la fricción ($<0,2 \pm 0,05$), adecuado para funcionar a una temperatura corporal de $37\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ (estabilidad térmica $>200\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$).

Escenario: Recorte de menisco artroscópico (longitud de corte $10-20\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) o apendicectomía laparoscópica (tiempo de operación $<15\text{ min} \pm 1\text{ min}$).

Electrodos de carburo para neurocirugía

Aplicación: Para estimulación cerebral profunda (ECP) para tratar la enfermedad de Parkinson o la epilepsia, o para registrar señales neuronales (frecuencia de muestreo $>1\text{ kHz} \pm 0,1\text{ kHz}$).

Características: Diámetro $0,5-1\text{ mm} \pm 0,05\text{ mm}$, conductividad $>100\text{ S/cm}$ (resistividad $<0,01\text{ }\Omega\cdot\text{cm} \pm 0,001\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$), biocompatibilidad (viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$, unión neuronal $>90\% \pm 2\%$), rugosidad superficial $R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, reduce la inflamación del tejido cerebral ($\text{IL-6} <10\text{ pg/mL} \pm 1\text{ pg/mL}$).

Escenario: Implantación de DBS en pacientes con enfermedad de Parkinson (profundidad del electrodo $5-10\text{ mm} \pm 0,5\text{ mm}$) o localización de foco epiléptico (resolución espacial $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Cuchillo de carburo para tallado dental

Aplicación: Para restauraciones dentales (como empastes de resina) o conformación de tejido periimplantario (profundidad de corte $<0,2\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$).

Características: precisión del filo de corte $<0,01\text{ mm} \pm 0,001\text{ mm}$, fuerza de corte $<0,5\text{ N} \pm 0,05\text{ N}$, propiedad antibacteriana del recubrimiento de Ag $>90\% \pm 2\%$ (inhibe el patógeno periodontal Porphyromonas gingivalis), resistencia a la carga de masticación ($>500\text{ N} \pm 10\text{ N}$).

Escenario: Conformación del margen de la corona o preparación del lecho del implante (diámetro $3-5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$).

Proceso de fabricación y tratamiento de superficies

Proceso de preparación : Las herramientas quirúrgicas de carburo se fabrican generalmente mediante procesos SPS ($1400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $50\text{ MPa} \pm 1\text{ MPa}$) o HIP ($1300\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, $200\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$) para garantizar un tamaño de grano de $0,5-1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ y una porosidad de $<0,1\% \pm 0,01\%$ (microdefectos $<0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$). La fabricación aditiva (fusión selectiva por láser, SLM, espesor de capa $20-50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, potencia del láser $200-400\text{ W} \pm 10\text{ W}$) admite la personalización de geometrías complejas, como el diseño curvo de instrumentos mínimamente invasivos o la estructura microporosa de los electrodos.

Tratamiento de superficie: Se aplica un recubrimiento de TiN, ZrN o Ag (espesor $2-15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) mediante PVD ($400-600\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, velocidad de deposición $0,1-0,5\text{ }\mu\text{m/min} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m/min}$) o CVD ($800-1000\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$, concentración de vapor $10-20\text{ vol}\% \pm 1\text{ vol}\%$), y la rugosidad se controla ($R_a <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) mediante pulido químico mecánico (CMP, presión $5-10\text{ kPa} \pm 0,5\text{ kPa}$) para optimizar la nitidez y las propiedades antibacterianas. La limpieza con plasma ($500\text{ W} \pm$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50 W, 5-10 min $\pm$ 0,5 min, atmósfera de Ar /O₂) elimina la capa de óxido ($<0,01 \mu\text{m} \pm 0,001 \mu\text{m}$) y mejora la limpieza de la superficie y la fuerza de adhesión ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$).

Fundamentos de la ciencia de los materiales

Microestructura: partículas WC (dureza HV 2200 ± 50) incrustadas en la fase Co (módulo de tenacidad $200\text{-}300 \text{ GPa} \pm 20 \text{ GPa}$), formando un efecto de fortalecimiento compuesto, energía del límite de grano $<0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,05 \text{ J/m}^2$ Mayor resistencia al agrietamiento.

Estructura electrónica: El centro de la banda d del WC está cerca del nivel de Fermi ($-1,5 \text{ eV} \pm 0,1 \text{ eV}$), similar al metal noble Pt, lo que le confiere una potencial inercia biológica.

Química de la superficie: la liberación de Ag⁺ logra propiedades antibacterianas a través del intercambio iónico (coeficiente de difusión $10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$) y el recubrimiento de TiN forma enlaces Ti-O (energía de enlace $460 \text{ kJ/mol} \pm 10 \text{ kJ/mol}$) para mejorar la resistencia a la corrosión.

Escenarios de aplicación y ventajas clínicas

Cirugía ortopédica: Los taladros y sierras para huesos reducen el tiempo de corte ($<5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min/tiempo}$), mejoran la eficiencia quirúrgica ($>20 \% \pm 2 \%$) y reducen la lesión térmica intraoperatoria ($<40 ^\circ\text{C} \pm 1 ^\circ\text{C}$) en el reemplazo de cadera y rodilla y la corrección espinal.

Neurocirugía: Los electrodos e instrumentos mínimamente invasivos favorecen la precisión de la DBS ($<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, resolución espacial $<0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) y reducen el riesgo de lesión nerviosa ($<1 \% \pm 0,5 \%$).

3-6 meses $\pm$ 0,5 meses) en la instalación del implante.

Ventajas: En comparación con las herramientas tradicionales, las herramientas de carburo tienen una vida útil 2-3 veces más larga ($>500 \text{ usos} \pm 50 \text{ veces}$), las propiedades antibacterianas reducen las tasas de infección ($<1\% \pm 0,5\%$) y son adecuadas para cirugías de alto riesgo (como reparación de fracturas abiertas).

Futuras direcciones de investigación

Nano-mejora: Desarrollo de nano-bordes $<10 \text{ nm}$ (área superficial $>200 \text{ m}^2/\text{g} \pm 20 \text{ m}^2/\text{g}$), mejorando la eficiencia de corte ($>30\% \pm 2\%$) y la durabilidad ($>1000 \text{ veces} \pm 50 \text{ veces}$).

Inteligente: el sensor de temperatura integrado (precisión $<0,1 ^\circ\text{C} \pm 0,01 ^\circ\text{C}$, tiempo de respuesta $<0,1 \text{ s} \pm 0,01 \text{ s}$) monitorea los efectos térmicos y optimiza la seguridad quirúrgica.

Optimización de la biocompatibilidad: reducir el contenido de Co ($<5\% \pm 0,5\%$) y reemplazarlo con Ni (umbral de toxicidad $<0,1 \text{ mg/L} \pm 0,01 \text{ mg/L}$) o Cr (antioxidante $<0,01\% \pm 0,001\%$) para cumplir con los estándares medioambientales RoHS y REACH.

Personalización: utilice tecnología de impresión 3D (espesor de capa de $10 \text{ a } 30 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, precisión de impresión $<0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$) para producir herramientas personalizadas que se adapten a estructuras anatómicas complejas (como trayectorias de electrodos cerebrales profundos).

Sostenibilidad: Desarrollo de procesos bajos en carbono (reducción del consumo energético $>10\% \pm 2\%$, emisiones de CO₂ $<5 \text{ kg/pieza} \pm 0,5 \text{ kg/pieza}$), alimentados por energía solar o eólica.

Otras aplicaciones potenciales del carburo cementado en el campo médico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Andamios de ingeniería de tejidos

La estructura porosa del carburo cementado (porosidad $30\%-50\% \pm 5\%$, tamaño de poro $100-500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) se puede utilizar como andamio para la ingeniería de tejidos óseos, combinada con proteína morfogenética ósea (BMP-2, concentración $10-50 \mu\text{g}/\text{mL} \pm 5 \mu\text{g}/\text{mL}$) o factor de crecimiento endotelial vascular (VEGF) para promover la regeneración ósea (nueva masa ósea $>70\% \pm 5\%$).

Portador de liberación de fármacos

Después de la modificación de la superficie, se pueden cargar antibióticos (como vancomicina, tasa de liberación $0,1-0,5 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$) o medicamentos antiinflamatorios (como dexametasona, período de liberación $>7 \text{d} \pm 1 \text{d}$) para el tratamiento de liberación sostenida de la infección o inflamación (tasa de inhibición $>90\% \pm 2\%$).

Proceso de fabricación y tratamiento superficial del carburo cementado

Proceso : SPS y HIP garantizan una alta densidad (porosidad $<0,1\% \pm 0,01\%$, densidad $>99\% \pm 0,5\%$), la fabricación aditiva (SLM, espesor de capa $20-50 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$, velocidad de escaneo $500-1000 \text{mm/s} \pm 50 \text{mm/s}$) admite un diseño personalizado.

Recubrimiento : TiN aplicado mediante PVD/CVD, Recubrimiento de ZrN o Ag (espesor $5-15 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, tasa de deposición $0,1-0,5 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,05 \mu\text{m}/\text{min}$) con biocompatibilidad optimizada (tasa de adhesión celular $>95\% \pm 2\%$) y propiedades antibacterianas (tasa de inhibición $>90\% \pm 2\%$).

Dirección futura del desarrollo de las aplicaciones médicas del carburo cementado

Nano- optimización : Desarrollo de nanopartículas $<10 \text{nm}$ (área superficial $>200 \text{m}^2/\text{g} \pm 20 \text{m}^2/\text{g}$) para mejorar la actividad superficial de implantes y herramientas.

Biocompatibilidad mejorada : contenido reducido de Co ($<5\% \pm 0,5\%$), reemplazado por Ni o Cr, liberación reducida de iones de metales pesados ($<0,1 \mu\text{g}/\text{cm}^2 \pm 0,01 \mu\text{g}/\text{cm}^2$).

Inteligente : los sensores integrados monitorean la tensión del implante ($<10 \text{MPa} \pm 1 \text{MPa}$) o la temperatura de la herramienta ($<40^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) para brindar retroalimentación en tiempo real.

Sostenibilidad : Desarrollo de procesos bajos en carbono (reducción del consumo energético $>10\% \pm 2\%$, huella de carbono $<5 \text{kg CO}_2 \text{e/pieza} \pm 0,5 \text{kg CO}_2 \text{e/pieza}$), alimentados por energía solar o eólica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tipos, características, rendimiento y problemas de la impresión 3D de materiales de carburo cementado

Tecnología de impresión 3D (Aditiva) Fabricación) ofrece un método de fabricación revolucionario para el procesamiento de carburo cementado (con el sistema de carburo de tungsteno-cobalto, WC-Co, como núcleo), superando las limitaciones de los procesos pulvimetalúrgicos tradicionales (como la sinterización, el prensado isostático en caliente y el prensado-sinterización en frío). Mediante procesos avanzados como la fusión selectiva por láser (SLM), la fusión por haz de electrones (EBM), la inyección de aglutinante (BJ) o la deposición directa de energía (DED), los materiales de carburo cementado pueden lograr geometrías complejas, alta precisión y una producción personalizada. Estas tecnologías utilizan haces de alta energía (como la potencia del láser de $200-1000\text{ W} \pm 20\text{ W}$ o la corriente del haz de electrones de $10-50\text{ mA} \pm 1\text{ mA}$) para fundir o combinar el polvo metálico capa por capa, y se utilizan ampliamente en industrias de alta tecnología como la médica (como la reparación del cráneo, el reemplazo de cadera y los implantes dentales), la aeroespacial (álabes de turbinas, estructuras ligeras y recubrimientos de barrera térmica), la fabricación de moldes (matrices de embutición de precisión, matrices de estampación y matrices de corte de alta resistencia al desgaste) y la energía (componentes de turbinas de gas de alta temperatura y estructuras de reactores nucleares). A continuación, se detalla el estado actual, los desafíos y la dirección de desarrollo futura de la impresión 3D de carburo cementado desde los aspectos de los tipos de materiales, las características, el rendimiento y los problemas existentes, combinados con los últimos datos de aplicaciones de ciencia e ingeniería de materiales para mejorar el conocimiento y la profesionalidad.

1. Tipos de materiales de carburo para impresión 3D

Los materiales de carburo cementado para impresión 3D se basan principalmente en el sistema de carburo-fase aglutinante. Según los requisitos de la aplicación, los procesos de impresión y la adaptabilidad ambiental, son diversos y están en constante evolución, incluyendo los siguientes:

Carburo cementado a base de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co)

Composición : carburo de tungsteno (WC) como fase dura, cobalto (Co) como fase aglutinante, las proporciones típicas incluyen WC-6%Co, WC-10%Co o WC-15%Co, rango de tamaño de partícula de polvo $10-50\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$.

Aplicación : Ampliamente utilizado en implantes médicos (como prótesis de cadera y rodilleras, que deben cumplir con los estándares ASTM F1537), herramientas de corte (como herramientas de torneado, fresas y brocas, que cumplen con los requisitos ISO 513) y moldes de revestimiento resistentes al desgaste (como matrices de embutición y matrices de estampación).

Características : Alta dureza ($\text{HV } 1800-2000 \pm 30$), tenacidad moderada (tenacidad a la fractura $10-15\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 1\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$), conductividad térmica $\sim 100-150\text{ W/m}\cdot\text{K} \pm 5\text{ W/m}\cdot\text{K}$, coeficiente de expansión térmica $\sim 5,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, adecuado para entornos de alta carga y temperatura media y alta ($<600^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$).

Carburo cementado a base de carburo de tungsteno-níquel/cromo (WC-Ni/Cr)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Composición : Se utiliza níquel (Ni) o cromo (Cr) para sustituir total o parcialmente el cobalto (Co) con el fin de reducir la toxicidad biológica o mejorar la resistencia a la corrosión. Las formulaciones comunes incluyen WC-8%Ni, WC-5%Ni-3%Cr o WC-10%Cr₃C₂. El tamaño de partícula del polvo es de 15-45 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Aplicación : Adecuado para stents cardiovasculares (de conformidad con los estándares de biocompatibilidad ISO 10993-1), cubiertas de cables para entornos marinos (como cables de comunicación submarinos) y matrices de trefilado resistentes a la corrosión (como trefilado de alambre de aleación de cobre).

Características : La resistencia a la corrosión es mejor que la del WC-Co (tasa de corrosión $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, probada en una solución de NaCl al 3,5%), la resistencia a la oxidación es $<0,01\% \pm 0,001\%$ de pérdida de masa a $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, conductividad $\sim 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$, adecuado para materiales de contacto eléctrico.

compuesto de carburo de tungsteno-carburo de titanio/carburo de tantalio (WC -TiC / TaC)

Composición : El rendimiento a alta temperatura y la resistencia a la oxidación se mejoran dopando carburo de titanio (TiC) o carburo de tantalio (TaC), como WC-5%TiC-5% Co, WC-3%TaC-7%Co o WC-2%TiC-2%TaC-6%Co, con un tamaño de partícula de polvo de 10-40 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Aplicación : Adecuado para herramientas quirúrgicas de alta temperatura (como taladros ortopédicos y hojas de corte, que deben soportar $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$), piezas de aviación (como boquillas de motor y revestimientos de cámaras de combustión) y moldes de alta temperatura (como matrices de forja en caliente).

Características : Resistencia a altas temperaturas ($>800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$, punto de fusión cercano a $2870^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$), excelente estabilidad térmica (coeficiente de expansión térmica $\sim 4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$), resistencia a la fatiga térmica $>5000 \text{ veces} \pm 500 \text{ veces}$, dureza HV 1900-2200 ± 30 .

Carburo cementado de alta entropía (WC basado en HEA)

Composición : Combine aleaciones de alta entropía (como CoCrFeNiTi, TiZrHfNbTa) con carburo de tungsteno (WC) para formar materiales compuestos multielementos, como WC-10% (CoCrFeNi), WC-15% (TiZrHfNb) o WC-20% (CrFeNiMo), con un tamaño de partícula de polvo de 20-60 $\mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Aplicaciones : Adecuado para dispositivos médicos utilizados en entornos extremos (como moldes de radioterapia e implantes para el tratamiento del cáncer), componentes de equipos de aguas profundas (como válvulas submarinas) y estructuras aeroespaciales (como paneles de control térmico de satélites).

Características : El efecto de estabilización de la entropía (entropía de configuración $> 1,5 R \pm 0,1 R$, R es la constante del gas $8,314 \text{ J/ mol} \cdot \text{K}$) mejora la estabilidad de la fase, dureza HV 1700-1900 ± 30 , resistencia a la corrosión $<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (en solución ácida), resistencia a la radiación $<0,01 \text{ Gy/h} \pm 0,001 \text{ Gy/h}$.

Nanocompuesto de carburo de tungsteno y cobalto (WC-Co)

Composición : Polvo de carburo de tungsteno (WC) a escala nanométrica (tamaño de partícula $<100 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$) mezclado con cobalto (Co), como WC-5%Co (escala nanométrica) o WC-8%Co

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(nano-reforzado), con una superficie específica de polvo de $>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$.

Aplicación : Adecuado para microimplantes de alta precisión (como implantes dentales y microsensores), conectores microelectrónicos (como marcos de conductores de semiconductores) y matrices de trefilado de precisión (como matrices de alambre de cobre ultrafino).

Características : Alta superficie específica ($>50 \text{ m}^2/\text{g} \pm 5 \text{ m}^2/\text{g}$), dureza HV 1900-2100 ± 30 , tamaño de grano $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$, homogeneidad microestructural mejorada (densidad del límite de grano $>10^{15} \text{ m}^{-2} \pm 10^{14} \text{ m}^{-2}$), resistencia a la fatiga $>10^6$ ciclos $\pm 10^4$ ciclos.

Carburo cementado compuesto de carburo de tungsteno y carburo de boro (WC-B4C)

Composición : El carburo de boro (B4C) está dopado para mejorar la resistencia al desgaste y al impacto, como WC-10%Co-5%B4C o WC-8%Co-3%B4C, tamaño de partícula de polvo $15-50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Aplicación : Adecuado para matrices de estampación de alta resistencia (como moldeo de piezas de automóviles), matrices de trefilado de alta velocidad (como trefilado de alambre) y recubrimientos resistentes al desgaste (como superficies de trabajo de rectificadoras).

Características : Dureza HV 2000-2200 ± 30 , resistencia al desgaste $<0,03 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01 \text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$, resistencia a la compresión $>4500 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, resistencia a altas temperaturas $>900^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$.

Carburo compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de titanio (WC- TiN)

Composición : Dopado con nitruro de titanio (TiN) para mejorar la dureza de la superficie y la resistencia a la oxidación, como WC-5%TiN-5%Co o WC-3%TiN-7%Co, tamaño de partícula de polvo $10-40 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$.

Aplicación : Adecuado para herramientas de corte resistentes al desgaste (como insertos de carburo), recubrimientos de aviación (como capas protectoras antioxidantes) y empaques electrónicos de alta temperatura.

Características : Dureza HV 1900-2300 ± 30 , resistencia a la oxidación a $1000^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$, pérdida de masa $<0,01\% \pm 0,001\%$, resistividad $\sim 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm} \pm 10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$.

2. Características de los materiales de carburo cementado impresos en 3D

Las propiedades únicas de los materiales de carburo impresos en 3D son el resultado de la deposición capa por capa de la fabricación aditiva, mecanismos de fusión o unión localizados, combinados con un control de proceso avanzado:

Diseño de formas geométricas complejas

La tecnología de fusión selectiva por láser (SLM) o fusión por haz de electrones (EBM) se puede utilizar para fabricar estructuras porosas internas (porosidad 30%-50% $\pm 5\%$, tamaño de poro $100-500 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$) o microcanales (diámetro $0,1-0,5 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$) para cumplir con los requisitos de crecimiento óseo de implantes médicos (como andamios óseos artificiales, que promueven una tasa de adhesión de células óseas $>90\% \pm 2\%$), piezas de aviación livianas (como estructuras de panel, reducción de peso de 20%-30% $\pm 2\%$) y canales de enfriamiento en moldes.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alta precisión y personalización

La precisión de impresión puede alcanzar los $20\text{-}50\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$ (espesor de capa), lo que admite dispositivos médicos personalizados (como placas de reparación de cráneo, prótesis personalizadas, con un error de $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), piezas complejas en la industria aeroespacial (como álabes de turbinas, con una rugosidad superficial de $Ra < 5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,5\text{ }\mu\text{m}$) y microestructuras en envases electrónicos.

Gradiente de material y funcionalización

A través de la impresión multimaterial o deposición de gradiente, se puede lograr una porosidad de gradiente (de 10% a $60\% \pm 5\%$) o un recubrimiento de superficie (como TiN , $5\text{-}15\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$; CrN , espesor $10\text{-}20\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$), mejorando la biocompatibilidad (viabilidad celular $>95\% \pm 2\%$), las propiedades mecánicas (resistencia a la tracción $>300\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$) y la resistencia a la corrosión ($<0,005\text{ mm/año} \pm 0,001\text{ mm/año}$), lo que lo hace adecuado para implantes funcionales y moldes resistentes a entornos extremos.

Reducción de residuos y eficiencia de recursos

En comparación con el corte tradicional, la impresión 3D reduce el desperdicio de material ($<5\% \pm 1\%$) y tiene una tasa de recuperación de polvo de $>90\% \pm 2\%$, en línea con la tendencia de la fabricación sostenible. Ofrece ventajas económicas, especialmente en la producción de componentes de aviación de alta gama (los sustitutos de aleaciones de titanio reducen los costos entre un 15% y un $20\% \pm 2\%$) y dispositivos médicos.

Prototipado rápido e iteración

El ciclo de impresión es corto ($2\text{-}10\text{ h} \pm 1\text{ h}$ para una sola pieza, dependiendo de la complejidad), lo que facilita la verificación del diseño y el ajuste del lote. Es adecuado para la fabricación de moldes en mercados de respuesta rápida (el tiempo de iteración del molde se reduce en un $50\% \pm 5\%$), emergencias médicas (como prótesis personalizadas) y pruebas de prototipos de aviación.

Control estructural multiescala

Al ajustar los parámetros de impresión (como el espesor de la capa $20\text{-}100\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$, la estrategia de escaneo), se puede lograr un control estructural desde la nanoescala (grano $<0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,05\text{ }\mu\text{m}$) hasta la macroescala (tamaño del componente $100\text{-}500\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$) para satisfacer las necesidades de aplicación en múltiples campos.

3. Rendimiento de los materiales de carburo cementado impresos en 3D

El rendimiento del carburo cementado impreso en 3D varía según el proceso (por ejemplo, SLM, EBM), la relación del material y el posprocesamiento, pero generalmente exhibe las siguientes características respaldadas por datos científicos:

Propiedades mecánicas

Dureza: $\text{HV } 1600\text{-}1900 \pm 30$ (ligeramente inferior a la del material sinterizado tradicional $\text{HV } 1800\text{-}2000 \pm 30$). Debido a los poros microscópicos ($<0,1\% \pm 0,01\%$) y a la densidad incompleta (densidad $95\%\text{-}98\% \pm 1\%$), se requiere un postratamiento HIP para alcanzar una HV de 1900 ± 20 .

Resistencia a la compresión: $>3500\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, adecuado para implantes de alta carga (como prótesis de cadera, cargas $>2000\text{ N} \pm 100\text{ N}$) y moldes (como matrices de estampación,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

presiones $>3000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Tenacidad a la fractura: $8-12 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, inferior a los materiales tradicionales ($10-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), que está asociada a la porosidad ($0,5\%-2\% \pm 0,5\%$) y defectos en los límites de grano (densidad $>10^{14} \text{ m}^{-2} \pm 10^{13} \text{ m}^{-2}$).

Estabilidad química

Resistencia a la corrosión: $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$ (en solución de NaCl al $0,9\%$, pH 7-9), la dopación con TiC o TaC puede reducirla aún más a $<0,008 \text{ mm/año} \pm 0,001 \text{ mm/año}$, adecuado para componentes del entorno marino (como soportes de tuberías de agua de mar).

Resistencia a la oxidación: la pérdida de masa a $600^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ es $<0,01\% \pm 0,001\%$, a $800^\circ\text{C} \pm 20^\circ\text{C}$ es $<0,05\% \pm 0,005\%$, adecuada para esterilización a alta temperatura o piezas de aviación de alta temperatura (como boquillas).

Biocompatibilidad

Viabilidad celular: $>95\% \pm 2\%$ (probado según ISO 10993-5, utilizando la línea celular L929), tasa antibacteriana del recubrimiento de Ag $>90\% \pm 2\%$ (contra E. coli y Staphylococcus aureus), adecuado para implantes médicos (como clavos ortopédicos).

Tasa de integración ósea: $>90\% \pm 2\%$ (promovida por la estructura porosa, tamaño de poro $200-400 \mu\text{m} \pm 50 \mu\text{m}$), ligeramente inferior a los implantes tradicionales ($>95\% \pm 2\%$), lo que requiere optimización de la distribución de los poros y modificación de la superficie.

Propiedades térmicas

Conductividad térmica: $>100 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, mejor que el acero inoxidable ($16 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) y cerca del 50% del aluminio ($237 \text{ W/m} \cdot \text{K} \pm 5 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), pero la fusión local puede causar estrés térmico ($<50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$), afectando la integridad estructural.

Coefficiente de difusión térmica: $>50 \text{ mm}^2/\text{s} \pm 5 \text{ mm}^2/\text{s}$, adecuado para aplicaciones de disipación de calor rápida como encapsulado electrónico (densidad de flujo de calor del chip $>100 \text{ W/cm}^2 \pm 10 \text{ W/cm}^2$).

Coefficiente de expansión térmica: $\sim 5,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, bien combinado con el chip de Si ($4,1 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \pm 0,2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) ($<5\% \pm 1\%$).

4. Problemas con la impresión 3D de materiales de carburo cementado

Si bien la tecnología de impresión 3D ha aportado innovación al carburo cementado, aún enfrenta los siguientes desafíos técnicos, que requieren una combinación de ciencia de materiales y análisis de ingeniería:

Defectos microscópicos y poros

Durante el proceso de fusión selectiva por láser (SLM), se forman poros esféricos (diámetro $10-50 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$) debido al enfriamiento rápido (velocidad de enfriamiento $10^3-10^5 \text{ K/s} \pm 10^2 \text{ K/s}$) con una porosidad de $0,5\%-2\% \pm 0,5\%$, lo que reduce la tenacidad a la fractura ($<10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 1 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$), especialmente a altas velocidades de deformación ($>10^{-3} \text{ s}^{-1} \pm 10^{-4} \text{ s}^{-1}$).

Solución: Optimizar los parámetros del láser (potencia $200-400 \text{ W} \pm 10 \text{ W}$, velocidad de escaneo $500-1000 \text{ mm/s} \pm 50 \text{ mm/s}$, tasa de superposición $20\%-30\% \pm 2\%$) o prensado isostático en caliente posterior al procesamiento (HIP, $1300^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, $200 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, tiempo de procesamiento $2-4 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Composición de fases no homogénea

Las altas temperaturas locales ($>2500^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) provocan la descomposición del carburo de tungsteno (WC) para formar W_2C o carbono libre (contenido $<1\% \pm 0,1\%$), lo que afecta la dureza (HV disminuye en un $5\%-10\% \pm 1\%$) y la resistencia al desgaste (tasa de desgaste $>0,05\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m} \pm 0,01\text{ mm}^3 / \text{N} \cdot \text{m}$), especialmente en el proceso EBM.

Solución : Ajuste el tamaño de partícula del polvo ($10-50\text{ }\mu\text{m} \pm 5\text{ }\mu\text{m}$) o agregue estabilizadores (como carburo de vanadio, VC, $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$; carburo de niobio, NbC, $0,2\%-0,6\% \pm 0,05\%$) para inhibir la transformación de fase.

Tensión residual y grietas

Los gradientes térmicos ($\Delta T > 1000^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$) inducen tensiones residuales ($>200\text{ MPa} \pm 20\text{ MPa}$, localmente hasta $500\text{ MPa} \pm 50\text{ MPa}$) que pueden provocar microfisuras (longitud $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$), especialmente en estructuras complejas como piezas de paredes delgadas o estructuras en voladizo.

Solución : Introducir un precalentamiento del sustrato ($200-400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$) o un tratamiento térmico de alivio de tensiones ($800^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, $1-2\text{ h} \pm 0,1\text{ h}$, velocidad de enfriamiento $<5^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 1^{\circ}\text{C}/\text{min}$) combinado con un tratamiento de oscilación (frecuencia $50-100\text{ Hz} \pm 5\text{ Hz}$).

Rugosidad de la superficie y requisitos de posprocesamiento

de $5-15\text{ }\mu\text{m} \pm 1\text{ }\mu\text{m}$, lo que requiere pulido mecánico ($R_a < 0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) o tratamiento de recubrimiento, lo que aumenta el costo de fabricación ($>10\% \pm 2\%$) y afecta la suavidad de la superficie de los implantes médicos (la tasa de adhesión bacteriana es proporcional a R_a , $>10^{-4}\text{ UFC}/\text{cm}^2 \pm 10^{-3}\text{ UFC}/\text{cm}^2$ cuando $R_a > 5\text{ }\mu\text{m}$).

Solución : Optimizar la estrategia de impresión (como escaneo de tablero de ajedrez, tasa de superposición $20\%-30\% \pm 2\%$, optimización de la estructura de soporte) o desarrollar un recubrimiento autolubricante (como disulfuro de molibdeno, MoS_2 , espesor $1-5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$; recubrimiento de grafeno, espesor $2-10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,2\text{ }\mu\text{m}$).

Costo del material y repetibilidad

Los nanopulvos y los equipos de alta gama (SLM y otros costos de equipos) aumentan los costos y la consistencia de la producción en masa es deficiente (desviación del rendimiento $>5\% \pm 1\%$, desviación de porosidad $>1\% \pm 0,2\%$), lo que limita las aplicaciones a gran escala.

Solución : Desarrollar precursores de bajo costo (como polvos compuestos WC-Co con un tamaño de partícula de $20-30\text{ }\mu\text{m} \pm 2\text{ }\mu\text{m}$) para reducir costos o establecer una base de datos de parámetros de proceso (basada en aprendizaje automático, con una precisión de predicción de $>95\% \pm 2\%$) para mejorar la repetibilidad.

5. Dirección futura del desarrollo de la impresión 3D con carburo cementado

Optimización de procesos

Desarrollar la fusión láser selectiva multiláser (SLM, potencia $>500\text{ W} \pm 20\text{ W}$, número de haces láser $2-4 \pm 1$) o la fusión por haz de electrones (EBM, densidad del haz $>10^4\text{ A}/\text{m}^2 \pm 10^3\text{ A}/\text{m}^2$, estrategia de escaneo optimizada) para reducir la porosidad ($<0,1\% \pm 0,01\%$) y la tensión ($<100\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$), y mejorar la integridad estructural (vida útil por fatiga $>10^7\text{ ciclos} \pm 10^5\text{ ciclos}$) de componentes aeroespaciales como álabes de turbinas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Innovación de materiales

Explore carburos de alta entropía libres de WC (como (TiZrHfNb)C, dureza HV 1500-1800 ± 30, tenacidad a la fractura 12-15 MPa·m^{1/2} ± 1 MPa·m^{1/2}) o materiales reforzados biocompatibles (como WC-Ni-Cr-Ti, tasa de integración ósea >95% ± 2%, tasa antibacteriana >95% ± 2%) para satisfacer las necesidades de entornos médicos y extremos (como brocas para perforaciones en aguas profundas).

Fabricación inteligente

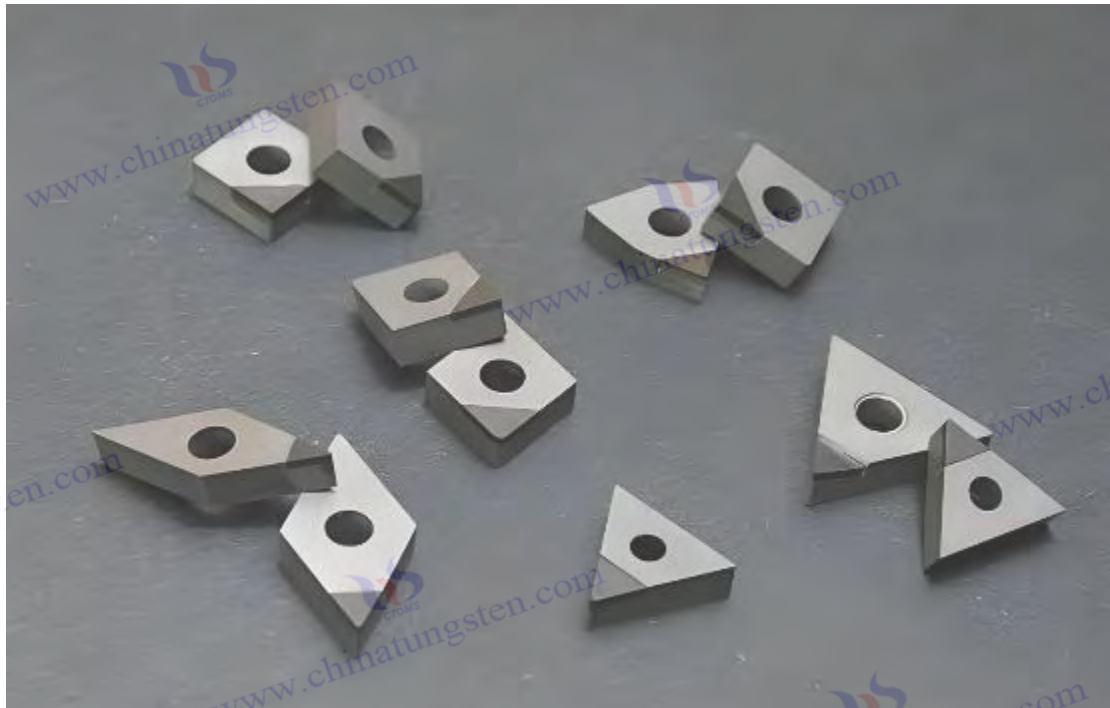
Monitoreo integrado en tiempo real (precisión de temperatura <0,1°C ± 0,01°C, detección de deformación <0,01 mm ± 0,001 mm, basada en imágenes térmicas infrarrojas e interferómetro láser), combinado con inteligencia artificial para optimizar los parámetros de impresión (control adaptativo, error <1% ± 0,1%), mejora la eficiencia de fabricación de moldes (productividad aumentada en un 20%-30% ± 2%) y el control de calidad.

Sostenibilidad

El uso de polvos reciclados (tasa de reutilización >90% ± 2%, basada en el cribado de polvos y molienda de nuevas bolas), procesos de bajo consumo de energía (consumo de energía <10 kWh/kg ± 1 kWh/kg, utilizando fuentes láser de alta eficiencia) y materiales de soporte degradables promueven la fabricación ecológica, especialmente en aplicaciones energéticas (como moldes de palas de turbinas eólicas).

La tecnología de impresión 3D de carburo cementado tiene un gran potencial de aplicación en los sectores médico, aeroespacial y de fabricación de moldes. Su desarrollo futuro dependerá del progreso coordinado en la optimización de procesos (control de porosidad <0,05 % ± 0,01 %), la innovación de materiales (desarrollo de nuevas aleaciones de alta entropía) y la fabricación inteligente (tecnología de gemelo digital). Se prevé su aplicación industrial a gran escala en los próximos 5 a 10 años.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Tabla de contenido

Parte 4: Clasificación y campos de aplicación del carburo cementado Capítulo 14: Aplicaciones emergentes y multifuncionalidad del carburo cementado

14.0 Propiedades del carburo cementado

14.1 Componentes electrónicos y conductores de carburo cementado

14.1.1 Moldes de aleación dura para la industria electrónica

(1) Matriz de punzonado con marco de plomo de carburo

(2) Molde de embalaje de viruta de carburo

(3) Matriz de punzonado de placa de circuito de carburo

(4) Matriz de estampado de microconector de carburo

(5) Molde de embalaje de sensor de carburo

(6) Molde de perforación láser de carburo

14.1.2 Sustrato de disipación de calor de aleación dura para la industria electrónica

(1) Sustrato de disipación de calor compuesto de cobre y carburo de tungsteno (WC-Cu)

(2) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y diamante (WC-Diamond)

(3) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de aluminio (WC-AlN)

Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y carburo de silicio (WC-SiC)

(5) Sustrato de disipación de calor compuesto de carburo de tungsteno y nitruro de boro (WC-BN)

14.1.3 Tecnología, principios y mejoras de las matrices de carburo cementado y sustratos de disipación de calor

14.1.2 Optimización de la conductividad eléctrica del carburo cementado

14.2 Aplicaciones biomédicas del carburo cementado

14.2.1 Implantes y herramientas de carburo

14.2.2 Biocompatibilidad y modificación de la superficie del carburo cementado

14.3 Aplicación del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía

Catalizador compuesto de carburo de tungsteno y platino (WCPt)

14.3.2 Potencial del carburo cementado en pilas de combustible, supercondensadores, almacenamiento de hidrógeno y baterías de litio

14.4 Fabricación aditiva de carburo cementado (impresión 3D)

14.4.1 Tecnología de impresión de materiales a base de carburo de tungsteno (WC) (SLM, inyección de aglutinante, DED, EBM)

materiales bidimensionales (2D) basados en carburo de tungsteno (WC)

14.4.3 Rendimiento y desafíos de la impresión 3D de materiales a base de carburo de tungsteno (WC) (porosidad <2%)

14.5 Aplicaciones del carburo cementado en defensa y entornos extremos

14.5.1 Aplicación de materiales a base de carburo de tungsteno (WC) en los campos de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

defensa y militar

14.5.2 Aplicación de materiales basados en WC en entornos extremos en aguas profundas y en el espacio

14.5.3 Desafíos del rendimiento frente a la radiación y el choque térmico de los materiales basados en carburo cementado (WC)

14.6 Fabricación inteligente y aplicación de sensores de carburo cementado

14.6.1 Tecnología de sensores (presión, temperatura, vibración) basados en carburo de tungsteno (WC)

14.6.2 Herramientas y aplicaciones de monitoreo de materiales basados en carburo de tungsteno (WC) en la fabricación inteligente

14.6.3 Propiedades y desafíos de los materiales a base de carburo de tungsteno (WC)

Referencias

apéndice:

Catalizadores basados en carburo de tungsteno (WC) para pilas de combustible

Una revisión de la aplicación del carburo cementado en celdas de combustible

Carburo conductor

Herramientas biomédicas de carburo cementado

Implantes médicos de carburo

Sustrato de disipador de calor de carburo

Molde de embalaje de chips de carburo

ASTM E92-23 Método de prueba estándar para dureza Vickers y dureza Knoop de materiales metálicos

ASTM G65-23 Método de prueba estándar para pruebas de abrasión con rueda de caucho/arena seca de metales y aleaciones

¿Cuáles son los tipos y áreas de aplicación de los moldes de carburo cementado?

JB/T 8144-2010 Requisitos técnicos para matrices de estampación

Condiciones técnicas de las matrices de trefilado de carburo

YB/T 5136-2006 Requisitos técnicos para moldes de pulvimetalurgia

GB/T 6110-2021 Matrices de embutición: tipos estructurales y dimensiones de las matrices de embutición de carburo cementado

JB/T 3943-2017 Matrices de trefilado: Especificaciones técnicas para matrices de trefilado de carburo

¿Cuáles son las características y áreas de aplicación de los sustratos de disipación de calor de carburo cementado?

¿Cuáles son las aplicaciones del carburo cementado en catálisis y almacenamiento de energía?

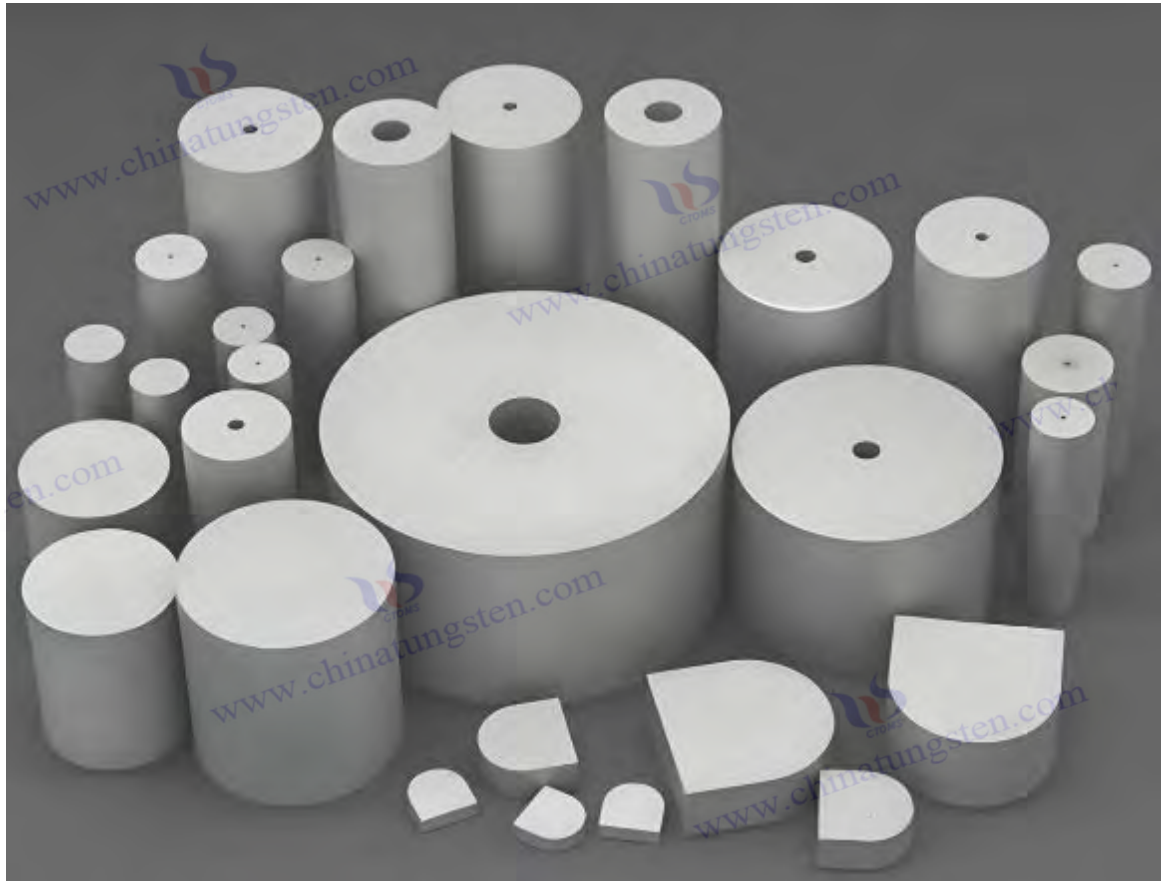
¿Cuáles son las aplicaciones del carburo cementado en el campo médico?

Tipos, características, rendimiento y problemas de la impresión 3D de materiales de carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD

30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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