

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

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



Parte 2: Proceso de preparación del carburo cementado

Capítulo 4: Selección de materia prima y preparación del polvo

El carburo cementado de tungsteno se fabrica mediante pulvimetalurgia a partir de carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de unión. Sus propiedades (dureza HV 1500-2500 \pm 30, tenacidad K_{Ic} 820 MPa·m^{1/2} \pm 0,5, resistencia a la compresión >4000 MPa \pm 100 MPa) dependen directamente de la calidad de las materias primas y del proceso de preparación del polvo. La selección de la materia prima y la preparación del polvo son la base de la producción de carburo cementado, que determina la microestructura (tamaño de partícula de WC 0,110 μ m \pm 0,01 μ m, uniformidad de distribución de Co > 95 % \pm 1 %) y el rendimiento final (conductividad térmica 80-120 W/m·K \pm 5 W/m·K, resistencia a la corrosión pH 12).

Este capítulo analiza en detalle la síntesis de polvo de carburo de tungsteno, la selección de la fase aglutinante y aditivos, la tecnología de pretratamiento del polvo y los métodos de caracterización del polvo, cubriendo parámetros del proceso, principios científicos, factores de influencia, estrategias de optimización y aplicaciones de ingeniería.

La preparación del polvo requiere un control preciso del tamaño de partícula de WC (0,110 μ m \pm 0,01 μ m), la pureza (carbono libre <0,1 % \pm 0,01 %), las características de la fase de unión (pureza de Co/Ni > 99,8 % \pm 0,01 %) y la fluidez del polvo (1316 segundos/50 g \pm 0,5 segundos) para garantizar la densidad de sinterización (> 99 % \pm 0,1 %) y la consistencia del rendimiento (desviación de dureza < \pm 30 HV). Por ejemplo, el polvo de WC submicrónico (<0,5 μ m \pm 0,01 μ m) puede aumentar la dureza de la herramienta a HV 2300 \pm 30 y prolongar la vida útil de corte para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

aviación a 15 horas \pm 1 hora. El polvo de Co de alta pureza ($>99,9\% \pm 0,01\%$) mejora la tenacidad de la broca ($K_{1c} > 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) y la vida útil de la minería supera los $1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$.

el rendimiento en el Capítulo 3 a través de la fuente de dureza WC (HV 2000 - 3000 ± 50) y la contribución de la tenacidad Co ($K_{1c} 1520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), proporcionando una base teórica y de proceso para el conformado y sinterizado posterior (Capítulo 5).

4.0 Descripción general de los tipos de carburo cementado y de las materias primas y auxiliares

El carburo cementado es un material compuesto de alto rendimiento con carburo de tungsteno (WC) como fase dura y cobalto (Co) o níquel (Ni) como fase de unión. Se usa ampliamente en herramientas de corte, moldes, piezas resistentes al desgaste y otros campos. Según los diferentes requisitos de aplicación y características de rendimiento, el carburo cementado se puede dividir en tipo general (serie YG), tipo resistente al calor/resistente al desgaste (serie YT), tipo de alta tenacidad/resistente al impacto (serie YW), carburo cementado a base de níquel (serie YN), tipo de aleación de alta entropía y tipo especial para fabricación aditiva. Los tipos y proporciones de materias primas y auxiliares varían según el tipo de carburo cementado y el proceso de preparación. Generalmente, se pueden dividir en tres categorías: materias primas principales, materias primas auxiliares y materiales auxiliares. La selección y el uso de estos materiales deben seguir estrictamente los estándares relevantes para garantizar la calidad del producto y la consistencia del proceso.

4.0.0 Principales tipos de carburo cementado

La siguiente tabla enumera en detalle los principales tipos de carburo cementado y sus características, requisitos de proceso, áreas de aplicación y estándares seguidos, reflejando sus diversos escenarios de aplicación y requisitos de proceso.

tipo	Ingredientes principales y características	Requisitos del proceso	Áreas de aplicación	Requisitos estándar
Serie YG	Compuesto principalmente de WC y Co, complementado con negro de humo, con alta dureza y tenacidad.	Controlar estrictamente la atmósfera y la temperatura de sinterización para evitar la introducción de impurezas.	Herramientas de corte (como herramientas de torneado, fresas)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010
Serie YT	y TiC para mejorar la formabilidad, la resistencia a altas temperaturas y la resistencia al desgaste.	Controlar la atmósfera y la temperatura de sinterización para evitar impurezas.	Corte de alta velocidad (como el procesamiento de acero)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

tipo	Ingredientes principales y características	Requisitos del proceso	Áreas de aplicación	Requisitos estándar
Serie YW	Contiene TaC y/o NbC , requiere protección con argón, tiene tenacidad y rendimiento a altas temperaturas.	Asegúrese de la pureza de la atmósfera de argón y controle con precisión la temperatura.	Matrices de alta resistencia (como matrices de estampación)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010
Serie YN	Reemplace Co con Ni y agregue TiN para lograr una excelente resistencia a la corrosión.	Controlar la atmósfera y la temperatura de sinterización para evitar la oxidación.	Entorno resistente a la corrosión (como equipos químicos)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010
Aleación de alta entropía	Las combinaciones de múltiples elementos (como Cr, V, Mo, W, Ta) requieren una mezcla precisa y un proceso HIP para garantizar la uniformidad.	Relación precisa, la sinterización HIP requiere una alta presión controlada (50-100 MPa)	Entornos extremos (como condiciones de alta temperatura y alta presión)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010
Fabricación aditiva	Polvo esférico, preparado por atomización de gas, con agentes de tratamiento de superficie añadidos para mejorar el rendimiento.	Proceso de atomización de gas, control estricto de la atmósfera y la temperatura.	Piezas fabricadas de forma aditiva (por ejemplo, componentes aeroespaciales)	Cumplir con los requisitos de muestreo GB/T 5314-2011 y seguir el proceso de sinterización GB/T 26048-2010
ilustrar	Todos los tipos deben seguir los estándares de muestreo de GB/T 5314-2011 para garantizar la consistencia del lote, y el proceso de sinterización se lleva a cabo de acuerdo con GB/T 26048-2010, enfatizando el control preciso de la atmósfera y la temperatura para evitar la introducción de impurezas.			

4.0.1 Principales materias primas del carburo cementado

Las principales materias primas son los componentes esenciales del carburo cementado, que influyen directamente en sus propiedades mecánicas y su vida útil. A continuación, se presenta un resumen de las principales materias primas:

Carburo de tungsteno (WC, carburo de tungsteno):

Función: Como fase dura, proporciona una dureza extremadamente alta (>2000 HV) y resistencia al desgaste, representando el 70%-94% (en peso) de la composición total.

Especificaciones: Pureza $\geq 99,8\%$, tamaño de grano 0,2-5 μm (granos finos 0,2-0,5 μm , granos gruesos >2 μm) .

Ámbito de aplicación: todos los tipos de carburo.

Polvo de cobalto (Co, polvo de cobalto):

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Función: Como fase de unión tradicional, mejora la tenacidad y la resistencia a la flexión. Su contenido suele ser del 6 % al 25 % (en peso).

Especificaciones: Pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula 1-5 μm .

Ámbito de aplicación: Series YG, YT, YW y aleaciones de alta entropía.

Polvo de níquel

Función: Reemplaza el cobalto como fase de unión resistente a la corrosión, mejora la resistencia a la oxidación, contenido 5%-20% (% en peso).

Especificaciones: Pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula 1-5 μm .

Ámbito de aplicación: Serie YN y tipos de fabricación aditiva.

Otros carburos:

Carburo (TiC)

Mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia al desgaste por cráter, contenido 5%-20% (% en peso), pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-2 μm , adecuado para las series YT e YN.

Carburo (TaC) / Carburo de niobio (NbC)

Mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la deformación, contenido 2%-10% (% en peso), pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-3 μm , adecuado para la serie YW y aleaciones de alta entropía.

4.0.2 Materias primas auxiliares

Las materias primas auxiliares se utilizan para optimizar el rendimiento o adaptarse a los requisitos específicos del proceso. Su selección es flexible según el grado y el escenario de aplicación:

Ajustador de carbono:

Negro carbón

Controlar el equilibrio de carbono para evitar la formación de fase η ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) o carbono libre, contenido 0,1%-0,5% (% en peso), pureza $\geq 99\%$, tamaño de partícula $< 1 \mu\text{m}$, adecuado para todo tipo (especialmente sinterización en fase líquida).

Grafito

Como fuente de carbono, ajuste el contenido de carbono a 0,1%-0,3% (% en peso), pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 1-5 μm , adecuado para la serie YG y polvos de fabricación aditiva.

Elementos de tierras raras:

Cerio (Ce) / Lantano (La)

Refina el grano y mejora la resistencia a la flexión. El contenido es del 0,1 % al 0,5 % (% en peso) en forma de óxidos con una pureza $\geq 99,9 \%$. Es adecuado para calidades de grano fino (como YG6F y YN6F).

Nitruro/boruro

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Nitruro (TiN)/boruro de tungsteno (WB): mejora la dureza de la superficie y la resistencia a la corrosión, contenido 1%-5% (% en peso), pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-3 μm , adecuado para las series YT, YN y fabricación aditiva.

4.0.3 Excipientes

Los materiales auxiliares apoyan el proceso de preparación y sinterización, garantizando la controlabilidad del proceso y la calidad del producto:

Lubricante:

Ácido esteárico

Mejora la fluidez de mezcla y prensado, contenido 0,5%-2% (% en peso), grado industrial, pureza $\geq 95\%$, adecuado para todos los procesos de prensado.

Parafina

Mejora la resistencia del cuerpo verde, contenido 1%-3% (% en peso), punto de fusión 50-60 °C, adecuado para cuerpos verdes con formas complejas.

Solvente:

Etanol/Acetona

Se utiliza como medio de dispersión de mezcla húmeda, limpieza y secado, grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$, adecuado para todo posprocesamiento de mezcla húmeda y fabricación aditiva.

Gas atmosférico:

Hidrógeno (H₂) /Argón (Ar)/Nitrógeno (N₂)

Proporciona una atmósfera reductora o inerte para evitar la oxidación, pureza > 99,99 %, adecuado para YG/YT (hidrógeno), YW/YN/HIP (argón), aleación de TiN (nitrógeno).

Flujo (opcional):

Ácido bórico (H₃BO₃) : reduce la temperatura de sinterización, contenido 0,1%-0,5%, grado analítico, adecuado para granos finos y aleaciones de alta entropía.

4.0.4 Tabla detallada de materias primas y auxiliares

La siguiente tabla enumera sistemáticamente todas las materias primas y auxiliares necesarias para los diferentes tipos de carburos cementados (incluida la serie YN de carburo cementado a base de níquel), cubriendo especificaciones, funciones y alcances aplicables.

categoria	Material	Especificación	efecto	Tipos aplicables
Principales materias primas	Carburo de tungsteno (WC)	Pureza $\geq 99,8\%$, tamaño de partícula 0,2-5 μm	Fase dura, que proporciona alta dureza y resistencia al desgaste, contenido 70%-94% (% en peso)	Todos los tipos (YG, YT, YW, YN, alta entropía, fabricación aditiva)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

categoria	Material	Especificación	efecto	Tipos aplicables
	Polvo de cobalto (Co)	Pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula 1-5 μm	Fase aglutinante, mejora la tenacidad y la resistencia a la flexión, contenido 6%-25% (% en peso)	YG (6%-15%), YT (6%-10%), YW (8%-12%), alta entropía
	Polvo de níquel (Ni)	Pureza $\geq 99,9\%$, tamaño de partícula 1-5 μm	Fase de unión resistente a la corrosión, resistencia a la oxidación mejorada, contenido 5%-20% (% en peso)	Serie YN (como YN6, YN8), fabricación aditiva
	Carburo de titanio (TiC)	Pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-2 μm	Mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia al desgaste por cráter, contenido del 5% al 20% (% en peso)	Serie YT (como YT15, YT30), serie YN
	Carburo de tantalio (TaC) / Carburo de niobio (NbC)	Pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-3 μm	Mejora la resistencia a altas temperaturas y la resistencia a la deformación, contenido 2%-10% (% en peso)	Serie YW (como YW1, YW2), aleación de alta entropía
Materias primas auxiliares	Negro de carbón (C)	Pureza $\geq 99\%$, tamaño de partícula $< 1 \mu\text{m}$	Controla el equilibrio de carbono y previene la formación de la fase η , contenido 0,1%-0,5% (% en peso)	Todos los tipos (especialmente sinterización en fase líquida)
	Grafito	Pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 1-5 μm	Como fuente de carbono, ajuste el contenido de carbono a 0,1%-0,3% (% en peso) .	Serie YG, polvo para fabricación aditiva
	Elementos de tierras raras (Ce/La)	Forma de óxido, pureza $\geq 99,9\%$	Refina los granos y mejora la resistencia a la flexión, contenido 0,1%-0,5% (% en peso)	Grados de grano fino (como YG6F, YN6F)
	Nitruro de titanio (TiN) /boruro de tungsteno (WB)	Pureza $\geq 99,5\%$, tamaño de partícula 0,5-3 μm	Mejora la dureza de la superficie y la resistencia a la corrosión, contenido 1%-5% (% en peso)	Serie YT, YN, fabricación aditiva
Excipientes	Ácido esteárico	Grado industrial, pureza $\geq 95\%$	Mejora la fluidez de la mezcla y el prensado, contenido 0,5%-2% (% en peso)	Todos los procesos de prensado
	Parafina	Punto de fusión 50-60°C	Mejora la resistencia del cuerpo verde, contenido 1%-3% (% en peso)	Forma compleja en blanco
	Etanol/Acetona	Grado analítico, concentración $\geq 99,5\%$	Medios de dispersión de mezcla húmeda, limpieza y secado	Todo tipo de mezcla húmeda, fabricación aditiva
	Hidrógeno (H ₂) /Argón (Ar) /Nitrógeno (N ₂)	Pureza $> 99,99\%$	Atmósfera reductora o inerte para evitar la oxidación	Todos los procesos de sinterización (hidrógeno: YG, YT; argón: YW, YN, HIP; nitrógeno: aleación de TiN)
	Ácido bórico (H ₃ BO ₃)	Grado analítico	Fundente, reduce la temperatura de sinterización, contenido 0,1%-0,5% (% en peso)	Aleación de grano fino y alta entropía
Materiales	Agente	Grado industrial	Mejora la esfericidad del polvo, contenido	Fabricación aditiva (GB/T 34505-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

categoria	Material	Especificación	efecto	Tipos aplicables
de proceso especiales	esferoidizante (como PVA)		0,1%-0,5% (% en peso)	2017)
	Precursores de CVD (como TiCl ₄ , CH ₄)	Alta pureza	Para carburo revestido	Carburo recubierto (series YT, YN)

Nota: La tabla cubre las materias primas y auxiliares necesarias para varios tipos de carburo cementado, incluidas las especificaciones, funciones y alcance aplicable, para garantizar la exhaustividad y pertinencia del proceso de preparación.

4.1 Propiedades físicas y químicas y preparación del polvo de carburo de tungsteno (WC)

El carburo de tungsteno (WC) es el componente principal del carburo cementado, con una fracción másica del 70 % al 95 % ± 1 %. Sus excelentes propiedades físicas y químicas determinan directamente el rendimiento general del carburo cementado. El polvo de WC presenta una alta dureza (HV 2000-3000 ± 50), un alto punto de fusión (2870 °C ± 10 °C), excelente estabilidad química (entalpía de antioxidación <800 kJ/mol ± 20 kJ/mol) y buena resistencia al desgaste y a la corrosión. La preparación de polvo de WC requiere un control estricto del tamaño de partícula (0,1-10 μm ± 0,01 μm), pureza (carbono libre <0,1 % ± 0,01 %, óxido <0,05 % ± 0,01 %) y morfología (poligonal, borde <0,05 μm ± 0,01 μm) para satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta gama, como herramientas de aviación (velocidad de corte > 300 m/min ± 10 m/min), brocas de minería (resistencia a la compresión > 200 MPa ± 10 MPa) y moldes resistentes al desgaste (vida útil de extrusión > 10⁶ veces ± 10⁵ veces).

La carbonización es el principal método de síntesis de polvo de carburo de tungsteno (WC) debido a su tecnología avanzada, alto rendimiento (>10 t/lote ± 1 t) y una cuota de mercado de >90 % ± 2 %. Además, se han introducido en los procesos modernos tecnologías emergentes como el plasma, la deposición mecanoquímica y la deposición química en fase de vapor (CVD) para cumplir con los requisitos específicos de tamaño de partícula y rendimiento. Los métodos de síntesis de polvo de carburo de tungsteno (WC) preparados mediante carbonización incluyen principalmente los siguientes:

Método de carburación tradicional:

el polvo de tungsteno (W) y el negro de humo (C) reaccionan a una temperatura alta de 1450-1600 °C ± 10 °C para generar WC, generalmente en hidrógeno (H₂, caudal 50 L/min ± 5 L/min) o vacío (<10⁻²Pa ± 10⁻³ Pa) Atmósfera, utilizando un horno de grafito (potencia > 100 kW ± 10 kW). La velocidad de calentamiento es de 5-10 °C/min ± 0,5 °C/min, y el tiempo de aislamiento es de 2-4 horas ± 0,1 horas. Es adecuado para la producción a gran escala con alto rendimiento (> 10 t/lote ± 1 t).

Método de carbonización en horno rotatorio:

Basado en el método de carbonización tradicional, se utiliza un horno rotatorio (velocidad de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

rotación $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) para mejorar la uniformidad del tamaño de partícula (desviación $<5 \% \pm 1 \%$) y reducir la aglomeración ($<5 \% \pm 1 \%$) a través de la mezcla dinámica, que es adecuada para la producción de WC submicrónico ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Método de carbonización a baja temperatura:

reacciona a $<1200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, se combina con fuentes de carbono renovables (como biocarbón) y controla el crecimiento del grano ($<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) a través de aditivos (como VC, Cr_3C_2), adecuado para polvo de WC a nanoescala, lo que reduce el consumo de energía en un $20 \% \pm 5 \%$. Todos estos métodos requieren el control de la relación agua: carbono ($1:1,02 \pm 0,01$), la atmósfera ($\text{O}_2 <10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) y la velocidad de enfriamiento ($>50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) para garantizar la pureza (carbono libre $<0,1 \% \pm 0,01 \%$) y la distribución del tamaño de partícula (desviación $<5 \% \pm 1 \%$).

Esta sección analizará exhaustivamente las propiedades físicas y químicas del polvo de WC, el proceso de producción (principalmente el método de carbonización), la importancia y la tecnología de control del tamaño de partícula y la distribución del grano, la optimización de la pureza y sus efectos de aplicación en múltiples campos.

4.1.0 Características físicas y propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno

Características físicas del polvo de carburo de tungsteno (WC)

Como componente principal del carburo cementado, las propiedades físicas del polvo de carburo de tungsteno (WC) determinan directamente su rendimiento. A continuación, se presenta una descripción completa de las características físicas del polvo de WC, que abarca la estructura cristalina, la densidad (dividida en densidad aparente y densidad compactada), el punto de fusión, la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica, la morfología y otras propiedades relacionadas.

(1) Estructura cristalina del polvo de carburo de tungsteno

Tipo de cristal

El polvo de WC pertenece al sistema cristalino hexagonal y su grupo espacial es $P6m2$ (186).

Parámetros de red:

$a = 0,2906 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$

$c = 0,2837 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$

La relación c/a es de aproximadamente 0,976, lo que indica que la red tiene una alta isotropía.

Características de la celda unitaria

Cada celda unitaria contiene una molécula de WC. Los átomos de tungsteno (W) y carbono (C) se disponen en una estructura hexagonal compacta. Los átomos de W se ubican en los vértices y el centro del prisma hexagonal, y los átomos de C rellenan los huecos del prisma hexagonal para formar un enlace mixto covalente-iónico-metálico estable.

Estabilidad del cristal

La estructura hexagonal le otorga al WC una excelente resistencia a la deformación, especialmente en condiciones de alta temperatura y alta presión ($>1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, $>200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

una tasa de distorsión reticular de $<0,01 \% \pm 0,001 \%$, lo que lo hace adecuado para aplicaciones en entornos extremos.

(2) Densidad del polvo de carburo de tungsteno

Densidad teórica: $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, cercana al valor máximo teórico, lo que refleja la disposición cercana de los átomos de WC.

Densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno:

Definición: La densidad del polvo en su estado de apilamiento natural, que refleja la eficiencia de apilamiento de partículas.

Valor: $6,0-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ (GB/T 1479.1-2011), afectado por el tamaño de partícula y la morfología.

WC submicrónico ($0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): la densidad aparente es menor ($6,0-6,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$) debido a los grandes espacios entre las partículas finas.

Micras de grado WC ($1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): densidad aparente $6,5-7,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.

WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): La densidad aparente es mayor ($7,5-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$) porque las partículas están más densamente empaquetadas.

Impacto: La densidad aparente afecta la densidad inicial del soporte prensado. El hormigón de grano fino requiere la adición de lubricantes (como parafina) para mejorar la fluidez ($<30 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$, GB/T 1482-2010).

Densidad de toque del polvo de carburo de tungsteno:

Definición: La densidad del polvo después de la vibración (frecuencia de vibración 60 veces/min \pm 5 veces/min), que refleja la máxima eficiencia de empaquetamiento de las partículas.

Valor: $8,5-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$ (GB/T 5162-2014).

WC submicrónico: $8,5-9,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.

Grado micrométrico WC: $9,0-10,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.

WC grueso: $10,0-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.

Impacto: La densidad del macho es más cercana a la densidad después de la sinterización ($>99\% \pm 0,1\%$) y una alta densidad del macho reduce la contracción por sinterización ($<15\% \pm 2\%$).

Densidad real: La densidad medida después de la sinterización es de $15,50-15,60 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$ (método de drenaje GB/T 3850-2015), que se ve afectada por la pureza (carbono libre $<0,1\% \pm 0,01\%$, óxido $<0,05\% \pm 0,01\%$) y la porosidad ($<0,05\% \pm 0,01\%$).

Importancia de la aplicación: La alta densidad aparente y la densidad del macho garantizan la uniformidad del proceso de prensado y sinterización, y respaldan la alta resistencia a la compresión y la resistencia al impacto del carburo cementado.

(3) Punto de fusión del polvo de carburo de tungsteno

Punto de fusión: $2870 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. El WC no se funde a presión normal, sino que se descompone en W y C. La temperatura de descomposición es cercana al punto de fusión.

Estabilidad a altas temperaturas: a $2000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la expansión térmica de la red es $<0,5 \% \pm 0,1 \%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y la tasa de pérdida de peso es $<0,01 \% \pm 0,002 \% / h$, lo que es adecuado para corte a alta temperatura ($> 1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) y aplicaciones de revestimiento resistente al desgaste.

Comportamiento de descomposición: En vacío o atmósfera reductora (H_2), la tasa de descomposición es $<0,001\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,0002\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$, lo que indica estabilidad química.

(4) Conductividad térmica del polvo de carburo de tungsteno

Conductividad térmica: $84\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, ligeramente inferior al tungsteno puro ($174\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$), pero mejor que la mayoría de los materiales cerámicos.

Dependencia de la temperatura: En el rango de $25\text{-}1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la conductividad térmica disminuye lentamente con el aumento de la temperatura (alrededor del $10\% \pm 2\%$), y aún mantiene $75\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ a $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Importancia de la aplicación: La alta conductividad térmica ayuda a disipar el calor rápidamente, reducir el daño térmico a las herramientas o moldes durante el corte a alta velocidad ($>300\text{ m/min} \pm 10\text{ m/min}$) y extender la vida útil ($>12\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$).

(5) Coeficiente de expansión térmica del polvo de carburo de tungsteno

Coeficiente de expansión térmica lineal: $5,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ ($25\text{-}1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$).

Dependencia de la temperatura: A $1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, la tasa de expansión es $<0,52\% \pm 0,02\%$, que es mucho menor que la del acero ($12 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1} \pm 0,5 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), lo que garantiza la estabilidad dimensional a altas temperaturas.

Coincidencia: El coeficiente de expansión térmica es cercano al de la fase de unión de Co ($5,0 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$) o Ni ($6,0 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$), lo que reduce la tensión residual después de la sinterización ($<50\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$).

(6) Morfología del polvo de carburo de tungsteno

Morfología de la partícula: El polvo de WC es poligonal o casi esférico, con bordes $<0,05\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$ y rugosidad superficial $\text{Ra} <0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,02\text{ }\mu\text{m}$ (observación SEM).

Influencia morfológica:

La morfología poligonal aumenta el área de contacto de las partículas ($>90\% \pm 2\%$) y mejora la resistencia de la unión de sinterización ($>400\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$).

Los bordes finos reducen la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$), mejoran la fluidez ($<30\text{ s}/50\text{ g} \pm 2\text{ s}$, GB/T 1482-2010) y son adecuados para la fabricación aditiva.

Influencia de la preparación: El método de carbonización ($1450\text{-}1600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) produce partículas poligonales con bordes afilados; el método de plasma produce partículas casi esféricas (redondez $>0,9 \pm 0,01$).

(7) Área superficial específica del polvo de carburo de tungsteno

Superficie específica: $0,5\text{-}5\text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2\text{ m}^2/\text{g}$, dependiendo del tamaño de partícula.

WC submicrónico ($0,1\text{-}0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$): área de superficie específica $>3\text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2\text{ m}^2/\text{g}$.

Micrón WC ($1\text{-}5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$): superficie específica $1\text{-}2\text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2\text{ m}^2/\text{g}$.

Método de medición: método BET (GB/T 19587-2017), cantidad de adsorción $<0,5\text{ cm}^3/\text{g} \pm 0,05\text{ cm}^3/\text{g}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Importancia de la aplicación: La alta área superficial específica mejora la actividad de sinterización (tasa de contracción $> 15 \% \pm 2 \%$) y mejora la densidad del carburo cementado ($> 99 \% \pm 0,1 \%$).

(8) Propiedades eléctricas del polvo de carburo de tungsteno

Resistividad: $0,2 \mu\Omega \cdot m \pm 0,02 \mu\Omega \cdot m$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$), aumenta aproximadamente un $20 \% \pm 2 \%$ a medida que la temperatura aumenta a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conductividad eléctrica: Mejor que los materiales cerámicos (resistividad $> 10^6 \mu\Omega \cdot m$), cercana al tungsteno metálico ($0,05 \mu\Omega \cdot m \pm 0,01 \mu\Omega \cdot m$), adecuado para EDM.

Aplicación: En el procesamiento EDM, la rugosidad de la superficie $Ra < 1 \mu m \pm 0,2 \mu m$, la precisión $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

(9) Otras características del polvo de carburo de tungsteno

Magnetismo: El WC en sí no es magnético, pero cuando se mezcla con Co muestra un magnetismo débil (intensidad de magnetización de saturación $< 0,1 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg} \pm 0,01 \text{ A} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$), lo que facilita la separación magnética de las impurezas.

Brillo: Brillo metálico gris-negro, reflectividad $< 20\% \pm 2\%$ (400-700 nm), utilizado para inspección visual.

Higroscopicidad: Tasa de absorción de humedad $< 0,01\% \pm 0,002\%$ ($25 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 % HR), debe almacenarse en un recipiente sellado.

de las características del polvo de carburo de tungsteno y su aplicación

Estructura cristalina y conductividad térmica: El sistema cristalino hexagonal y la alta conductividad térmica admiten moldes resistentes al desgaste (deformación $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$) y recubrimientos de alta temperatura ($> 1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$).

Densidad y coeficiente de expansión térmica: La alta densidad de compactación y la baja expansión térmica optimizan el rendimiento de sinterización (densidad $> 99\% \pm 0,1\%$) y mejoran la calidad de las piezas fabricadas de forma aditiva ($Ra < 5 \mu m \pm 1 \mu m$).

Morfología y superficie específica: La morfología poligonal y la elevada superficie específica mejoran la actividad de sinterización y son adecuadas para herramientas de corte ($> 300 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$).

Correlación del tamaño de partícula: el WC de grano fino ($< 0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$) mejora la densidad de compactación, mientras que el WC de grano grueso ($5-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$) mejora la eficiencia de apilamiento.

Prueba y control de las propiedades físicas del polvo de carburo de tungsteno

Métodos y normas de medición:

densidad

GB/T 3850-2015 Densidad teórica,

GB/T 1479.1-2011 Densidad aparente,

GB/T 5162-2014 Densidad de compactación,

Estructura cristalina (DRX, GB/T 27708-2011),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Morfología (SEM, GB/T 16594-2008).

Normas de control

Desviación del tamaño de partícula $<5\% \pm 1\%$ (GB/T 19077.1-2008), la pureza afecta la densidad y el carbono libre debe mantenerse $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Las características físicas del polvo de carburo de tungsteno incluyen estructura hexagonal ($a=0,2906 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$, $c=0,2837 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$), densidad (suelto $6,0-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$, compactado $8,5-10,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$, teórico $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$), punto de fusión ($2870 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), conductividad térmica ($84 \text{ W/(m}\cdot\text{K)} \pm 5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$), bajo coeficiente de expansión térmica ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), Morfología poligonal (aristas $<0,05 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$) y excelentes propiedades eléctricas. Estas características le confieren un excelente rendimiento en herramientas de aviación, taladros para minería, moldes resistentes al desgaste y fabricación aditiva. Su rendimiento se optimiza con la variación del tamaño de partícula y la pureza, lo que proporciona una base sólida para la aplicación del carburo cementado.

Propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno (WC)

Como componente principal del carburo cementado, las propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno (WC) son fundamentales para su estabilidad y durabilidad en aplicaciones industriales. A continuación, se presenta una descripción completa de las propiedades químicas del polvo de WC, que abarca la estabilidad química, la resistencia a la corrosión, la resistencia a la oxidación, la reactividad y otras propiedades químicas relacionadas, con base en datos científicos y normas de aplicación industrial (como GB/T 5124-2017). La fecha y hora actuales son el 22 de mayo de 2025 a las 14:12 HKT.

(1) Estabilidad química del polvo de carburo de tungsteno

Estabilidad de la temperatura ambiente

El WC exhibe una estabilidad química extremadamente alta a temperatura ambiente ($25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), no reacciona con la mayoría de los productos químicos y tiene una tasa de descomposición de $<0,0001 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,00002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$.

Estabilidad de ácidos y bases

En soluciones con un pH de 2-12 (como HCl, NaOH), la tasa de corrosión es $<0,001 \text{ mm/año} \pm 0,0002 \text{ mm/año}$, lo que indica su excelente resistencia a ambientes ácidos y alcalinos.

Estabilidad a altas temperaturas

En un entorno sin oxígeno a $<600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, el WC permanece estable sin cambios químicos significativos en la superficie (tasa de pérdida de peso $<0,005 \text{ } \% \pm 0,001 \text{ } \%/ \text{h}$). En una atmósfera inerte (como Ar o N_2 , pureza $>99,99 \text{ } \% \pm 0,01 \text{ } \%$), la estabilidad puede mantenerse hasta $2000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

(2) Resistencia a la corrosión del polvo de carburo de tungsteno

Ambiente ácido

En ácido diluido (como HCl al 10 % o H_2SO_4 , $\text{pH} 2 \pm 0,1$), la tasa de corrosión del WC es $<0,001 \text{ mm/año} \pm 0,0002 \text{ mm/año}$ y no hay picaduras obvias en la superficie (observación SEM,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

profundidad de las picaduras $<0,01 \mu\text{m} \pm 0,002 \mu\text{m}$) .

Ambiente alcalino

En una solución de NaOH al 10% (pH $12 \pm 0,1$), la tasa de corrosión es $<0,002 \text{ mm/año} \pm 0,0005 \text{ mm/año}$, lo que indica una buena resistencia a los álcalis.

Solución salina

En una solución de NaCl al 3,5 % (entorno de agua de mar simulado), la tasa de corrosión es $<0,003 \text{ mm/año} \pm 0,0005 \text{ mm/año}$, lo que es adecuado para entornos resistentes a la corrosión (como equipos químicos).

Importancia de la aplicación

Su excelente resistencia a la corrosión hace que el polvo WC sea adecuado para piezas resistentes al desgaste en condiciones ácidas o alcalinas, como sellos de bombas químicas (vida útil > 5000 horas ± 500 horas).

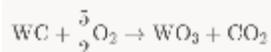
(3) Oxidabilidad del polvo de carburo de tungsteno

Capacidad antioxidante

La entalpía de resistencia a la oxidación del WC es $<800 \text{ kJ/mol} \pm 20 \text{ kJ/mol}$ y apenas se oxida en el aire a $<600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ (tasa de oxidación $<0,01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$).

Oxidación a alta temperatura

A $>600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ en el aire, el WC se oxida lentamente para formar WO_3 (óxido amarillo) con la siguiente fórmula de reacción:



$600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$

Tasa de oxidación: $0,01\text{-}0,05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,005 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$, espesor de la capa de óxido: $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

$1000^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$

La tasa de oxidación aumentó a $0,5 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,05 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$ y el espesor de la capa de óxido fue de $1\text{-}2 \mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$.

Control de la atmósfera

En atmósfera reductora (H_2 , $\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) o vacío ($<10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$), la tasa de oxidación es $<0,001 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,0002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$, lo que es adecuado para el procesamiento a alta temperatura.

Importancia de la aplicación

Se debe evitar la exposición prolongada a entornos oxidantes de alta temperatura (como aire a más de $600^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$). Para prolongar la vida útil, se suelen utilizar recubrimientos (como TiN) o protección en atmósfera inerte (como Ar).

(4) Reactividad del polvo de carburo de tungsteno

Con oxidantes fuertes

reacciona con oxidantes fuertes (como HNO_3 concentrado o H_2O_2) para producir WO_3 , y la velocidad de reacción aumenta con el aumento de la concentración y la temperatura:

$25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, 10% HNO_3 : Velocidad de reacción $<0,01 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002 \text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

80°C±2°C, 30% HNO₃ : velocidad de reacción 0,1-0,5 mg/cm² · h ± 0,05 mg/cm² · h.

Con metal

Durante la sinterización a alta temperatura (>1200 °C ± 10 °C), el WC reacciona con la fase aglutinante (como Co o Ni) para formar una solución sólida (como Co₃W₃C o Ni₃W₃C). El grado de reacción está controlado por la atmósfera:

Atmósfera de hidrógeno (H₂) : velocidad de reacción <0,1 % ± 0,02 %/h, la proporción de fase η (Co₃W₃C) generada es <0,5 % ± 0,1 %.

Atmósfera de vacío: La velocidad de reacción se reduce a <0,05%±0,01%/h, reduciendo la formación de la fase η.

Con no metal

El WC reacciona con el carbono (C) a alta temperatura para generar W₂C (baja dureza, HV <2000 ± 50), y el contenido de carbono debe controlarse (relación molar W: C 1: 1,02 ± 0,01).

Importancia de la aplicación

Durante el proceso de sinterización, la atmósfera (O₂ <10 ppm ± 1 ppm) y el contenido de carbono (carbono libre <0,1 % ± 0,01 %) deben controlarse estrictamente para evitar la degradación del rendimiento.

(5) Características del enlace químico del polvo de carburo de tungsteno

Tipo de enlace: El enlace WC en WC es un enlace mixto covalente-iónico-metálico con una energía de enlace de ~8,6 eV ± 0,1 eV.

Longitud de enlace: La longitud de enlace WC es de 0,219 nm ± 0,001 nm, lo que proporciona una alta resistencia de enlace y estabilidad química.

Estructura electrónica: Los orbitales 5d de W y los orbitales 2p de C se hibridan para formar enlaces covalentes fuertes, con una densidad electrónica de ~0,8 e/Å³ ± 0,05 e/Å³ (cálculo DFT), lo que da como resultado una alta dureza y resistencia a la corrosión.

Importancia de la aplicación: Las fuertes características de unión garantizan la estabilidad del WC en entornos químicos extremos y son adecuadas para herramientas con alta resistencia a la corrosión (como moldes químicos).

(6) Actividad química superficial del polvo de carburo de tungsteno

Energía superficial: La energía superficial del polvo de WC es de 1,5-2,0 J/m² ± 0,2 J/m² (calculada por el método BET), que aumenta a medida que disminuye el tamaño de partícula.

Nivel submicrónico (0,1-0,5 μm ± 0,01 μm) : energía superficial ~2,0 J/m² ± 0,2 J/m².

Nivel micrométrico (1-5 μm ± 0,01 μm) : energía superficial ~1,5 J/m² ± 0,2 J/m².

Adsorción: La adsorción de polvo de WC para O₂ y H₂O es <0,01 mg/g ± 0,002 mg/g (25 °C, 50 % HR), lo que indica una baja actividad superficial.

Importancia de la aplicación: La baja actividad superficial reduce la oxidación del polvo durante el almacenamiento y el procesamiento (óxido <0,05 % ± 0,01 %), pero se requieren aditivos (como VC, 0,1 %-0,5 % ± 0,01 %) para reducir la energía superficial y controlar el crecimiento del grano.

(7) Otras propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno

volatilidad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El WC no tiene una volatilidad obvia a $<2000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (tasa de volatilidad $<0,001\text{ \%} \pm 0,0002\text{ \%}/\text{h}$) y comienza a descomponerse y volatilizar vapor de CO y W a $>2500\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Solubilidad

Insoluble en agua (solubilidad $<0,001\text{ g/L} \pm 0,0002\text{ g/L}$) y la mayoría de disolventes orgánicos (como etanol, acetona), con una solubilidad de $<0,002\text{ g/L} \pm 0,0005\text{ g/L}$.

toxicidad

El polvo de WC no es tóxico ($\text{LD}_{50} >5000\text{ mg/kg}$), pero la inhalación de partículas finas ($<0,5\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) puede causar irritación pulmonar y se debe usar equipo de protección.

Asociación integral de impacto y aplicación

Estabilidad química y resistencia a la corrosión

Su alta estabilidad favorece la aplicación del WC en ambientes ácidos y alcalinos, como sellos de equipos químicos (vida útil $>5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$).

Oxidación y reactividad

La oxidación a alta temperatura y la formación de la fase η deben controlarse, y es adecuado para el procesamiento a alta temperatura ($>1000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) en una atmósfera inerte, como las herramientas de aviación.

Enlaces químicos y actividad superficial

Los enlaces fuertes y la baja actividad superficial garantizan una estabilidad de almacenamiento a largo plazo (óxidos $<0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$) y son adecuados para recubrimientos resistentes al desgaste (resistencia de unión $>70\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$).

Adaptabilidad ambiental

La baja solubilidad y volatilidad respaldan la confiabilidad del WC en una variedad de condiciones de trabajo, como brocas de minería (vida útil $>1000\text{ m} \pm 100\text{ m}$).

Detección y control de polvo de carburo de tungsteno

Métodos de medición: tasa de corrosión (GB/T 4335-2013), tasa de oxidación (método de análisis químico GB/T 5124-2017), energía superficial (BET, GB/T 19587-2017), volatilidad (TG-DSC, GB/T 17137-1997).

Estándares de control: carbono libre $<0,1\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$, óxido $<0,05\text{ \%} \pm 0,01\text{ \%}$, control de atmósfera ($\text{O}_2 <10\text{ ppm} \pm 1\text{ ppm}$).

Las propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno incluyen alta estabilidad química (tasa de corrosión $<0,001\text{ mm/año} \pm 0,0002\text{ mm/año}$), excelente resistencia a la corrosión (pH 2-12), resistencia a la oxidación (tasa de oxidación $<600\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C} <0,01\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002\text{ mg/cm}^2 \cdot \text{h}$), reactividad limitada (necesidad de controlar la formación de la fase η y W_2C), fuerte enlace WC (energía de enlace $\sim 8,6\text{ eV} \pm 0,1\text{ eV}$), baja actividad superficial (energía superficial $1,5\text{-}2,0\text{ J/m}^2 \pm 0,2\text{ J/m}^2$) y baja volatilidad y solubilidad. Estas características hacen que tenga un buen desempeño en equipos químicos, recubrimientos resistentes al desgaste, herramientas de aviación y taladros de minería, y la optimización de las propiedades químicas proporciona una garantía para la aplicación de alto rendimiento del carburo cementado.

Producción y preparación de polvo de carburo de tungsteno: proceso de preparación por

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

carburación (1450-1600 °C)

Principio del proceso

El método de carburación es el método de preparación más utilizado en la industria y consiste en generar WC mediante la reacción a alta temperatura de polvo de tungsteno (W) y negro de humo (C). La fórmula de reacción es la siguiente: $W + C \rightarrow WC$

La reacción se lleva a cabo a una temperatura elevada de 1450-1600 °C \pm 10 °C, generalmente en atmósfera de hidrógeno (H₂) o de vacío. Termodinámicamente, la energía libre de Gibbs de la reacción es negativa ($\Delta G < -38 \text{ kJ/mol} \pm 2 \text{ kJ/mol}$), lo que garantiza la reacción espontánea. Cinéticamente, los átomos de carbono entran en la red de tungsteno mediante difusión en estado sólido (coeficiente de difusión $\sim 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$), formando gradualmente granos de WC.

Parámetros del proceso:

materia prima:

Polvo de tungsteno: pureza $>99,9\% \pm 0,01\%$, tamaño de partícula $0,5-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Negro de carbón: pureza $>99,5\% \pm 0,01\%$, tamaño de partícula $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Condiciones de reacción:

Temperatura: 1450-1600°C \pm 10°C.

Atmósfera: hidrógeno (H₂, pureza $>99,99\% \pm 0,01\%$, caudal 50 L/min \pm 5 L/min) o vacío ($< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$).

Velocidad de calentamiento: 5-10°C/min \pm 0,5°C/min.

Tiempo de mantenimiento: 2-4 horas \pm 0,1 horas.

equipo:

Horno de grafito: potencia $>100 \text{ kW} \pm 10 \text{ kW}$, resistencia a la temperatura $>1800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$.

Horno fijo o rotatorio: Velocidad del horno rotatorio 5 rpm \pm 0,5 rpm para mejorar la uniformidad de la mezcla.

Optimización de procesos:

Selección de temperatura:

1450 °C \pm 10 °C: Produce WC submicrónico ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), con dureza aumentada en un 5% \pm 1% (HV $> 2900 \pm 50$), adecuado para herramientas de alta precisión.

1600 °C \pm 10 °C: Produce WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), aumenta el rendimiento en un 10% \pm 2% ($> 12 \text{ t/lote} \pm 1 \text{ t}$) y es adecuado para brocas de alta tenacidad.

Mejoras del equipamiento:

El horno rotatorio mejora la uniformidad del tamaño de partícula (desviación $<5\% \pm 1\%$) a través de la mezcla dinámica y aumenta el rendimiento en un 5% \pm 1%, lo que es mejor que el horno fijo (tasa de aglomeración $>10\% \pm 2\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Control de la atmósfera:

Una atmósfera de hidrógeno ($O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) inhibe la oxidación (óxidos $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$) y aumenta la pureza en un $1 \% \pm 0,2 \%$.

La atmósfera de vacío reduce la volatilización de carbono (pérdida $< 0,1\% \pm 0,01\%$) y aumenta el rendimiento en un $2\% \pm 0,5\%$.

Análisis de factores influyentes:

Relación de materia prima:

La relación molar W_2C se controla en $1:1,02 \pm 0,01$. Un exceso de carbono ($> 1,05$) produce carbono libre ($> 0,2 \% \pm 0,01 \%$), lo que reduce la dureza en un $3 \% \pm 0,5 \%$ ($HV < 2700 \pm 50$); una cantidad insuficiente de carbono ($< 0,98$) genera W_2C (dureza $HV < 2000 \pm 50$) y la resistencia a la flexión disminuye en un $5 \% \pm 1 \%$ ($< 3800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Temperatura de reacción:

de $1450-1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Por encima de $1650 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, se induce crecimiento de grano ($> 10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la dureza disminuye un $5 \% \pm 1 \%$; por debajo de $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, la reacción es incompleta (rendimiento $< 95 \% \pm 1 \%$) y la pureza disminuye un $2 \% \pm 0,5 \%$.

Control de la atmósfera:

La atmósfera de hidrógeno ($O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) inhibe eficazmente la oxidación; la atmósfera de vacío reduce la volatilización del carbono.

Tamaño de partícula de la materia prima:

El polvo de tungsteno $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ produce WC submicrónico ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) con una dureza de $HV 3000 \pm 50$; $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ produce WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) con un aumento de tenacidad de $10 \% \pm 2 \%$ ($K_{1c} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Rendimiento del equipo:

El horno rotatorio (velocidad $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) redujo la aglomeración ($< 5\% \pm 1\%$), lo que fue mejor que el horno fijo (aglomeración $> 10\% \pm 2\%$, reducción de pureza $1\% \pm 0,2\%$).

Ejemplos de aplicaciones de ingeniería del polvo de carburo de tungsteno:

herramientas de aviación

Mediante un proceso de horno rotatorio a $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ y atmósfera de H_2 , se genera un polvo de $0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$ de espesor de pared (WC), con una dureza HV de 2950 ± 50 y un contenido de carbono libre del $0,08 \% \pm 0,01 \%$. Se utiliza para el corte de aleaciones Ti-6Al-4V ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$, velocidad $> 200 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$), con una pérdida por desgaste de tan solo $0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ y una vida útil de $12 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$.

brocas para minería

Utilizando un proceso de atmósfera de vacío y $1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, se genera un polvo WC de $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, con una tenacidad $K_{1c} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$ y una vida útil de perforación en roca dura (resistencia a la compresión $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) $> 1000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$.

Molde resistente al desgaste

de $1-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dureza y tenacidad equilibradas, matriz de estampación en frío ($> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces), deformación $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.2 Otros métodos de preparación

Método de plasma:

Principio: utilizar plasma de alta temperatura ($>5000\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$) para hacer reaccionar polvo de tungsteno con metano (CH_4) para generar WC.

Parámetros del proceso:

Potencia del plasma: $50\text{-}100\text{ kW} \pm 10\text{ kW}$.

Atmósfera: Argón (Ar, pureza $>99,99\% \pm 0,01\%$).

Velocidad de enfriamiento: $>100^{\circ}\text{C/s} \pm 10^{\circ}\text{C/s}$.

Ventajas: Genera WC ultrafino ($0,1\text{-}0,3\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) con alta pureza (carbono libre $< 0,05\% \pm 0,01\%$), adecuado para aplicaciones de alta gama.

Aplicación: Herramientas superduras (como brocas para PCB, diámetro de orificio $<0,1\text{ mm} \pm 0,01\text{ mm}$).

Método mecanoquímico:

Principio: El polvo de tungsteno y el negro de carbón reaccionan mecánicamente para generar WC a través de una molienda de bolas de alta energía (velocidad de rotación $300\text{-}500\text{ rpm} \pm 10\text{ rpm}$).

Parámetros del proceso:

Tiempo de molienda de bolas: $20\text{-}50\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$.

Relación bola-material: $10:1\text{ a }20:1 \pm 0,1$.

Ventajas: Puede generar WC a escala nanométrica ($<0,1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), dureza $\text{HV} > 3100 \pm 50$.

Aplicación: Recubrimiento nano (como pulverización de palas de aviación, resistencia de unión $> 80\text{ MPa} \pm 5\text{ MPa}$).

Deposición química de vapor (CVD):

Principio: El WC se deposita por reacción de WF_6 y CH_4 a $800\text{-}1000^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$.

Parámetros del proceso:

Velocidad de deposición: $0,1\text{-}0,5\text{ }\mu\text{m}/\text{min} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$.

Atmósfera: gas mixto H_2/Ar .

Ventajas: Alta pureza (carbono libre $<0,03\% \pm 0,01\%$), adecuado para recubrimiento.

Aplicación: Recubrimiento resistente al desgaste (álabes de turbinas de aviación, vida útil $>5000\text{ horas} \pm 500\text{ horas}$).

4.1.3 Tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es el material principal del carburo cementado, y sus características de tamaño de partícula afectan directamente su rendimiento y eficacia en la aplicación. A continuación, se presenta un análisis exhaustivo del significado, el rango, la distribución, el impacto en el rendimiento, la tecnología de control de calidad y los métodos de detección del tamaño de partícula, basado en datos científicos y estándares industriales (como GB/T 19077.1-2008). La fecha y hora actuales son el 22 de mayo de 2025 a las 14:20 HKT.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(1) La importancia del tamaño de las partículas de polvo de carburo de tungsteno

Determinación del rendimiento: El tamaño de partícula del polvo WC es un parámetro clave que afecta el rendimiento del carburo cementado, determinando directamente la dureza, la resistencia al desgaste, la tenacidad y el comportamiento de sinterización.

de partícula fina ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la dureza ($\text{HV} > 3000 \pm 50$) y la resistencia al desgaste, lo que lo hace adecuado para el mecanizado de alta precisión.

El tamaño de partícula grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la tenacidad ($K_{1c} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), adecuado para escenarios de alto impacto.

Adaptabilidad al procesamiento: El tamaño de partícula afecta la fluidez ($<30 \text{s}/50 \text{g} \pm 2 \text{s}$, GB/T 1482-2010) y el rendimiento de prensado del polvo. El WC de grano fino es adecuado para la fabricación aditiva (rugosidad superficial $R_a < 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$), mientras que el WC de grano grueso es adecuado para la sinterización tradicional.

Rendimiento de sinterización: la distribución uniforme del tamaño de partícula (desviación $<5\% \pm 1\%$) garantiza una densidad de sinterización ($>99\% \pm 0,1\%$), reduce la porosidad ($<0,05\% \pm 0,01\%$) y mejora la resistencia general.

de partículas específicos, como herramientas de aviación ($0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y brocas de minería ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

(2) Rango de tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno

Rango general: El tamaño de partícula de polvo de WC suele estar entre $0,1$ y $10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Clasificación:

Nanoescala ($<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): dureza extremadamente alta ($\text{HV} > 3100 \pm 50$), utilizada para mecanizado de ultraprecisión.

Grado submicrónico ($0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): dureza $\text{HV} 3000 \pm 50$, adecuado para herramientas de alta precisión.

Grado micrométrico ($1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): dureza $\text{HV} 2500-2800 \pm 50$, tenacidad $K_{1c} 15-20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, adecuado para la fabricación de moldes.

Grado grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$): tenacidad $K_{1c} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, adecuada para brocas de minería.

de tamaño de partícula está determinado por el proceso de preparación, como la carbonización ($1450-1600 \text{°C} \pm 10 \text{°C}$) produce $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, y el método mecanoquímico produce $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

(3) Distribución del tamaño de partículas y calidad del polvo de carburo de tungsteno

Características de distribución:

Se utilizó el análisis del tamaño de partículas láser (GB/T 19077.1-2008) para medir D10, D50 y D90.

Nivel submicrónico: $D50=0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D10=0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D90=0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

de micras: $D50=3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D10=1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D90=5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Grado grueso: $D50=8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D10=5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $D90=10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Evaluación de pros y contras:

Ventajas: distribución estrecha (desviación $<5\% \pm 1\%$), partículas uniformes, alta densidad después

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de la sinterización ($>99\% \pm 0,1\%$) y buena consistencia de rendimiento.

Desventajas: amplia distribución (desviación $> 10\% \pm 2\%$), partículas irregulares, mayor porosidad después de la sinterización ($> 0,1\% \pm 0,02\%$), grandes fluctuaciones de rendimiento (como desviación de dureza > 100 HV).

Factores influyentes: tamaño de partícula de la materia prima (polvo de tungsteno $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), tiempo de reacción (2-4 horas $\pm 0,1$ horas), velocidad de enfriamiento ($> 50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$).

(4) Efecto del tamaño del polvo de carburo de tungsteno en el rendimiento del carburo cementado

de partícula, mayor será la dureza. El acero submicrónico ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presenta una dureza HV $>3000 \pm 50$, ideal para herramientas superduras (velocidad de corte $>300 \text{ m}/\text{min} \pm 10 \text{ m}/\text{min}$). de partícula, mayor será la tenacidad. El WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presenta una tenacidad de $K_{Ic} > 20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, ideal para brocas de minería (resistencia a la compresión $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Resistencia al desgaste: el WC de grano fino mejora la resistencia al desgaste, desgaste de la herramienta de aviación ($0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$, vida útil > 15 horas ± 1 hora.

Rendimiento de sinterización: distribución uniforme (desviación $<5\% \pm 1\%$), porosidad reducida ($<0,05\% \pm 0,01\%$) y resistencia a la flexión mejorada ($>3800 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Rendimiento de procesamiento: El WC de grano fino mejora la uniformidad de distribución del polvo (fluidez $<30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$) y es adecuado para la impresión 3D (resistencia a la tracción $> 800 \text{ MPa} \pm 50 \text{ MPa}$).

Ejemplo: se utiliza polvo WC de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (desviación de distribución $<3\% \pm 0,5\%$) para brocas de PCB, con una vida útil de $>10^5$ orificios $\pm 10^4$ orificios; se utiliza polvo WC de $8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para brocas de PDC, con una velocidad de perforación de $>5 \text{ m}/\text{h} \pm 0,5 \text{ m}/\text{h}$.

(5) Tecnología de control de calidad del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno

Control de materia prima: El tamaño de partícula de polvo de tungsteno $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ genera una columna de agua de $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y se inhibe la maduración de Ostwald (tasa de crecimiento $\sim 10^{-9} \text{ m}/\text{s} \pm 10^{-10} \text{ m}/\text{s}$).

Tiempo de reacción: 2 horas $\pm 0,1$ horas ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para generar WC fino ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$); 4 horas $\pm 0,1$ horas ($1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para generar WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Velocidad de enfriamiento: El enfriamiento rápido ($>50 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$) inhibe el crecimiento del grano ($<0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$), con una desviación de $<3\% \pm 0,5\%$.

Aditivos: El carburo de vanadio (VC, $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) reduce la energía superficial ($<1 \text{ J}/\text{m}^2 \pm 0,1 \text{ J}/\text{m}^2$) y reduce el tamaño de partícula en un $10\% \pm 2\%$; el carburo de cromo (Cr_3C_2 , $0,5\% \pm 0,01\%$) inhibe la difusión (coeficiente $<10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$), con una desviación de $<2\% \pm 0,5\%$.

Optimización del equipo: Horno rotatorio (velocidad $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) mezcla dinámica, uniformidad de tamaño de partícula mejorada (desviación $<5\% \pm 1\%$).

Post-tratamiento: Cribado (tamaño de poro $<10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para eliminar aglomerados ($<5\% \pm 1\%$); clasificación por flujo de aire (GB/T 19077.1-2008) para ajustar la distribución, con una desviación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de $<2\% \pm 0,5\%$.

(6) Método de detección del tamaño de partícula de polvo de carburo de tungsteno

Análisis del tamaño de partículas láser: según GB/T 19077.1-2008, el difractor láser se utiliza para medir D10, D50 y D90, con una desviación de $<5\% \pm 1\%$.

Microscopía electrónica de barrido (SEM): Según GB/T 16594-2008, observar la morfología de las partículas (poligonal, borde $<0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$).

norma GB/T 14634.2-2010, se mide la velocidad de sedimentación y se estima la distribución del tamaño de partícula. Es adecuado para partículas gruesas ($>5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Método de superficie específica: Según la norma GB/T 19587-2017 (método BET), se calcula el tamaño medio de partícula. La superficie específica submicrónica es $>3 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$.

Monitorización en línea: Durante el proceso de producción se utiliza un analizador láser de tamaño de partículas en línea para controlar la distribución en tiempo real (desviación $<3\% \pm 0,5\%$).

Asociación integral de impacto y aplicación

Optimización del rendimiento: el WC de grano fino ($0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la dureza y la resistencia al desgaste, adecuado para herramientas de aviación (vida útil $> 15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$); el WC de grano grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la tenacidad, adecuado para brocas de minería (vida útil $> 1000 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$).

Eficiencia del control de calidad: El horno rotatorio y los aditivos (VC, Cr_3C_2) garantizan una distribución uniforme (desviación $<5\% \pm 1\%$) y mejoran la consistencia de sinterización (densidad $>99\% \pm 0,1\%$).

Confiabilidad de detección: la combinación del análisis del tamaño de partículas láser y SEM proporciona datos precisos de distribución y morfología para optimizar los parámetros del proceso. de carburo de tungsteno son cruciales para el rendimiento del carburo cementado. El rango de tamaño de partícula ($0,1-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) abarca desde nanómetros hasta granos gruesos, y su distribución uniforme (desviación $<5\% \pm 1\%$) garantiza un rendimiento consistente. Las partículas finas aumentan la dureza, las gruesas la tenacidad, y la tecnología de control de calidad (control de materias primas, aditivos, horno rotatorio) y los métodos de detección (análisis láser del tamaño de partícula, SEM) garantizan un tamaño de partícula preciso. La optimización del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno (WC) proporciona un alto rendimiento para herramientas de aviación, perforadoras mineras, moldes resistentes al desgaste y otros campos.

4.1.4 Pureza del polvo de carburo de tungsteno

La pureza del polvo de carburo de tungsteno (WC) es el indicador clave de su control de calidad, lo que afecta directamente el rendimiento, la procesabilidad y la vida útil del carburo cementado. A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de la definición de pureza, las principales impurezas, los factores de influencia, las estrategias de optimización, los métodos de detección y los efectos de la aplicación, basado en datos científicos y estándares industriales (como GB/T 5124-2017). La fecha y hora actuales son el 22 de mayo de 2025 a las 14:23 HKT.

(1) Definición e índice de pureza del polvo de carburo de tungsteno

Definición: La pureza del polvo WC se refiere al contenido de su componente principal WC, y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

generalmente se requiere que el contenido total de impurezas (carbono libre, óxidos, impurezas metálicas, etc.) sea lo más bajo posible.

Métricas clave:

Carbono libre: $<0,1\% \pm 0,01\%$. Un valor demasiado alto reducirá la dureza ($HV < 2800 \pm 50$) y la densidad de sinterización ($<99\% \pm 0,1\%$).

Óxido (como WO_3): $<0,05\% \pm 0,01\%$. Un valor demasiado alto provocará un aumento de la porosidad ($>0,1\% \pm 0,02\%$).

Impurezas metálicas (como Fe, Cr): $<0,02\% \pm 0,005\%$, para evitar afectar el rendimiento del carburo cementado.

Pureza de la fase WC: $>99,8\% \pm 0,02\%$, lo que garantiza que no haya W_2C ni otras fases secundarias (baja dureza, $HV < 2000 \pm 50$).

(2) Principales impurezas en el polvo de carburo de tungsteno y sus fuentes

Carbono libre:

(relación molar W:C $> 1,05 \pm 0,01$) o reacción incompleta (temperatura $< 1400\text{ °C} \pm 10\text{ °C}$) durante la preparación de la carbonización.

Impacto: Cuando el carbono libre $> 0,2\% \pm 0,01\%$, la dureza disminuye un $3\% \pm 0,5\%$ ($HV < 2700 \pm 50$) y la porosidad aumenta después de la sinterización ($> 0,2\% \pm 0,02\%$).

Óxido:

Fuente: Oxidación de materias primas (el polvo de tungsteno contiene $O > 0,1\% \pm 0,01\%$) o alto contenido de oxígeno en la atmósfera durante el proceso de preparación ($O_2 > 10\text{ ppm} \pm 1\text{ ppm}$).

Impacto: Cuando el contenido de óxido es $> 0,05\% \pm 0,01\%$, la porosidad aumenta después de la sinterización ($> 0,1\% \pm 0,02\%$) y la resistencia disminuye en un $5\% \pm 1\%$ (resistencia a la flexión $< 3800\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$).

Impurezas metálicas:

Fuente: Desgaste del equipo (como Fe introducido desde el molino de bolas, $> 0,1\% \pm 0,01\%$) o materias primas impuras (Cr, Mo, etc.).

Impacto: Cuando Fe $> 0,02\% \pm 0,005\%$, la dureza disminuye en un $2\% \pm 0,5\%$ y la resistencia a la corrosión disminuye (tasa de corrosión $> 0,002\text{ mm/año} \pm 0,0005\text{ mm/año}$).

(3) Efecto de la pureza del polvo de carburo de tungsteno en el rendimiento del carburo cementado

Dureza y resistencia al desgaste: Alta pureza (carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$) garantiza dureza $HV > 2900 \pm 50$, desgaste de herramientas de aviación $< 0,08\text{ mm} \pm 0,02\text{ mm}$, vida útil $> 15\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$.

Tenacidad: óxido $< 0,03\% \pm 0,01\%$ Porosidad reducida, tenacidad $K_{Ic} > 18\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$, vida útil de la broca minera $> 1200\text{ m} \pm 100\text{ m}$.

Rendimiento de sinterización: alta pureza (fase WC $> 99,8\% \pm 0,02\%$), densidad mejorada ($> 99\% \pm 0,1\%$), resistencia a la compresión $> 4000\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$.

Resistencia a la corrosión: Las impurezas metálicas $< 0,02\% \pm 0,005\%$ garantizan resistencia a la corrosión (pH 2-12, tasa de corrosión $< 0,001\text{ mm/año} \pm 0,0002\text{ mm/año}$), adecuado para equipos químicos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El polvo con un contenido de carbono libre de $0,07\% \pm 0,01\%$ y un contenido de óxido de $<0,02\% \pm 0,005\%$ se utiliza para moldes resistentes al desgaste y su vida útil es $>10^6$ veces $\pm 10^5$ veces, lo que es mejor que el WC con un contenido de carbono libre de $0,2\% \pm 0,01\%$ (vida útil $<8 \times 10^5$ veces $\pm 10^5$ veces).

(4) Estrategia de optimización de la pureza del polvo de carburo de tungsteno

Control de materia prima:

Pureza del polvo de tungsteno $> 99,9\% \pm 0,01\%$, que contiene O $< 0,05\% \pm 0,01\%$; pureza del negro de humo $> 99,5\% \pm 0,01\%$, que contiene O $< 0,03\% \pm 0,01\%$.

Efecto: Reduce los óxidos iniciales y los óxidos terminados en $0,02\% \pm 0,005\%$.

Control del contenido de carbono:

La relación molar W:C es $1:1,01 \pm 0,01$, lo que garantiza una reacción completa, reduce el carbono libre a $0,08\% \pm 0,01\%$ y aumenta la dureza en un $2\% \pm 0,5\%$.

El exceso de carbono ($>1,05$) produce grafito ($>0,3\% \pm 0,01\%$), mientras que la cantidad insuficiente de carbono ($<0,98$) produce W_2C .

Control de la atmósfera:

Atmósfera de hidrógeno (H_2 , $O_2 < 10$ ppm ± 1 ppm): reducción de WO_3 (tasa de reducción $>99\% \pm 1\%$), óxido $<0,03\% \pm 0,01\%$.

Atmósfera de vacío ($<10^{-2}$ Pa $\pm 10^{-3}$ Pa): inhibe la volatilización del carbono y aumenta la pureza en un $1\% \pm 0,2\%$.

Posprocesamiento:

de poro $<10 \mu m \pm 0,1 \mu m$): elimina aglomerados ($<5\% \pm 1\%$) y aumenta la pureza en un $0,5\% \pm 0,1\%$.

Decapado (HCl, pH $2 \pm 0,1$): eliminar Fe ($<0,01\% \pm 0,002\%$), aumentar la dureza en $1\% \pm 0,2\%$.

Mejoras del equipamiento:

Utilice un horno de grafito de alta pureza (que contenga C $<0,01\% \pm 0,002\%$) para reducir la contaminación de carbono.

El horno rotatorio (velocidad 5 rpm $\pm 0,5$ rpm) mejoró la uniformidad de la reacción y redujo el carbono libre en un $0,02\% \pm 0,005\%$.

(5) Método de detección

Detección de carbono libre: según el método de análisis químico GB/T 5124-2017, el contenido de CO_2 se mide después de la combustión a alta temperatura con una precisión de $\pm 0,005\%$.

El contenido de C se determina mediante disolución ácida y titulación, con una precisión de $\pm 0,002\%$.

Detección de impurezas metálicas: ICP-MS (GB/T 13748.20-2009), detección de Fe, Cr, etc., límite de detección $<0,001\%$.

Análisis de pureza de fase: difracción de rayos X (XRD, GB/T 27708-2011) para confirmar la pureza de la fase WC y excluir la fase W_2C o grafito.

Monitorización online: Durante el proceso de producción se utilizan analizadores de gases infrarrojos para monitorizar en tiempo real las emisiones de CO_2 y controlar el carbono libre ($<0,1\% \pm 0,01\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Asociación integral de impacto y aplicación

Rendimiento mejorado: La alta pureza (carbono libre $<0,1\% \pm 0,01\%$, óxido $<0,05\% \pm 0,01\%$) garantiza una alta dureza ($HV >2900 \pm 50$) y tenacidad ($K_{IC} > 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) del carburo cementado.

Optimización de procesos: El control de la atmósfera y el postratamiento (como el decapado) reducen significativamente las impurezas, lo que resulta adecuado para aplicaciones de alta gama (herramientas aeroespaciales, brocas para minería).

Confiabilidad en la detección: combinación de análisis químico y XRD para garantizar datos de pureza precisos y optimizar los procesos de producción.

Resumir

La pureza del polvo de carburo de tungsteno se basa en carbono libre $<0,1\% \pm 0,01\%$, óxido $<0,05\% \pm 0,01\%$ e impurezas metálicas $<0,02\% \pm 0,005\%$ como indicadores clave. Estos indicadores afectan directamente la dureza, la tenacidad, el rendimiento de sinterización y la resistencia a la corrosión del carburo cementado. La pureza se puede mejorar eficazmente mediante el control de la materia prima, una proporción precisa de carbono, la optimización de la atmósfera y la tecnología de posprocesamiento. El método de detección (análisis químico, XRD) garantiza una calidad estable. El polvo de carburo de tungsteno de alta pureza ofrece un excelente rendimiento para herramientas de aviación, moldes resistentes al desgaste y otros campos.

4.1.5 Contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno es un parámetro clave en su preparación y optimización del rendimiento, que afecta directamente su estabilidad química, dureza y comportamiento de sinterización.

(1) Definición e índice del contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

Definición: El contenido de carbono se refiere al contenido total de carbono en el polvo de WC, incluyendo el carbono ligado (carbono que forma el WC) y el carbono libre (carbono no reaccionado). El contenido teórico de carbono del WC ideal es del $6,13\% \pm 0,01\%$ (relación molar W:C = 1:1).

Indicadores clave del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno:

total de carbono : $6,0\%-6,2\% \pm 0,01\%$, incluido el carbono ligado y el carbono libre.

Carbono libre: $<0,1\% \pm 0,01\%$. Un valor demasiado alto reducirá la dureza y la densidad.

Carbono ligado: $5,9\%-6,1\% \pm 0,01\%$, lo que refleja el grado de formación de la fase WC.

(2) Rango de contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

La fracción másica de carbono correspondiente a la fórmula molecular WC es $6,13\% \pm 0,01\%$, es decir, 1 mol W (183,84 g) se combina con 1 mol C (12,01 g).

Alcance real:

Estado bajo en carbono ($5,9\%-6,0\% \pm 0,01\%$): se puede generar W_2C (contenido de carbono $3,16\% \pm 0,01\%$) o fase W y la dureza disminuye ($HV <2000 \pm 50$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Rango normal (6,0%-6,2%±0,01%): cerca del valor teórico, adecuado para carburo cementado de alto rendimiento.

Estado alto en carbono (>6,2%±0,01%): el carbono libre aumenta (>0,2%±0,01%), la dureza disminuye (HV <2700±50) y la porosidad aumenta (>0,2%±0,02%).

Influencia de la preparación: El método de carbonización (1450-1600 °C ± 10 °C) controla la relación molar W: C en 1: 1,01 ± 0,01 para garantizar un contenido de carbono estable.

(3) Efecto del contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno en el rendimiento del carburo cementado

Dureza y resistencia al desgaste: El contenido de carbono 6,0%-6,2%±0,01% garantiza una dureza HV >2900±50, desgaste de la herramienta de aviación <0,08 mm±0,02 mm, vida útil >15 horas±1 hora.

Tenacidad: Un bajo contenido de carbono (<5,9 % ± 0,01 %) genera W₂ C y la tenacidad disminuye (K_{1c} <10 MPa·m^{1/2} ± 0,5); un alto contenido de carbono (>6,2 % ± 0,01 %) genera carbono libre que reduce la consistencia de la tenacidad.

Propiedades de sinterización: El contenido de carbono 6,1% ± 0,01% optimiza la densidad de sinterización (> 99% ± 0,1%), resistencia a la compresión > 4000 MPa ± 100 MPa; el carbono libre > 0,1% ± 0,01% conduce a una mayor porosidad (> 0,1% ± 0,02%).

Resistencia a la corrosión: Carbono libre <0,1% ± 0,01% Mantiene la resistencia a la corrosión (pH 2-12, tasa de corrosión <0,001 mm/año ± 0,0002 mm/año).

El polvo con un contenido de carbono de 6,08% ± 0,01% (carbono libre 0,07% ± 0,01%) se utiliza para moldes resistentes al desgaste y su vida útil es >10⁶ veces ± 10⁵ veces, lo que es mejor que el WC con un contenido de carbono de 6,25% ± 0,01% (carbono libre 0,2% ± 0,01%) (vida útil <8 × 10⁵ veces ± 10⁵ veces).

(4) Estrategia de optimización del contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

Control de materia prima:

La pureza del negro de carbón es >99,5% ± 0,01% y el tamaño de partícula es <0,1 μm ± 0,01 μm, lo que garantiza una distribución uniforme del carbono.

El polvo de tungsteno contiene O <0,05% ± 0,01%, lo que reduce la reacción de oxidación e interfiere con el contenido de carbono.

Relación de contenido de carbono:

La relación molar W:C es 1:1,01 ± 0,01, con un ligero exceso de carbono para compensar la volatilización, el carbono unido alcanza el 6,1 % ± 0,01 % y el carbono libre es < 0,1 % ± 0,01 %.

El exceso de carbono (>1,05) produce grafito (>0,3%±0,01%); la cantidad insuficiente de carbono (<0,98) produce W₂ C.

Condiciones de reacción:

Temperatura: 1450-1600 °C ± 10 °C, la reacción está completa, tasa de unión de carbono > 98 % ± 1 %.

Atmósfera: Hidrógeno (H₂, O₂ < 10 ppm±1 ppm) o vacío (<10⁻²Pa ± 10⁻³ Pa), reducen la volatilización del carbono (pérdida <0,1%±0,01 %).

Tiempo de aislamiento: 2-4 horas ± 0,1 hora, para garantizar una reacción de carbonización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

suficiente.

Posprocesamiento:

Tratamiento térmico ($800^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$, atmósfera de H_2): eliminación de carbono libre (reducción de $0,05\%\pm 0,01\%$).

Lavado ácido (HCl , $\text{pH } 2\pm 0,1$): Elimina las impurezas causadas por la carbonización incompleta y aumenta la pureza en un $0,5\%\pm 0,1\%$.

Optimización de equipos:

El horno rotatorio (velocidad $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) mejora la uniformidad de la mezcla y la desviación de la distribución de carbono es $< 2 \% \pm 0,5 \%$.

El horno de grafito de alta pureza (que contiene $\text{C} < 0,01\% \pm 0,002\%$) reduce la contaminación por carbono exógeno.

(5) Método de detección del contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

Contenido total de carbono: según GB/T 5124-2017, método de absorción infrarroja de combustión a alta temperatura, mide el contenido de CO_2 , precisión $\pm 0,005\%$.

Carbono ligado: después de la combustión a alta temperatura, el carbono libre se separa mediante disolución ácida y el carbono restante es carbono ligado con una precisión de $\pm 0,002\%$.

Carbono libre: calculado por diferencia (carbono total - carbono unido) o método de combustión directa, precisión $\pm 0,005\%$.

Análisis de fases: difracción de rayos X (XRD, GB/T 27708-2011) para confirmar la pureza de la fase WC y detectar la fase W_2C o grafito.

Monitorización online: El analizador de gases infrarrojo monitoriza las emisiones de CO_2 en tiempo real y controla el carbono libre ($< 0,1\%\pm 0,01\%$).

Influencia integral del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno y su correlación con la aplicación

El contenido de $6,0\%-6,2\%\pm 0,01\%$ (carbono libre $< 0,1\%\pm 0,01\%$) garantiza una alta dureza ($\text{HV} > 2900\pm 50$) y tenacidad ($K_{1c} > 18 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$) del carburo cementado.

Eficiencia del proceso: La relación precisa y el control de la atmósfera reducen la desviación de carbono, adecuado para herramientas de aviación (vida útil > 15 horas ± 1 hora) y moldes resistentes al desgaste ($> 10^6$ veces $\pm 10^5$ veces).

Confiabilidad en la detección: La combinación de análisis químico y XRD proporciona datos precisos sobre el contenido de carbono y optimiza el proceso de producción.

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno se encuentra en el rango ideal de $6,0\%$ a $6,2\% \pm 0,01\%$, con un contenido de carbono combinado de $5,9\%$ a $6,1\% \pm 0,01\%$ y un contenido de carbono libre de $< 0,1\% \pm 0,01\%$, lo cual es crucial para la dureza, la tenacidad y el rendimiento de sinterización. El contenido de carbono se puede ajustar eficazmente mediante el control de la materia prima, la optimización de la relación agua:carbono, el ajuste de las condiciones de reacción y la tecnología de posprocesamiento. El método de detección (absorción infrarroja, XRD) garantiza una calidad estable. El polvo de carburo de tungsteno con un contenido de carbono adecuado proporciona un alto rendimiento para herramientas de aviación, brocas de minería y otros campos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.6 Control de calidad y pruebas de tamaño de partícula, pureza, contenido de carbono, etc. de polvo de carburo de tungsteno

El tamaño de partícula, la pureza y el contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno (WC) son parámetros clave para su control de calidad, que determinan directamente el rendimiento y la fiabilidad de la aplicación del carburo cementado. A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de la tecnología de control de calidad, los métodos de detección y su impacto, basado en datos científicos y estándares industriales (como GB/T 19077.1-2008 y GB/T 5124-2017). La fecha y hora actuales son el 22 de mayo de 2025 a las 14:32 HKT.

(1) Control de calidad del tamaño de partículas y pruebas de polvo de carburo de tungsteno

Tecnología de control:

Control de materia prima: El tamaño de partícula de polvo de tungsteno $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ genera una columna de agua de $0,1-0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y se inhibe la maduración de Ostwald (tasa de crecimiento $\sim 10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$).

Tiempo de reacción: 2 horas $\pm 0,1$ horas ($1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para generar WC fino ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$); 4 horas $\pm 0,1$ horas ($1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$) para generar WC grueso ($5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Velocidad de enfriamiento: El enfriamiento rápido ($>50 \text{ }^\circ\text{C/min} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C/min}$) inhibe el crecimiento del grano ($<0,01 \mu\text{m/min} \pm 0,001 \mu\text{m/min}$), con una desviación de $<3 \% \pm 0,5 \%$.

Aditivos: El carburo de vanadio (VC, $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$) reduce la energía superficial ($<1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) y reduce el tamaño de partícula en un $10\% \pm 2\%$; el carburo de cromo (Cr_3C_2 , $0,5\% \pm 0,01\%$) inhibe la difusión (coeficiente $<10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$), con una desviación de $<2 \% \pm 0,5\%$.

Optimización del equipo: El horno rotatorio (velocidad $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) mejora la uniformidad de la mezcla y la desviación de la distribución del tamaño de partícula es $<5 \% \pm 1 \%$.

Post-tratamiento: Cribado (tamaño de poro $<10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para eliminar aglomerados ($<5\% \pm 1\%$); clasificación por flujo de aire (GB/T 19077.1-2008) para ajustar la distribución, con una desviación de $<2\% \pm 0,5\%$.

Método de detección:

Análisis del tamaño de partículas láser: según GB/T 19077.1-2008, el difractor láser se utiliza para medir D10, D50 y D90, con una desviación de $<5\% \pm 1\%$ y D50 submicrónico = $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Microscopía electrónica de barrido (MEB): Según GB/T 16594-2008, observar la morfología (poligonal, borde $<0,05 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$).

Método de sedimentación: Según GB/T 14634.2-2010, mide la velocidad de sedimentación y es adecuado para partículas gruesas ($>5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Método de superficie específica: Según la norma GB/T 19587-2017 (método BET), se calcula el tamaño medio de partícula. La superficie específica submicrónica es $>3 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$.

Monitoreo en línea: El analizador en línea de tamaño de partículas láser controla la distribución en tiempo real, con una desviación de $<3\% \pm 0,5\%$.

(2) Control de calidad de pureza y prueba del polvo de carburo de tungsteno

Tecnología de control:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Control de materia prima: Pureza del polvo de tungsteno $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$, que contiene O $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$; pureza del negro de humo $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$, que contiene O $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$.

Relación de contenido de carbono: relación molar W:C 1:1,01 $\pm 0,01$, carbono libre reducido a $0,08 \% \pm 0,01 \%$.

Control de la atmósfera: el hidrógeno (H_2 , $O_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) reduce WO_3 (tasa de reducción $> 99 \% \pm 1 \%$), óxido $< 0,03 \% \pm 0,01 \%$; la atmósfera de vacío ($< 10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$) suprime la volatilización del carbono .

Post-tratamiento: Tamizado (tamaño de poro $< 10 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para eliminar aglomerados y aumentar la pureza en $0,5\% \pm 0,1\%$; lavado ácido (HCl, pH $2 \pm 0,1$) para eliminar Fe ($< 0,01\% \pm 0,002\%$).

Optimización del equipo: el horno de grafito de alta pureza (que contiene C $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$) reduce la contaminación de carbono y el horno rotatorio mejora la uniformidad de la reacción.

Método de detección:

Detección de carbono libre: Basado en GB/T 5124-2017, método de absorción infrarroja de combustión a alta temperatura, precisión $\pm 0,005\%$.

Detección de óxido: según GB/T 5124-2017, WO_3 se determina mediante titulación de disolución ácida con una precisión de $\pm 0,002\%$.

Detección de impurezas metálicas: ICP-MS (GB/T 13748.20-2009), detección de Fe y Cr, límite de detección $< 0,001\%$.

Análisis de pureza de fase: la difracción de rayos X (XRD, GB/T 27708-2011) confirmó que la pureza de la fase WC fue $> 99,8\% \pm 0,02\%$.

Monitoreo en línea: El analizador de gases infrarrojo monitorea el CO_2 en tiempo real y controla el carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

(3) Control de calidad y prueba del contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

Tecnología de control:

de materia prima: Tamaño de partícula de negro de carbón $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, pureza $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$, lo que garantiza la uniformidad del carbono.

Relación de contenido de carbono: relación molar W:C 1:1,01 $\pm 0,01$, carbono unido $6,1 \% \pm 0,01 \%$, carbono libre $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$.

Condiciones de reacción: $1450-1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, mantener caliente durante $2-4 \text{ horas} \pm 0,1 \text{ horas}$, reacción completa; atmósfera de hidrógeno o vacío para reducir la volatilización del carbono (pérdida $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$).

Post-tratamiento: tratamiento térmico ($800^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, atmósfera de H_2) para eliminar el carbono libre (reducción de $0,05\% \pm 0,01\%$); decapado para eliminar las impurezas carbonizadas.

Optimización del equipo: El horno rotatorio (velocidad $5 \text{ rpm} \pm 0,5 \text{ rpm}$) mejora la uniformidad de la distribución del carbono, con una desviación de $< 2\% \pm 0,5\%$.

Método de detección:

Contenido total de carbono : Basado en GB/T 5124-2017, método de absorción infrarroja de combustión a alta temperatura, precisión $\pm 0,005\%$.

Carbón combinado: Disolución ácida y separación después de la combustión a alta temperatura, precisión $\pm 0,002\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Carbono libre: cálculo de diferencia o método de combustión directa, precisión $\pm 0,005\%$.

Análisis de fase: XRD (GB/T 27708-2011) confirma la fase WC y detecta la fase W_2C o grafito.

Monitoreo en línea: El analizador de gases infrarrojo monitorea el CO_2 en tiempo real y controla el contenido de carbono en $6,0\%-6,2\% \pm 0,01\%$.

(4) Influencia integral de la calidad del polvo de carburo de tungsteno y su aplicación

Optimización del rendimiento: el tamaño de partícula de $0,1-0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$ mejora la dureza ($HV > 3000 \pm 50$), $5-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$ mejora la tenacidad ($K_{1c} > 20 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$); la pureza (carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$, óxido $< 0,05\% \pm 0,01\%$) garantiza la densidad ($> 99\% \pm 0,1\%$); el contenido de carbono $6,0\% - 6,2\% \pm 0,01\%$ optimiza la dureza y la resistencia al desgaste.

Eficiencia del proceso: El horno rotatorio, los aditivos (VC, Cr_3C_2) y el control de la atmósfera ($O_2 < 10 ppm \pm 1 ppm$) mejoran la consistencia de la calidad de las herramientas aeroespaciales (vida útil $> 15 horas \pm 1 hora$) y las brocas mineras ($> 1000 m \pm 100 m$).

Fiabilidad de la detección: el análisis del tamaño de partículas láser, el análisis químico y la XRD se combinan para proporcionar datos precisos y optimizar los procesos de producción.

(5) Desafíos y mejoras en el control de calidad y las pruebas del polvo de carburo de tungsteno

Desafíos: La amplia distribución del tamaño de partículas ($> 10\% \pm 2\%$) genera fluctuaciones en el rendimiento; la introducción de impurezas de pureza (como Fe $> 0,02\% \pm 0,005\%$) afecta la resistencia a la corrosión; la desviación del contenido de carbono ($> 0,1\% \pm 0,01\%$) genera impurezas de fase.

Mejora: Se introdujo IA para controlar los parámetros del proceso (temperatura, atmósfera), la desviación del tamaño de partícula fue $< 2\% \pm 0,5\%$, la pureza se incrementó en $0,5\% \pm 0,1\%$ y el contenido de carbono se estabilizó en $6,1\% \pm 0,01\%$.

El tamaño de partícula ($0,1-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$), la pureza (carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$, óxido $< 0,05\% \pm 0,01\%$) y el contenido de carbono ($6,0\% - 6,2\% \pm 0,01\%$) del polvo de carburo de tungsteno se gestionan mediante el control de la materia prima, la optimización de la reacción, la adición de aditivos y la mejora de los equipos. Los métodos de detección (análisis láser del tamaño de partícula, análisis químico, XRD) garantizan la precisión de los parámetros, optimizan el rendimiento del carburo cementado y son compatibles con aplicaciones de alta gama como herramientas de aviación, moldes resistentes al desgaste y perforadoras mineras.

4.2 Fase aglutinante y aditivos del carburo cementado

La fase aglutinante (Co, Ni, $5\%-30\% \pm 1\%$) proporciona tenacidad ($K_{1c} 820 MPa \cdot m^{1/2} \pm 0,5$) y resistencia al impacto (energía de impacto $> 10J \pm 1J$), y el inhibidor de grano (VC, Cr_3C_2 , $< 1\% \pm 0,01\%$) controla el crecimiento del grano WC ($< 0,01 \mu m/min \pm 0,001 \mu m/min$) y mejora la dureza ($HV > 2000 \pm 30$). La selección de la fase aglutinante y los aditivos influye en el rendimiento: el Co de alta pureza ($> 99,9\% \pm 0,01\%$) mejora la tenacidad, el Ni ($> 99,8\% \pm 0,01\%$) mejora la resistencia a la corrosión (velocidad de corrosión $< 0,01 mm/año \pm 0,002 mm/año$) y el VC/ Cr_3C_2 optimiza la estructura de grano fino (tamaño de grano de WC $< 0,5 \pm 0,01 \mu m$). En esta sección se analizan las características del polvo de Co/Ni y el mecanismo de inhibición de grano.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2.1 Características y selección de aglutinantes de carburo cementado - Polvos de Co y Ni

La fase aglutinante es un componente importante del carburo cementado, que actúa como enlace entre las partículas de WC y proporciona propiedades clave como tenacidad, rendimiento de procesamiento y resistencia a la corrosión. El cobalto (Co) y el níquel (Ni) son los aglutinantes más utilizados para el carburo cementado, y sus características y selección influyen directamente en su rendimiento.

(1) Propiedades y requisitos del material

La fase aglutinante actúa como puente en el carburo cementado, rellenando los huecos entre las partículas de WC, mejorando la tenacidad y las propiedades de procesamiento del material, a la vez que influye en la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas. El Co y el Ni son los aglutinantes preferidos debido a sus excelentes propiedades físicas y químicas.

Características del polvo de cobalto:

Estructura cristalina: estructura cúbica centrada en la cara (FCC), parámetro reticular $a = 0,3544 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$, con alta simetría, sistema de deslizamiento > 12 , lo que proporciona una excelente capacidad de deformación plástica.

Densidad: $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, cercana a WC ($15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$), reduciendo la tensión de sinterización.

Punto de fusión: $1495^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, adecuado para sinterización a alta temperatura ($>1200^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$).

Dureza: Dureza Vickers HV 100 ± 10 , inferior a WC, lo que proporciona un margen de tenacidad.

Tenacidad: Tenacidad a la fractura $K_{Ic} 15-20 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, mejor que Ni ($K_{Ic} 12-15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Conductividad térmica: $80 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, ayuda a disipar el calor y prolongar la vida útil de la herramienta.

Coefficiente de expansión térmica: $5,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, compatible con WC ($5,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$), reduciendo el estrés térmico ($<50 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Requisitos: pureza $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$, Fe $< 0,01 \% \pm 0,002 \%$, O $< 0,05 \% \pm 0,01 \%$, tamaño de partícula $0,5-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Influencia en el rendimiento: La resistencia a la flexión del carburo cementado que contiene 10% \pm 1% de Co es $> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y la tenacidad a la fractura $K_{Ic} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, lo que es adecuado para herramientas de corte y equipos de minería.

Características del polvo de Ni:

Estructura cristalina: estructura cúbica centrada en la cara (FCC), parámetro reticular $a = 0,3524 \text{ nm} \pm 0,0001 \text{ nm}$, sistema de deslizamiento > 12 , la capacidad de deformación plástica es ligeramente inferior a la del Co.

Densidad: $8,91 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, bien compatible con WC.

Punto de fusión: $1455^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, adecuado para sinterización a alta temperatura.

Dureza: Dureza Vickers HV 90 ± 10 , más suave que el Co, tenacidad ligeramente menor.

Resistencia a la corrosión: El potencial de corrosión es de $0,2 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$ (en comparación con el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SCE), superior al del Co ($0,1 \text{ V} \pm 0,02 \text{ V}$). La velocidad de corrosión en un entorno de pH 2-12 es $<0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$.

Conductividad térmica: $90 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \pm 5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, superior a la del Co, lo que ayuda a disipar el calor.

Coefficiente de expansión térmica: $6,0 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \pm 0,2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ligeramente diferente del WC, y la tensión después de la sinterización es ligeramente mayor ($<70 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Requisitos: pureza $> 99,8 \% \pm 0,01 \%$, Fe $< 0,02 \% \pm 0,002 \%$, O $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$, tamaño de partícula $0,5\text{-}5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Impacto en el rendimiento: La tasa de corrosión del carburo cementado que contiene $12 \% \pm 1 \%$ de Ni en un entorno marino (pH 8, profundidad 5000 m, salinidad 3,5 %) es de $0,02 \text{ mm/año} \pm 0,005 \text{ mm/año}$, lo que es adecuado para escenarios de resistencia a la corrosión.

Relación y escenarios de aplicación:

El Co representa más del $80 \% \pm 2 \%$ de la fase aglutinante. Gracias a su excelente tenacidad, es adecuado para aplicaciones de alto impacto (como herramientas de aviación y brocas de minería).

El níquel representa $<20\% \pm 2\%$. Debido a su alta resistencia a la corrosión, es adecuado para entornos químicos y marinos (como válvulas de aguas profundas y cuerpos de bombas químicas).

Ejemplos:

La energía de impacto de la herramienta que contiene $10\% \pm 1\%$ de Co en el corte de aviación ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$, aleación Ti-6Al-4V) es $>12 \text{ J} \pm 1 \text{ J}$, la cantidad de desgaste es $<0,15 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ y la vida útil es $>12 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$.

Para válvulas de aguas profundas (5000 m, salinidad 3,5%) que contienen $12\% \pm 1\%$ de Ni, la profundidad de corrosión es $<3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ y la vida útil es $>5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$.

(2) Criterios de selección y optimización de polvos de Co y Ni

La selección de polvos de Co y Ni debe considerar exhaustivamente la pureza, el tamaño de partícula, la morfología, el proceso de producción y la compatibilidad con WC para optimizar el rendimiento del carburo cementado.

pureza:

Co: $>99,9 \% \pm 0,01 \%$, Fe $<0,01 \% \pm 0,002 \%$, O $<0,05 \% \pm 0,01 \%$. Un bajo contenido de Fe reduce la formación de la fase $\eta (\text{Co}_3\text{W}_3\text{C})$ ($<0,5 \% \pm 0,1 \%$), un bajo contenido de O reduce la porosidad ($<0,1 \% \pm 0,02 \%$) y aumenta la resistencia en un $3 \% \pm 0,5 \%$.

Ni: $>99,8 \% \pm 0,01 \%$, Fe $<0,02 \% \pm 0,002 \%$, O $<0,1 \% \pm 0,01 \%$. Un bajo nivel de impurezas mejora la resistencia a la corrosión y reduce la tasa de corrosión en un $2 \% \pm 0,5 \%$.

Impacto: La alta pureza reduce los defectos de sinterización (como poros e inclusiones) y aumenta la resistencia a la flexión a $>4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Tamaño de partícula:

Co: $0,5\text{-}1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, mejora la dispersión (uniformidad $> 95 \% \pm 1 \%$) y la tenacidad en un $5 \% \pm 1 \%$; $> 3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ conduce a una distribución desigual y la tenacidad disminuye en un $3 \% \pm 0,5 \%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni: $0,5-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, coincide con WC ($1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) , resistencia de unión de la interfaz $> 50 \text{MPa} \pm 5 \text{MPa}$, la resistencia a la corrosión aumenta en un $2 \% \pm 0,5 \%$; $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ reduce la uniformidad y la tasa de corrosión aumenta en un $1 \% \pm 0,2 \%$.

Impacto: El tamaño de partícula fina mejora la uniformidad de la distribución de la fase aglutinante y la porosidad después de la sinterización es $<0,05\% \pm 0,01\%$.

Apariencia:

Co: esférico (tasa de esferoidización $> 90\% \pm 2\%$), aglomeración reducida ($< 5\% \pm 1\%$), fluidez mejorada en un $3\% \pm 0,5\%$ ($< 25 \text{s}/50 \text{g} \pm 2 \text{s}$, GB/T 1482-2010), adecuado para moldeo por compresión.

Ni: poligonal (borde $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) o casi esférico, mejora la resistencia de unión de la interfaz ($>50 \text{MPa} \pm 5 \text{MPa}$) y mejora la resistencia al desgaste.

Impacto: La morfología optimizada mejora la uniformidad de distribución del polvo y la resistencia de la unión de la sinterización, y la rugosidad de la superficie del carburo cementado es $R_a < 5 \mu\text{m} \pm 1 \mu\text{m}$.

Estabilidad química:

Co: La tasa de oxidación en aire a $<600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ es $<0,01 \text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h} \pm 0,002 \text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$. La atmósfera de sinterización debe controlarse ($\text{O}_2 < 10 \text{ppm} \pm 1 \text{ppm}$).

Ni: La tasa de corrosión en un entorno de pH 2-12 es $<0,02 \text{mm}/\text{año} \pm 0,005 \text{mm}/\text{año}$, y su resistencia a ácidos y álcalis es mejor que la del Co.

Impacto: La alta resistencia a la corrosión del Ni es adecuada para entornos ácidos (como cuerpos de bombas químicas, pH 2-12) y el Co necesita protección contra la oxidación a alta temperatura.

Proceso de producción:

Co:

Método electrolítico: O $<0,03\% \pm 0,005\%$, Fe $<0,005\% \pm 0,001\%$, pureza aumentada en $1\% \pm 0,2\%$, adecuado para aplicaciones de alta tenacidad.

Método del carbonilo: O $>0,1\% \pm 0,01\%$, Fe $<0,01\% \pm 0,002\%$, bajo coste pero pureza ligeramente inferior.

de partícula $0,5-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, adecuado para producción en masa.

Ni:

Método de atomización: Fe $<0,01\% \pm 0,002\%$, O $<0,05\% \pm 0,01\%$, partículas esféricas ($>90\% \pm 2\%$), adecuado para requisitos de alta pureza.

de electrólisis: tamaño de partícula $1-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, O $< 0,1\% \pm 0,01\%$, bajo costo.

Método del carbonilo: La morfología es uniforme, pero el contenido de Fe es ligeramente superior ($<0,02\% \pm 0,002\%$).

Impacto: El Co electrolítico y el Ni atomizado mejoran la pureza y la consistencia morfológica, y el carburo cementado tiene un mejor rendimiento.

Compatibilidad con WC:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Co: El ángulo de humectación con WC es $<10^{\circ} \pm 1^{\circ}$ y la resistencia de unión es $>60 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, lo que es adecuado para escenarios de alta tenacidad.

Ni: ángulo de humectación $<15^{\circ} \pm 1^{\circ}$, resistencia de unión $>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, la resistencia a la corrosión es mejor que el Co.

Impacto: Una buena humectabilidad garantiza que la interfaz esté libre de defectos después de la sinterización y que la resistencia a la flexión sea $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$.

Ejemplos:

El K_{1c} $18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$) preparado con Co electrolítico de $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (O $<0,03 \% \pm 0,005 \%$) se utiliza para brocas de minería (impacto $>200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) con una vida útil de $>1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$.

$2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (Fe $<0,01 \% \pm 0,002 \%$) (tasa de corrosión $0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$) con una vida útil de $>3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$.

(3) Estrategia de optimización para polvos de Co y Ni

Proceso de mezcla:

Fase de unión compuesta de Co+Ni : relación Co:Ni $4:1 \pm 0,2$, que combina la alta tenacidad del Co y la resistencia a la corrosión del Ni, adecuada para equipos de minería marina (resistencia al impacto $>10 \text{ J} \pm 1 \text{ J}$, tasa de corrosión $<0,015 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$).

Proceso de molienda de bolas: velocidad de rotación $300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, relación bola-material $10:1 \pm 0,1$, tiempo $10-20 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$, garantizar una dispersión uniforme (uniformidad $>95\% \pm 1\%$).

Aditivos: $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ VC o Cr_3C_2 inhibe el crecimiento del grano y la desviación del tamaño de partícula es $<3\% \pm 0,5\%$.

Proceso de sinterización:

Sinterización al vacío: $1350^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, atmósfera $<10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, oxidación reducida (O $<0,02\% \pm 0,005\%$).

HIP (prensado isostático en caliente): $1400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$, presión $100 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$, densidad $>99,5\% \pm 0,1\%$, aumento de resistencia $5\% \pm 1\%$.

Control de la atmósfera: la atmósfera de H_2 ($\text{O}_2 <10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) inhibe la oxidación de Co y la atmósfera de Ar protege la estabilidad del Ni.

Tratamiento de superficie:

Polvo de Co: pasivación superficial (adsorción de $\text{O}_2 <0,01 \text{ mg/g} \pm 0,002 \text{ mg/g}$), reduciendo la oxidación durante el almacenamiento.

Polvo de Ni: recubrimiento antioxidante (como capa fina de SiO_2 , espesor $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), que mejora la resistencia a la corrosión en un $1\% \pm 0,2\%$.

(4) Aplicación de ingeniería

Carburo cementado a base de cobalto:

herramientas de aviación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contiene 10% ± 1% de Co, dureza HV 2900 ± 50, K_{1c} 18 MPa·m^{1/2} ± 0,5, corte Ti-6Al-4V (1000 °C, velocidad > 300 m/min ± 10 m/min), cantidad de desgaste < 0,15 mm ± 0,03 mm, vida útil > 12 horas ± 1 hora.

brocas para minería

Contiene 8% ± 1% de Co, resistencia al impacto > 10 J ± 1 J, perforación en roca dura (resistencia a la compresión > 200 MPa ± 10 MPa), vida útil > 1200 m ± 100 m.

Molde resistente al desgaste

Contiene 12% ± 1% de Co, matriz de encabezado en frío (>10⁶ veces ± 10⁵ veces), deformación < 0,01 mm ± 0,002 mm.

Carburo cementado a base de níquel:

Válvula de aguas profundas

Contiene 12% ± 1% de Ni, profundidad de corrosión < 5 μm ± 1 μm, vida útil en entornos de aguas profundas (5000 m, salinidad 3,5%) > 5 años ± 0,5 años.

Cuerpo de bomba química

Contiene 15% ± 1% de Ni, pH 2-12, tasa de corrosión 0,01 mm/año ± 0,002 mm/año, vida útil > 2 años ± 0,2 años.

Equipos de minería marina

Contiene 10% ± 1% Ni + 5% ± 1% Co, resistencia al impacto > 8 J ± 1 J, resistencia a la corrosión mejorada en un 3% ± 0,5%, vida útil > 3 años ± 0,3 años.

Fase de unión compuesta de Co+Ni :

Herramientas de perforación petrolera: relación Co:Ni 3:1 ± 0,2, K_{1c} 16 MPa·m^{1/2} ± 0,5, tasa de corrosión < 0,015 mm/año ± 0,002 mm/año, vida útil > 1000 horas ± 100 horas.

(5) Tendencias de desarrollo

Fase aglutinante a escala nanométrica: Desarrollo de polvo de Co/Ni < 0,5 μm ± 0,01 μm, dispersabilidad mejorada (uniformidad > 98% ± 1%), dureza de carburo > HV 3000 ± 50, tenacidad > K_{1c} 20 MPa·m^{1/2} ± 0,5.

Producción verde: utilizar electrólisis de energía renovable para producir polvo de Co/Ni, reduciendo el consumo de energía en un 15% ± 2% y reduciendo las emisiones (CO₂ < 500 kg/t ± 50 kg/t).

Control inteligente: se introduce IA para optimizar la relación Co/Ni y los parámetros de sinterización, mejorando la consistencia del rendimiento en un 5% ± 1% y la eficiencia de producción en un 10% ± 2%.

El Co y el Ni se utilizan como aglutinantes de carburo cementado. El Co (FCC, a = 0,3544 nm ± 0,0001 nm, punto de fusión 1495 °C ± 5 °C) se caracteriza principalmente por su alta tenacidad (K_{1c} 15-20 MPa·m^{1/2} ± 0,5), que representa > 80% ± 2%, y es adecuado para herramientas de aviación y perforadoras mineras; el Ni (FCC, a = 0,3524 nm ± 0,0001 nm, punto de fusión 1455 °C ± 5 °C) se caracteriza por su resistencia a la corrosión (tasa de corrosión < 0,02 mm/año ± 0,005 mm/año), que representa < 20% ± 2%, y es adecuado para entornos marinos y químicos. Los criterios de selección se centran en la pureza (Co > 99,9% ± 0,01%, Ni > 99,8% ± 0,01%), el tamaño de partícula (Co 0,5-1 μm ± 0,01 μm, Ni 0,5-3 μm ± 0,01 μm) y la morfología (Co esférico,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni poligonal). Mediante la optimización del proceso de producción (Co electrolítico, Ni atomizado), el proceso de mezcla y la tecnología de sinterización, el rendimiento del carburo cementado mejora significativamente para satisfacer las necesidades de ingeniería diversificada. En el futuro, el desarrollo del polvo de Co/Ni se orientará hacia la nanotecnología, la ecología y la inteligencia.

4.2.2 Mecanismo de los inhibidores de grano (carburo de vanadio (VC) y carburo de cromo (Cr_3C_2))

de carburo de tungsteno (WC) en la preparación de carburo cementado. El carburo de vanadio (VC) y el carburo de cromo (Cr_3C_2) son los más utilizados. Al añadir VC y Cr_3C_2 , se pueden refinar eficazmente los granos, mejorar la dureza y la resistencia, y optimizar el rendimiento del carburo cementado. A continuación, se presenta un análisis detallado de las características básicas, el mecanismo de inhibición, los factores de influencia, la estrategia de optimización y su aplicación en ingeniería.

(1) Características básicas

VC (carburo de vanadio):

Fórmula química: VC, sistema cristalino cúbico (FCC), parámetro reticular $a = 0,416 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$.

Densidad: $5,77 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, punto de fusión $2830^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, dureza HV 2800 ± 50 .

Características: alta dureza, fuerte estabilidad térmica, baja solubilidad en la fase aglutinante de Co ($\sim 5\% \pm 0,5\%$), adecuado para carburo cementado submicrónico.

Cr_3C_2 (carburo de cromo):

Fórmula química: Cr_3C_2 , sistema cristalino ortorrómbico, parámetros reticulares $a = 0,552 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$, $b = 1,149 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$, $c = 0,283 \text{ nm} \pm 0,001 \text{ nm}$.

Densidad: $6,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$, punto de fusión $1895^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$, dureza HV 1300 ± 50 .

Características: Buena resistencia a la corrosión, alta estabilidad térmica, cierta solubilidad con la fase de unión Co/Ni (solubilidad en Co $\sim 2\% \pm 0,2\%$), adecuado para carburo cementado de tamaño micrométrico.

(2) Mecanismo y efecto de inhibición

Los inhibidores de grano pueden mejorar significativamente la dureza (HV $>2000 \pm 30$) y la resistencia ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) del carburo cementado al regular el comportamiento de crecimiento de los granos de WC durante la sinterización (tasa de crecimiento $<0,01 \mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001 \mu\text{m}/\text{min}$).

Mecanismo inhibidor del VC:

Durante el proceso de sinterización, el VC se disuelve parcialmente en la fase Co (solubilidad $\sim 5\% \pm 0,5\%$), reduce la energía de la interfaz WC/Co ($<0,5 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) e inhibe el proceso de disolución-reprecipitación del WC (maduración de Ostwald, velocidad $<10^{-9} \text{ m/s} \pm 10^{-10} \text{ m/s}$).

El VC precipita en los límites de los granos de WC para formar partículas a escala nanométrica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(<0,1 $\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), que dificultan la migración y fusión de los granos de WC.
de VC puede reducir el tamaño de grano promedio de WC de $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ a $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, aumentar la dureza en un $10 \% \pm 2 \%$ ($\text{HV} > 2200 \pm 30$) y mejorar la resistencia al desgaste (pérdida por desgaste $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$).

El mecanismo de inhibición de Cr_3C_2 :

El Cr_3C_2 precipita una capa delgada (espesor $< 5 \text{ nm} \pm 1 \text{ nm}$) en la interfaz WC/Co, lo que dificulta la difusión de los átomos de C y W (coeficiente de difusión $< 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s} \pm 10^{-12} \text{ cm}^2/\text{s}$) y reduce la fusión de granos (tasa de fusión $< 5\% \pm 1\%$).

El Cr_3C_2 se disuelve parcialmente en la fase Co, modificando la energía interfacial de sinterización en fase líquida (reducida a $< 1 \text{ J/m}^2 \pm 0,1 \text{ J/m}^2$) y ralentizando la velocidad de disolución-reprecipitación del WC.

Efecto:

La adición de $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de Cr_3C_2 puede mantener el tamaño de grano de WC en $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, aumentar la resistencia en un $5 \% \pm 1 \%$ (resistencia a la flexión $> 4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y mejorar la resistencia a la corrosión (tasa de corrosión $< 0,015 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$).

Ámbito de aplicación:

El VC es más adecuado para el carburo cementado submicrónico (granos WC $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) debido a su fuerte efecto inhibidor.

Cr_3C_2 es más adecuado para carburo cementado de tamaño micrométrico (granos WC $1-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) porque combina resistencia y resistencia a la corrosión.

Impacto en el rendimiento:

Los granos refinados mejoran la dureza y la resistencia al desgaste.

La dureza del carburo cementado que contiene $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de VC es $\text{HV} > 3100 \pm 50$, lo que es adecuado para el procesamiento de aviación.

El fortalecimiento de los límites de grano mejora la resistencia y la tenacidad.

La resistencia a la flexión del carburo cementado que contiene $0,5 \% \pm 0,01 \%$ de Cr_3C_2 es $> 4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$ y la tenacidad a la fractura $K_{Ic} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$.

Estabilidad a altas temperaturas

El VC mejora la estabilidad del límite del grano y la deformación del carburo cementado a $1000 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ es $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

(3) Factores influyentes y optimización

El efecto de los inhibidores de grano se ve afectado por muchos factores, como la cantidad agregada, el tamaño de partícula, la temperatura de sinterización y la atmósfera, y se debe garantizar el mejor rendimiento optimizando el proceso.

Cantidad adicional:

VC: $0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$. Una cantidad excesiva ($> 0,8\% \pm 0,01\%$) generará una fase frágil V_6C_5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(dureza HV $<1500 \pm 50$), lo que resultará en una disminución de la tenacidad en un $10\% \pm 2\%$ ($K_{1c} < 15 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Cr_3C_2 : $0,5\% - 1\% \pm 0,01\%$. Una cantidad excesiva ($>1,5\% \pm 0,01\%$) reduce la fluidez de la fase Co ($<10 \text{ s} / 50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$) y la densidad disminuye en un $1\% \pm 0,2\%$ ($<99\% \pm 0,1\%$).

Optimización: Controle con precisión la cantidad de adición, VC recomienda $0,3\% \pm 0,01\%$, Cr_3C_2 recomienda $0,5\% \pm 0,01\%$ para equilibrar la dureza y la tenacidad.

Tamaño de partícula:

VC: $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mejora la dispersión (desviación $<5\% \pm 1\%$) y la dureza aumenta en un $5\% \pm 1\%$ (HV $> 2300 \pm 30$).

Cr_3C_2 : $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ mejora la resistencia de unión de la interfaz ($>50 \text{ MPa} \pm 5 \text{ MPa}$) y aumenta la resistencia en un $3\% \pm 0,5\%$ ($>4300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Optimización: Utilice VC a escala nanométrica y Cr_3C_2 , combinado con dispersión ultrasónica (frecuencia $40 \text{ kHz} \pm 1 \text{ kHz}$) para reducir la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$).

Temperatura de sinterización:

$1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ garantiza la disolución de VC y Cr_3C_2 (tasa de disolución $> 90\% \pm 2\%$) y el efecto de inhibición se mejora en un $5\% \pm 1\%$.

$1550 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ induce la precipitación de VC y Cr_3C_2 (tasa de precipitación $> 10\% \pm 2\%$) y la dureza disminuye en un $3\% \pm 0,5\%$ (HV $< 2000 \pm 30$).

Optimización: Controlar la temperatura de sinterización a $1400 - 1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ y extender el tiempo de retención (2-3 horas $\pm 0,1$ horas) para garantizar una inhibición uniforme.

Una atmósfera:

La atmósfera de H_2 ($\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$) inhibe la oxidación de VC y Cr_3C_2 ($\text{O}_2 < 0,05\% \pm 0,01\%$), y la pureza aumenta en un $1\% \pm 0,2\%$.

La atmósfera de vacío ($<10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$) reduce la volatilización de VC (pérdida $<0,1\% \pm 0,01\%$) y mejora el efecto de inhibición en un $2\% \pm 0,5\%$.

Se prefiere la atmósfera de H_2 , combinada con un pretratamiento al vacío para reducir el contenido de óxido.

Método de mezcla:

Molino de bolas (velocidad $300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, tiempo $10 - 20 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$) para asegurar una dispersión uniforme (uniformidad $> 95\% \pm 1\%$).

Optimización: Agregar dispersantes (como etanol, $0,1\% \pm 0,01\%$) para reducir la aglomeración ($<3\% \pm 1\%$) y mejorar la eficiencia de dispersión.

Ejemplos:

$0,3\% \pm 0,01\%$ VC (tamaño de partícula $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), $1450 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, proceso en atmósfera de H_2 para generar granos de WC de $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dureza HV 2300 ± 30 , utilizado para brocas de PCB (vida útil $> 10^5$ orificios $\pm 10^4$ orificios).

$0,5\% \pm 0,01\%$ Cr_3C_2 (tamaño de partícula $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), $1400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, proceso de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

atmósfera de vacío para generar granos de WC de $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, resistencia $> 4300 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, utilizado para brocas de minería (vida útil $> 1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$).

(4) Aplicación de ingeniería

VC agregó:

Se utiliza VC al $0,5 \% \pm 0,01 \%$ para herramientas superduras (grano WC $< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en el mecanizado de aviación ($1000 \text{ }^\circ\text{C}$, aleación Ti-6Al-4V), con desgaste $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ y vida útil $> 15 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$.

$0,3 \% \pm 0,01 \%$ VC para brocas de PCB (grano WC $0,2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), dureza HV 2300 ± 30 , vida útil $> 10^5$ agujeros $\pm 10^4$ agujeros.

Adición de Cr_3C_2 :

Se utiliza $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{Cr}_3\text{C}_2$ en brocas de minería (grano WC $1-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), con una vida útil de $> 1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$ en perforación de roca dura (resistencia a la compresión $> 200 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Se utiliza $0,8 \% \pm 0,01 \% \text{Cr}_3\text{C}_2$ para cuerpos de bombas químicas (grano WC $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), la tasa de corrosión en un entorno de pH 2-12 es $< 0,015 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$ y la vida útil es $> 2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$.

Adición de compuestos VC+ Cr_3C_2 :

$0,3 \% \pm 0,01 \% \text{VC} + 0,5 \% \pm 0,01 \% \text{Cr}_3\text{C}_2$ se utiliza para equipos de minería marina (grano WC $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), resistencia al impacto $> 10 \text{ J} \pm 1 \text{ J}$, tasa de corrosión $< 0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$, vida útil $> 3 \text{ años} \pm 0,3 \text{ años}$.

(5) Pruebas y control de calidad

Tamaño del grano

Se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM, GB/T 16594-2008) para medir el tamaño de grano de WC (desviación $< 5 \% \pm 1 \%$).

Uniformidad de distribución: el espectro de energía de rayos X (EDS, GB/T 17359-2012) se utiliza para detectar la distribución de VC/ Cr_3C_2 en los límites de grano (desviación $< 3 \% \pm 0,5 \%$).

Pruebas de rendimiento

Dureza: Según ISO 4499-2, medir la dureza Vickers (HV $> 2000 \pm 30$).

Resistencia: Según GB/T 3851-2015, pruebe la resistencia a la flexión ($> 4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Resistencia al desgaste: según GB/T 12444-2006, mida la cantidad de desgaste ($< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$).

Monitoreo en línea: la termografía infrarroja monitorea la temperatura de sinterización (desviación $< 5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$) para garantizar un efecto de inhibición constante.

Los inhibidores de grano VC y Cr_3C_2 inhiben el crecimiento del grano de WC (tasa de crecimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$<0,01 \mu\text{m} / \text{min} \pm 0,001 \mu\text{m} / \text{min}$) a través del mecanismo de disolución-reprecipitación, refinan los granos ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y mejoran significativamente la dureza ($\text{HV} > 2000 \pm 30$), la resistencia ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y la resistencia al desgaste (pérdida por desgaste $<0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$) del carburo cementado. VC es adecuado para carburo cementado submicrónico (fuerte efecto inhibitor), y Cr_3C_2 es adecuado para el nivel micrométrico (teniendo en cuenta la resistencia a la corrosión). El mejor efecto de inhibición se puede lograr optimizando la cantidad de adición (VC $0,1\% - 0,5\% \pm 0,01\%$, Cr_3C_2 $0,5\% - 1\% \pm 0,01\%$), tamaño de partícula (VC $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, Cr_3C_2 $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), temperatura de sinterización ($1450^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$) y atmósfera (H_2 o vacío). La aplicación de VC y Cr_3C_2 mejora significativamente el rendimiento de las herramientas de aviación (vida útil $>15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$), las brocas de minería (vida útil $>1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$) y los equipos químicos (vida útil $>2 \text{ años} \pm 0,2 \text{ años}$).

4.3 Pretratamiento del polvo

El pretratamiento del polvo optimiza la uniformidad de la mezcla (desviación $<5\% \pm 1\%$), la distribución del tamaño de partícula ($0,110 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la fluidez ($1316 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$) de WC, Co/Ni y aditivos mediante molienda de bolas (molido húmedo/seco, relación bolas/polvo $10:1 \pm 0,5$) y secado por pulverización (caudal $100 \text{ L}/\text{h} \pm 10 \text{ L}/\text{h}$). El pretratamiento garantiza la densidad de sinterización ($>99\% \pm 0,1\%$) y la consistencia del rendimiento (desviación de dureza $\leq 30 \text{ HV}$), reduce la porosidad ($<0,1\% \pm 0,02\%$) y mejora la resistencia ($>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$). Esta sección analiza los procesos de molienda de bolas y secado por pulverización.

4.3.1 Proceso de molienda de bolas (molienda húmeda/molienda seca, relación bolas-material 10:1)

Parámetros y principio del proceso

La molienda de bolas utiliza bolas de WC (diámetro $510 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, dureza $\text{HV} 1800 \pm 50$) para moler WC ($0,110 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Co/Ni ($0,53 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y aditivos (VC/ Cr_3C_2 , $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), con una relación bola-material de $10:1 \pm 0,5$, una velocidad de rotación de $200400 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ y un tiempo de $424 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$.

Molienda húmeda

Utilice etanol (pureza $> 99,5\% \pm 0,01\%$, cantidad agregada $50\% - 100\% \pm 5\%$ de fracción de masa), agregue dispersante (PEG, $0,5\% - 1\% \pm 0,01\%$), reduzca la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$) y la desviación del tamaño de partícula sea $<3\% \pm 0,5\%$.

Molienda en seco

Sin medio, adecuado para fórmula baja en Co ($<6\% \pm 1\%$), contaminación reducida ($\text{Fe} < 0,01\% \pm 0,002\%$), pero mayor tasa de aglomeración ($>10\% \pm 2\%$).

La molienda húmeda representó $>90\% \pm 2\%$ debido a la alta uniformidad (desviación de mezcla $<2\% \pm 0,5\%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La cinética se basó en la energía de colisión (10^{-3} J/disparo \pm 10^{-4} J/disparo) y una tasa de refinamiento de $0,1 \mu\text{m}/\text{h} \pm 0,01 \mu\text{m}/\text{h}$.

Por ejemplo, la molienda húmeda ($12 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, etanol $100 \% \pm 5 \%$) produce un polvo mixto de WC $0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y Co $0,8 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ con una uniformidad de $> 98 \% \pm 1 \%$, que se utiliza para herramientas de aviación (dureza HV 2200 ± 30 , vida útil $> 12 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$).

Factores influyentes y optimización

El efecto del molino de bolas se ve afectado por los siguientes factores:

Relación bola-material

$10:1 \pm 0,5$ tiene una alta eficiencia de refinamiento ($> 90 \% \pm 2 \%$), $> 15:1$ aumenta la contaminación ($\text{Fe} > 0,05 \% \pm 0,01 \%$) y la dureza disminuye en un $2 \% \pm 0,5 \%$.

Velocidad

$300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$ equilibra la eficiencia y el desgaste (desgaste de la bola $< 0,1 \% \pm 0,02 \%$), $< 200 \text{ rpm}$ refinamiento insuficiente (tamaño de partícula $> 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

tiempo

$12 \text{ horas} \pm 0,1 \text{ horas}$ garantiza la uniformidad (desviación $< 2 \% \pm 0,5 \%$), $> 24 \text{ horas}$ provoca un desgaste excesivo ($\text{Fe} > 0,03 \% \pm 0,005 \%$) y la tenacidad disminuye en un $3 \% \pm 0,5 \%$.

medio

El etanol reduce la energía superficial ($< 0,1 \text{ J/m}^2 \pm 0,02 \text{ J/m}^2$) y la aglomeración en un $5 \% \pm 1 \%$. El agua (pureza $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$) es económica, pero aumenta el contenido de O en un $0,05 \% \pm 0,01 \%$.

Material de la pelota

Las bolas de WC (pureza $> 99,5 \% \pm 0,01 \%$) están menos contaminadas ($\text{Fe} < 0,01 \% \pm 0,002 \%$) y son mejores que las bolas de acero ($\text{Fe} > 0,1 \% \pm 0,02 \%$).

Por ejemplo, el pulido húmedo ($10:1 \pm 0,5$, $300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, $12 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, bolas WC) produce un polvo mixto (WC $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para brocas de PCB (vida útil $> 10^5$ agujeros $\pm 10^4$ agujeros).

Aplicación de ingeniería

Molienda húmeda

WC $0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$, Co $0,8 \pm 0,01 \mu\text{m}$ se utilizan para herramientas de corte (aviación, desgaste $< 0,1 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$).

Molienda en seco

La formulación Low Co ($6\% \pm 1\%$) se utiliza para moldes (extrusión $> 10^5$ veces $\pm 10^4$ veces), con una deformación $< 0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

seco y molienda húmeda en procesos de molienda de bolas para el pretratamiento de materias primas de carburo cementado

categoria	parámetro Características	Molienda en seco	Molienda húmeda
Tecnología parámetro	medio	Sin medio líquido, solo aire o gas inerte (como Ar , O ₂ < 10 ppm ± 1 ppm).	Medio líquido (como agua, etanol, acetona), concentración 50%-70% ± 2% (relación sólido-líquido).
	Relación bola-material	5:1 a 10:1 ± 0,1, más alto para garantizar la eficiencia de molienda.	3:1 a 8:1 ± 0,1, el medio líquido reduce la fricción, la relación bola-material puede ser ligeramente menor.
	Velocidad	200-400 rpm ± 10 rpm. Una velocidad demasiado alta (> 500 rpm) puede causar sobrecalentamiento y aglomeración (> 10 % ± 1 %).	300-500 rpm ± 10 rpm, refrigeración líquida, la velocidad puede ser ligeramente mayor y la tasa de aglomeración es <5 % ± 1 %.
	Molienda tiempo	10-20 horas ± 0,5 horas. Un tiempo prolongado puede provocar sobrecalentamiento. Desviación del tamaño de partícula > 10 % ± 1 %.	5-15 horas ± 0,5 horas, alta eficiencia de líquido, tiempo corto, desviación del tamaño de partícula < 5% ± 1%.
	molienda de bolas medio	Bolas de carburo (HRC 65-75±2), bolas de ZrO ₂ (HRC 70-80±2), diámetro 2-10 mm±0,1 mm.	Bolas de carburo, bolas de ZrO ₂ , bolas de acero inoxidable (HRC 25-35±2), diámetro 1-5 mm±0,1 mm.
	temperatura control	Disipación de calor natural, la temperatura aumenta fácilmente (>60 °C ± 2 °C) y se requiere enfriamiento intermitente (detenerse durante 30 minutos ± 5 minutos cada 2 horas ± 0,1 hora).	Disipación de calor del medio líquido, temperatura <40°C ± 2°C, no requiere enfriamiento adicional.
	atmósfera control	Gas inerte (como Ar o N ₂ , O ₂ < 10 ppm±1 ppm), previene la oxidación (O<0,05%±0,01%).	El medio líquido aísla el aire y la tasa de oxidación es <0,03 % ± 0,005 %. Se puede utilizar aire o atmósfera inerte.
	añadir Agente	Añadir cera de parafina (1%-2%±0,1%) por método seco para mejorar la fluidez (<30 s/50 g±2 s).	Agregue PVA o PEG húmedo (1%-3%±0,1%), disuélvalo en el medio y mejore la dispersabilidad (>95%±1%).
	polvo Tamaño de partícula	Adecuado para molienda gruesa (1-10 μm ± 0,01 μm), la eficiencia de refinación a 0,5 μm ± 0,01 μm es baja.	Adecuado para molienda fina y ultrafina (0,1-1 μm ± 0,01 μm), con alta eficiencia de refinación y desviación de distribución <5% ± 1%.
	pureza control	Las impurezas (como Fe <0,02% ± 0,005%) se introducen fácilmente y es necesario eliminarlas mediante decapado.	El medio líquido tiene menos impurezas (Fe <0,01%±0,002%) y mayor pureza (>99,9%±0,01%).
seco paso	No necesita secarse, basta con presionar directamente.	Necesita secarse (secado al vacío, 80°C ± 2°C, <10 ⁻² Pa ± 10 ⁻³ Pa) durante 4-8 horas ±0,5	

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

categoria	parámetro	Molienda en seco	Molienda húmeda
Características	Características		horas.
	Consumo de energía	Mayor (50-80 kWh ± 5 kWh por tonelada de polvo) debido a la alta fricción.	Bajo (30-50 kWh ± 5 kWh por tonelada de polvo), el líquido reduce la fricción.
	Proceso Limpieza	El proceso es simple, no requiere equipo adicional y es adecuado para producción a gran escala (>1 tonelada/lote).	El proceso es relativamente complicado y requiere equipo de secado, que es adecuado para el procesamiento fino.
	Tamaño de partícula repartido	Ancho de distribución ((D90-D10)/D50 >2,0±0,2), uniformidad <90%±1%.	La distribución es estrecha ((D90-D10)/D50 <1,5±0,1) y la uniformidad es >95%±1%.
Pros y contras	Tasa de reunión	Es necesario controlar la temperatura alta (>10%±1%) y los aditivos.	Bajo (<5%±1%), efectivamente disperso en medios líquidos.
	Oxidación control	Se requiere una atmósfera inerte y la tasa de oxidación puede ser >0,05% ± 0,01%.	Aislamiento líquido, tasa de oxidación <0,03% ± 0,005%.
	ventaja	Bajo costo (inversión reducida en equipos, sin paso de secado, adecuado para procesamiento grueso).	Alta eficiencia de refinación y alta pureza, adecuado para polvo ultrafino (<0,5 ± 0,01 μm).
	defecto	La capacidad de refinación es limitada, es fácil de aglomerar y la temperatura alta (>60 °C ± 2 °C) conduce a la oxidación.	La necesidad de secado aumenta el consumo de energía (10-20 kWh/t±2 kWh) y el líquido puede introducir humedad (>0,1%±0,01%).
Escenario de aplicación	Aplicable alcance	Mezcla de partículas gruesas (>5 μm ± 0,01 μm) para producción de bajo costo (por ejemplo , piezas brutas para brocas de minería).	Polvos submicrónicos y nanométricos (<0,5 μm ± 0,01 μm) , moldeo de alta precisión (como herramientas de aviación).
	Ejemplos	Polvo de WC-Co (D50=5 μm±0,01 μm) , resistencia a la flexión>3800 MPa±100 MPa, vida útil>1200 m±100 m.	Polvo WC (D50=0,3 μm±0,01 μm) , dureza HV>3000±50, vida útil>15 horas±1 hora.
Sugerencias de optimización	molienda de bolas medio	Utilice bolas de carburo (HRC 65-75±2) para reducir la contaminación (Fe <0,01%±0,002%).	Utilice bolas de ZrO ₂ (HRC 70-80±2) para evitar la contaminación (O<0,03%±0,005%).
	añadir Optimización de la dosis	1% ± 0,1% de cera de parafina, reduce la tasa de agregación (<5% ± 1%).	1%-3%±0,1% PVA o PEG, para mejorar la dispersión (uniformidad > 95%±1%).
	temperatura control	Funcionamiento intermitente (30 minutos ± 5 minutos de parada cada 2 horas ± 0,1 horas), <50°C ± 2°C.	Refrigeración líquida, no requiere control adicional, <40°C ± 2°C.
	atmósfera mejoramiento	de Ar o N ₂ (O ₂ < 10 ppm ± 1 ppm), oxidación < 0,03 % ± 0,005 %.	Medio etanol (pureza > 99,5 % ± 0,1 %), relación sólido-líquido 60 % ± 2 %, oxidación < 0,01 % ± 0,002 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

categoria	parámetro	Molienda en seco	Molienda húmeda
	Características		
	Posprocesamiento	No necesita secarse, basta con presionar directamente.	Secado al vacío ($80^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$, $<10^{-2}\text{ Pa}\pm 10^{-3}\text{ Pa}$), humedad $<0,05\%\pm 0,01\%$.
	Consumo de energía mejoramiento	Optimice la velocidad de rotación ($<400\text{ rpm}\pm 10\text{ rpm}$) y reduzca el consumo de energía en un $10\%\pm 2\%$.	Optimiza el tiempo de secado ($<6\text{ horas}\pm 0,5\text{ horas}$) y reduce el consumo energético en un $5\%\pm 1\%$.
ilustrar		La molienda en seco y la molienda en húmedo presentan características propias en el pretratamiento de materias primas de carburo cementado. La molienda en seco es sencilla (no requiere secado) y económica (consumo energético: $50\text{-}80\text{ kWh/t}\pm 5\text{ kWh}$), adecuada para molienda gruesa ($>5\text{ }\mu\text{m}\pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$), pero con una amplia distribución ($>2,0\pm 0,2$) y una alta tasa de aglomeración ($>10\%\pm 1\%$); la molienda en húmedo ofrece una alta eficiencia de refinado ($99,9\%\pm 0,01\%$), adecuada para aplicaciones de alta precisión, pero requiere secado (consumo energético: $30\text{-}50\text{ kWh/t}\pm 5\text{ kWh}$). Al optimizar la relación bola-material (molienda en seco $5:1\text{-}10:1\pm 0,1$, molienda húmeda $3:1\text{-}8:1\pm 0,1$), la velocidad de rotación (molienda en seco $200\text{-}400\text{ rpm}\pm 10\text{ rpm}$, molienda húmeda $300\text{-}500\text{ rpm}\pm 10\text{ rpm}$) y la selección de medios, la molienda en seco es compatible con brocas de minería (vida útil $>1200\text{ m}\pm 100\text{ m}$) y la molienda húmeda es compatible con herramientas de aviación (vida útil $>15\text{ horas}\pm 1\text{ hora}$), lo que satisface diversas necesidades.	

4.3.2 Tecnología de secado por aspersión y granulación

La tecnología de granulación y secado por aspersión es el proceso central en el pretratamiento de materias primas de carburo cementado (como polvo de carburo de tungsteno WC, polvo de cobalto Co y polvo de níquel Ni), que se utiliza para convertir el polvo fino en partículas con excelente fluidez y propiedades de prensado.

(1) Principios de la tecnología de secado por aspersión y granulación

Secado por aspersión:

Proceso: La suspensión o lodo que contiene WC, Co y otros polvos se rocía en pequeñas gotas ($10\text{-}200\text{ }\mu\text{m}\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) a través de un atomizador y el agua se evapora rápidamente (tasa de evaporación $>90\%\pm 2\%/s$) en un flujo de aire de alta temperatura ($150\text{-}300\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) para formar partículas secas.

de calor y masa : El agua en la superficie de la gota se evapora primero y el agua interna migra por difusión. El tiempo de secado es $<1\text{ s}\pm 0,1\text{ s}$.

de partícula $20\text{-}150\text{ }\mu\text{m}\pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, fluidez $<20\text{ s}/50\text{ g}\pm 2\text{ s}$ (GB/T 1482-2010), densidad aparente $>1,5\text{ g/cm}^3\pm 0,1\text{ g/cm}^3$.

Granulación:

Proceso: En el secado por aspersión, los aglutinantes (como PVA, PEG) promueven la adhesión de partículas dentro de las gotas y la tensión superficial ($<0,07\text{ N/m}\pm 0,01\text{ N/m}$) forma partículas esféricas o casi esféricas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Mecanismo: Las partículas chocan y se unen durante el proceso de secado, y el aglutinante se solidifica para formar una estructura de red (porosidad $<10\% \pm 1\%$), que mejora la resistencia de las partículas.

Objetivo: resistencia a la compresión del cuerpo verde $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, uniformidad de densidad después del prensado $> 98\% \pm 1\%$.

(2) Parámetros del proceso

Concentración del alimento:

Rango: $20\%-40\% \pm 1\%$ (fracción de masa sólida).

Impacto: Una concentración $<15\% \pm 1\%$ produce partículas demasiado finas ($<20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y poca fluidez ($>30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$); una concentración $>45\% \pm 1\%$ produce una viscosidad demasiado alta ($>1000 \text{ mPa} \cdot \text{s} \pm 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$) y obstrucciones de las boquillas.

Optimización: $25\%-30\% \pm 1\%$, tamaño de partícula $50-100 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, viscosidad $300-500 \text{ mPa} \cdot \text{s} \pm 50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$.

Caudal de alimentación:

Rango: $5-20 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$ (equipos pequeños y medianos), $50-200 \text{ L/h} \pm 5 \text{ L/h}$ (equipos grandes).

Impacto: Caudal $<5 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$, secado desigual, agua residual $>1\% \pm 0,2\%$; $>25 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$, las partículas son demasiado grandes ($>200 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y la densidad aparente disminuye.

Optimización: $10-15 \text{ L/h} \pm 0,5 \text{ L/h}$ (pequeño y mediano), $100-150 \text{ L/h} \pm 5 \text{ L/h}$ (grande), eficiencia de secado $> 95\% \pm 1\%$.

Temperatura del aire de entrada:

Rango: $150-300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ (temperatura de salida $80-120^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

Impacto: Temperatura $<150^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, secado incompleto, agua residual $>1\% \pm 0,2\%$, alta viscosidad de partículas; $>350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, el aglutinante se descompone (carbono residual $> 0,3\% \pm 0,01\%$) y aumenta la fragilidad de las partículas.

Optimización: $200-250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, agua residual $< 0,2\% \pm 0,05\%$, tasa de retención de aglutinante $> 90\% \pm 2\%$.

Presión de atomización:

Rango: $0,1-0,3 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ (tipo de presión), $0,2-0,4 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$ (tipo de flujo de aire).

Impacto: Cuando la presión es $<0,1 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$, las gotas son grandes ($> 200 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y el secado es desigual; cuando la presión es $>0,4 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$, las gotas son demasiado pequeñas ($<20 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) y la fluidez es deficiente.

Optimización: $0,2-0,25 \text{ MPa} \pm 0,01 \text{ MPa}$, tamaño de gota $50-100 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, uniformidad de distribución $> 95\% \pm 1\%$.

Dosificación del aglutinante:

Rango: $1\%-5\% \pm 0,1\%$ (PVA, PEG, parafina).

Impacto: Una dosis $<1\% \pm 0,1\%$ dará como resultado una resistencia de partículas insuficiente ($<5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$); una dosis $>7\% \pm 0,1\%$ dará como resultado un aumento del carbono residual ($>0,2\% \pm 0,01\%$) y una porosidad sinterizada $>0,2\% \pm 0,02\%$.

Optimización: $2\%-3\% \pm 0,1\%$, resistencia $>12 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, carbono residual $<0,1\% \pm 0,01\%$.

(3) Tipos y características de los equipos de secado por aspersión y granulación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Secador centrífugo por aspersión:

Principio de funcionamiento: El disco giratorio de alta velocidad (1000-20000 rpm \pm 50 rpm) arroja la suspensión en gotas y el aire caliente (200-300 °C \pm 5 °C) la seca.

Características:

Tamaño de partícula: 20-120 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, esfericidad $> 90\% \pm 2\%$.

Rendimiento: 100-1000 kg/h ± 10 kg/h (dependiendo del diámetro del disco).

Ventajas: Adecuado para lodos de alta viscosidad ($< 1000 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), distribución de partículas estrecha ((D90-D10)/D50 $< 1,5 \pm 0,1$).

Desventajas: alta velocidad ($> 15000 \text{ rpm} \pm 50 \text{ rpm}$), fácil desgaste del disco (vida útil < 500 horas ± 50 horas), alto costo de mantenimiento.

Aplicación: Granulación de polvo de WC-Co a gran escala (D50=50 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para herramientas de aviación.

Secador por pulverización a presión:

Principio de funcionamiento: la bomba de alta presión (0,1-0,3 MPa $\pm 0,01$ MPa) atomiza a través de boquillas, el aire caliente (150-250 °C ± 5 °C) seca.

Características:

Tamaño de partícula: 30-150 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, esfericidad $> 95\% \pm 2\%$.

Rendimiento: 50-500 kg/h ± 5 kg/h.

Ventajas: Diseño de boquilla flexible (de un solo orificio o de múltiples orificios), adecuada para lodos de baja viscosidad ($< 500 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 50 \text{ mPa}\cdot\text{s}$), bajo consumo de energía ($< 60 \text{ kWh/t} \pm 5 \text{ kWh}$).

Desventajas: Las boquillas se obstruyen fácilmente (limpiar cada 100 horas ± 10 horas) y la producción es limitada.

Aplicación: Granulación fina de polvo WC-Ni (D50=80 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), utilizado para el cuerpo de la bomba química.

Secador por pulverización con flujo de aire:

Principio de funcionamiento: Se mezcla aire comprimido (0,2-0,4 MPa $\pm 0,01$ MPa) con la suspensión para atomizarla y se utiliza aire caliente (180-280 °C ± 5 °C) para secarla.

Características:

Tamaño de partícula: 20-80 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, esfericidad $> 90\% \pm 2\%$.

Rendimiento: 30-300 kg/h ± 5 kg/h.

Ventajas: Adecuado para dispersión de polvo fino (tamaño de partícula inicial $< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), uniformidad de partículas $> 96\% \pm 1\%$, adecuado para requisitos de alta pureza (O $< 0,03\% \pm 0,005\%$).

Desventajas: alto consumo energético ($> 80 \text{ kWh/t} \pm 5 \text{ kWh}$), mayores costes de compresión de aire.

Aplicación: Granulación de polvo nano WC (D50=30 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), utilizado para brocas de PCB.

Secador por pulverización de doble fluido:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Principio de funcionamiento: El líquido y el aire comprimido se coatomizan a través de una boquilla de doble fluido (0,1-0,3 MPa \pm 0,01 MPa) y se secan con aire caliente (200-300 °C \pm 5 °C).

Características:

Tamaño de partícula: 10-100 μm \pm 0,1 μm , esfericidad > 92 % \pm 2 %.

Rendimiento: 50-400 kg/h \pm 5 kg/h.

Ventajas: El tamaño de partícula atomizada es controlable (ajustable por la relación gas-líquido), adecuado para pulpa con alto contenido de sólidos (>30% \pm 1%).

Desventajas: El equipo es complejo y requiere mantenimiento frecuente (revisar la boquilla cada 200 horas \pm 20 horas).

Aplicación: Granulación de polvo mixto WC-Co (D50=60 μm \pm 0,1 μm) , utilizado para moldes resistentes al desgaste.

Secador por aspersión pequeño de laboratorio:

Principio de funcionamiento: diseño centrífugo o de presión pequeño (velocidad 5000-10000 rpm \pm 50 rpm, presión 0,1-0,2 MPa \pm 0,01 MPa), aire caliente 150-200 °C \pm 5 °C.

Características:

Tamaño de partícula: 20-80 μm \pm 0,1 μm , rendimiento 0,5-5 kg/h \pm 0,1 kg/h.

Ventajas: Adecuado para I+D y producción de prueba, ajuste flexible de parámetros (temperatura \pm 5 °C, caudal \pm 0,1 L/h).

Desventajas: bajo rendimiento y alto costo (precio del equipo > 5000 USD \pm 500 USD).

Aplicación: Prueba de polvo WC-Ni en lotes pequeños (D50=40 μm \pm 0,1 μm) .

(4) Factores influyentes

Características de la suspensión:

Tamaño de partícula: El polvo inicial <1 μm \pm 0,01 μm es fácil de formar partículas uniformes; >5 μm \pm 0,01 μm produce partículas gruesas o irregulares.

Viscosidad: 200-800 mPa·s \pm 50 mPa·s es óptimo; >1000 mPa·s \pm 50 mPa·s obstruirán la boquilla.

Tipo de carpeta:

El PVA (2% \pm 0,1%) mejora la resistencia (>12 MPa \pm 1 MPa), pero tiene una alta higroscopicidad (>2% \pm 0,2%).

El PEG (2% \pm 0,1%) mejoró la fluidez (<20 s/50 g \pm 2 s), pero el residuo de carbono fue ligeramente mayor (<0,15% \pm 0,01%).

La cera de parafina (1%-2% \pm 0,1%) es adecuada para la fluidez después del secado, pero es altamente volátil (>80°C \pm 2°C).

Condiciones ambientales:

Humedad <50% HR \pm 5%, temperatura <30°C \pm 2°C, para evitar la volatilización prematura del aglutinante o la absorción de humedad de las partículas.

Factores del equipo:

El desgaste de la boquilla (vida útil <500 horas \pm 50 horas) provoca gotas desiguales y requiere un reemplazo regular.

(5) Estrategia de optimización

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Preparación de la lechada:

Se utilizó molienda húmeda (300-500 rpm \pm 10 rpm, 5-15 h \pm 0,5 h) para preparar una suspensión homogénea (tamaño de partícula $<1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, viscosidad 300-500 mPa·s \pm 50 mPa·s).

Dispersión ultrasónica (40 kHz \pm 1 kHz, 10 min \pm 1 min), tasa de aglomeración $<5\% \pm 1\%$.

Ajuste de parámetros del proceso:

La concentración de alimentación es del 25% \pm 1%, la temperatura del aire de entrada es de 220 °C \pm 5 °C, la presión de atomización es de 0,2 MPa \pm 0,01 MPa y el tamaño de partícula es de 50-80 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

Aglutinante: 2% \pm 0,1% PVA + 1% \pm 0,1% PEG, resistencia $>$ 12 MPa \pm 1 MPa, fluidez $<$ 20 s/50 g \pm 2 s.

Mantenimiento de equipos:

Limpie la boquilla (una vez por semana, utilice etanol, pureza $>99,5\% \pm 0,1\%$) para evitar obstrucciones.

Reemplace el disco atomizador o la boquilla (cada 500 horas \pm 50 horas), la desviación de velocidad es $<5\% \pm 1\%$.

Posprocesamiento:

Tamiz (100-150 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$) para eliminar partículas de gran tamaño ($<5\% \pm 1\%$).

Secado al vacío (80°C \pm 2°C, $<10^{-2}$ Pa $\pm 10^{-3}$ Pa, 4-6 horas \pm 0,5 horas), agua residual $<0,1\% \pm 0,01\%$.

(6) Efecto de la aplicación

Propiedades de fluidez y compresión:

Fluidez <20 s/50 g \pm 2 s, densidad del cuerpo verde $>60\% \pm 1\%$ (densidad teórica), defectos de prensado $<1\% \pm 0,2\%$.

Ejemplo: WC-10%Co (D50=50 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), vida útil de la herramienta de aviación >15 horas ± 1 hora.

Rendimiento de sinterización:

Densidad $>99\% \pm 0,1\%$, porosidad $<0,05\% \pm 0,01\%$, dureza HV $>2900 \pm 50$, resistencia a la flexión >4200 MPa ± 100 MPa.

Ejemplo: WC-12%Ni (D50=80 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$), vida útil del cuerpo de la bomba química >2 años $\pm 0,2$ años.

consistencia:

La desviación del tamaño de partícula entre lotes es $<5\% \pm 1\%$, la uniformidad es $>95\% \pm 1\%$ y los defectos de sinterización se reducen en un 50% $\pm 5\%$.

(7) Pruebas y control de calidad

Distribución del tamaño de partículas: análisis del tamaño de partículas por láser (GB/T 19077.1-2008), D50 50-100 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, (D90-D10)/D50 $<1,5 \pm 0,1$.

Análisis morfológico: SEM (GB/T 16594-2008), esfericidad $>90\% \pm 2\%$, tasa de aglomeración $<5\% \pm 1\%$.

Contenido de humedad: método Karl Fischer (GB/T 6283-2008), agua residual $<0,2\% \pm 0,05\%$.

Ensayo de resistencia: resistencia a la compresión (GB/T 3851-2015), >10 MPa ± 1 MPa.

Detección de carbono residual: método de absorción infrarroja (GB/T 5124-2017), carbono residual $<0,1\% \pm 0,01\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Monitoreo en línea: la imagen térmica infrarroja monitorea la temperatura del aire de admisión (desviación $<5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) y el medidor de flujo monitorea la alimentación (desviación $<1\% \pm 0,1\%$).

La tecnología de granulación y secado por aspersión convierte polvos finos como WC y Co en partículas de $20\text{-}150\ \mu\text{m} \pm 0,1\ \mu\text{m}$ a través de atomización (presión de $0,2\text{-}0,25\ \text{MPa} \pm 0,01\ \text{MPa}$) y secado a alta temperatura ($200\text{-}250\ ^{\circ}\text{C} \pm 5\ ^{\circ}\text{C}$), mejorando significativamente la fluidez ($<20\ \text{s}/50\ \text{g} \pm 2\ \text{s}$) y la resistencia del cuerpo verde ($>10\ \text{MPa} \pm 1\ \text{MPa}$). Los tipos de equipos incluyen centrífuga (alta producción, $100\text{-}1000\ \text{kg/h} \pm 10\ \text{kg/h}$), presión (alta esfericidad, $50\text{-}500\ \text{kg/h} \pm 5\ \text{kg/h}$), flujo de aire (partículas finas, $30\text{-}300\ \text{kg/h} \pm 5\ \text{kg/h}$), fluido dual (tamaño de partícula controlable, $50\text{-}400\ \text{kg/h} \pm 5\ \text{kg/h}$) y máquina pequeña de laboratorio (para investigación y desarrollo, $0,5\text{-}5\ \text{kg/h} \pm 0,1\ \text{kg/h}$), cada uno con sus propias ventajas únicas. Optimizar la concentración de alimentación ($25\%\text{-}30\% \pm 1\%$), la dosificación de aglutinante ($2\%\text{-}3\% \pm 0,1\%$) y el mantenimiento del equipo puede garantizar la uniformidad de las partículas ($>95\% \pm 1\%$) y el rendimiento de sinterización (densidad $>99\% \pm 0,1\%$). Es ampliamente utilizado en campos de alta gama como herramientas de aviación (vida útil $>15\ \text{horas} \pm 1\ \text{hora}$), equipos químicos (vida útil $>2\ \text{años} \pm 0,2\ \text{años}$), etc.

4.4 Caracterización del polvo

Caracterización del polvo. La calidad del polvo mezclado se evalúa mediante el tamaño de partícula Fisher (FSSS, $0,250\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$), la densidad de partículas sueltas, la densidad compactada ($4,0 \pm 6,2\ \text{g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\ \text{g}/\text{cm}^3$) y la fluidez ($1316\ \text{segundos}/50\ \text{g} \pm 0,5\ \text{segundos}$) para garantizar el rendimiento de sinterización (densidad $>99\% \pm 0,1\%$, desviación de dureza $<\pm 30\ \text{HV}$). El método de caracterización se basa en la dinámica de partículas (sedimentación de Stokes, flujo de Hagen-Poiseuille) y cumple con las normas ISO 4499 y ASTM B330.

4.4.1 Tamaño de partícula de Fisher (FSSS, $0,250\ \mu\text{m}$)

El Subtamizómetro Fisher (FSSS) es un método tradicional para determinar el tamaño promedio de partículas de polvo mediante permeación de aire. Se utiliza ampliamente para el análisis del tamaño de partícula de materias primas de carburo cementado (como el polvo de carburo de tungsteno WC). Se basa en la relación entre la resistencia de la capa de polvo al aire y el tamaño de partícula. Midiendo la permeabilidad del flujo de aire bajo una presión determinada, se calcula el tamaño promedio de partícula (generalmente en micras). El tamaño de partícula Fisher es adecuado para partículas finas ($0,1\text{-}50\ \mu\text{m}$). Los resultados reflejan el área superficial y las características de los poros del polvo, y constituyen un valor de referencia importante para el rendimiento de sinterización y el comportamiento de prensado del carburo cementado.

Métodos de caracterización y significancia Fisher

El tamaño de partícula (FSSS) se midió mediante el método de permeabilidad al aire para determinar el tamaño promedio de partícula del polvo ($0,250\ \mu\text{m} \pm 0,01\ \mu\text{m}$), según la ley de Darcy (permeabilidad $\sim 10^{-12}\ \text{m}^2 \pm 10^{-13}\ \text{m}^2$). El FSSS del polvo mixto con $10\% \pm 1\%$ de Co es de 0,55

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

$\mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el de WC es de $0,33 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y el de Co es de $0,51 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$. El FSSS fino ($<0,5 \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la dureza ($\text{HV} > 2200 \pm 30$), y el tamaño de partícula grande ($> 5 \pm 0,01 \mu\text{m}$) mejora la tenacidad ($K_{IC} > 18 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$). Condiciones de prueba: masa de la muestra $5 \text{g} \pm 0,1 \text{g}$, presión $0,1 \text{MPa} \pm 0,01 \text{MPa}$, pureza del aire $> 99,9 \% \pm 0,01 \%$, error $< 2 \% \pm 0,5 \%$.

Por ejemplo, el polvo FSSS $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ se utiliza para herramientas de corte de aviación (desgaste $<0,08 \text{mm} \pm 0,02 \text{mm}$), dureza $\text{HV} 2300 \pm 30$, vida útil $> 15 \text{h} \pm 1 \text{h}$; FSSS $5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ se utiliza para brocas de minería ($K_{IC} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), vida útil $> 1200 \text{m} \pm 100 \text{m}$.

Factores influyentes y optimización

La medición del FSSS se ve afectada por los siguientes factores:

Composición del polvo: WC/Co=90:10±1%, FSSS $0,5\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$; WC/Ni=88:12±1%, FSSS $1\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$, porque el tamaño de partícula de Ni es mayor ($>2\mu\text{m}\pm 0,01\mu\text{m}$).

Tiempo de molienda de bolas: $12 \text{h} \pm 0,1 \text{h}$, FSSS disminuyó en un $10 \% \pm 2 \%$ ($0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$); $> 24 \text{h}$ aumentó la aglomeración ($> 5 \% \pm 1 \%$) y FSSS aumentó en un $5 \% \pm 1 \%$.

Aditivos: $0,5\% \pm 0,01\%$ VC reduce FSSS en $5\% \pm 1\%$ ($0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), Cr_3C_2 afecta $<2\% \pm 0,5\%$.

Humedad ambiente: $<50\% \pm 5\%$, evitar aglomeración ($<5\% \pm 1\%$), error FSSS $<1\% \pm 0,2\%$.

Calibración del equipo: Error de porosidad del instrumento FSSS $<0,1\% \pm 0,02\%$, reducción de error $1\% \pm 0,2\%$.

Por ejemplo, el polvo FSSS $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ (12 horas de pulido húmedo, $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{VC}$) se utiliza para brocas de PCB (vida útil $> 10^5$ orificios $\pm 10^4$ orificios).

Tamaño de partícula de Fisher (FSSS) aplicación de ingeniería

Herramientas de corte superduras

FSSS $0,20,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, dureza $\text{HV} > 2300 \pm 30$, vida útil del procesamiento de aviación > 15 horas ± 1 hora.

minería

FSSS $35 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, $K_{IC} > 20 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$, vida útil de perforación $> 1200 \text{m} \pm 100 \text{m}$.

4.4.2 Densidad aparente, densidad compactada y fluidez del polvo de carburo de tungsteno

La densidad aparente, la densidad compactada y la fluidez del polvo de carburo de tungsteno (WC) son indicadores importantes de sus propiedades físicas, que afectan directamente el comportamiento de prensado y sinterización del carburo cementado y el rendimiento del producto final. A continuación, se presenta un análisis detallado de los aspectos de definición, método de medición, factores influyentes, medidas de optimización y aplicación de ingeniería.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno

La densidad suelta se refiere a la densidad del polvo en su estado de apilamiento natural, lo que refleja las características de apilamiento y la porosidad del polvo.

Método de medición

De acuerdo con la norma ASTM B212, se dejaron caer libremente $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de polvo en un cilindro de medición estándar (volumen $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$) y se calculó la relación entre masa y volumen.

Valor típico

La densidad aparente del polvo de WC puro es de $4,0\text{-}5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, y la porosidad es de aproximadamente el $40 \% \pm 2 \%$. La densidad aparente del polvo mixto de WC-Co con un $10 \% \pm 1 \%$ de Co es de aproximadamente $4,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, debido a que la densidad del Co ($8,9 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) es mayor que la del WC ($15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) y a que las características de apilamiento cambian después de la mezcla.

significado

La alta densidad aparente ($>4,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) indica que las partículas están dispuestas estrechamente y la porosidad del cuerpo verde prensado es baja ($<40 \% \pm 2 \%$), lo que favorece la densificación por sinterización ($>99 \% \pm 0,1 \%$).

Densidad de compactación del polvo de carburo de tungsteno

La densidad del golpe se refiere a la densidad del polvo en un estado densamente empaquetado después de la vibración o el golpeteo, lo que refleja la eficiencia de llenado entre partículas.

Método de medición

De acuerdo con la norma ASTM B527, el cambio de volumen del polvo se midió utilizando un densímetro (frecuencia de vibración $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$, amplitud $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, vibración 3000 veces ± 50 veces).

Valor típico

La densidad aparente del polvo de WC puro es de $5,0\text{-}6,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, y la porosidad se reduce al $30 \% \pm 2 \%$. La densidad aparente del polvo mixto con un $10 \% \pm 1 \%$ de Co es de aproximadamente $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

significado

La alta densidad de compactación ($>5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) indica que las partículas se pueden rellenar aún más, el compacto tiene una buena consistencia (desviación dimensional $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$) y las propiedades después de la sinterización son estables (dureza HV $>2900 \pm 50$).

Ejemplo: La densidad aparente del polvo es de $5,8 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$. Tras el prensado, la desviación del tamaño del cuerpo verde es $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$. La herramienta de aviación tiene una dureza de HV 2200 ± 30 y una vida útil de $>12 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$.

Fluidez del polvo de carburo de tungsteno

La fluidez refleja la capacidad de flujo del polvo durante la compactación, lo que afecta la uniformidad del llenado del molde y la calidad del producto.

Método de medición

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Según la norma ASTM B213, se utilizó un caudalímetro Hall (abertura de embudo de $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) para medir el tiempo necesario para que $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de polvo pasaran por el embudo. El comportamiento del flujo se ajusta a la ley de Hagen-Poiseuille, y la resistencia viscosa es de aproximadamente $10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} \pm 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Valor típico

La fluidez del polvo WC es de 13 a 16 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos, y la fluidez del polvo mezclado que contiene $10 \% \pm 1 \%$ de Co es de aproximadamente 14 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos.

significado

La excelente fluidez ($<14 \text{ seg}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ seg}$) garantiza un llenado uniforme del molde, una densidad después de la sinterización $>99,5 \% \pm 0,1 \%$ y reduce los defectos de moldeo (grietas $<1 \% \pm 0,2 \%$).

Ejemplo: El polvo con una fluidez de 13 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos tiene una uniformidad de $>98 \% \pm 1 \%$ después del prensado y se utiliza para la producción de herramientas con una desviación dimensional de $<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$.

Factores influyentes y optimización del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno

Tamaño de partícula (tamaño de estudiante de primer año, FSSS):

el tamaño de partícula de Fisher es $<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la fuerza de van der Waals entre partículas aumenta ($>10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$), la densidad aparente cae a $4,2 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ y la fluidez disminuye en 2 segundos $\pm 0,5$ segundos (16 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos). Cuando el tamaño de partícula de Fisher es $>5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el espacio entre partículas disminuye, la densidad aparente aumenta a $5,0 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ y la fluidez aumenta en 1 segundo $\pm 0,2$ segundos (13 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos).

Optimización: Controlar el tamaño de partícula de la fibra de vidrio entre $0,5\text{-}3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y equilibrar la densidad y la fluidez (densidad suelta $4,5 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $14 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$).

Apariencia:

Las partículas esféricas (tasa de esferoidización $>95\% \pm 1\%$) presentan un bajo coeficiente de fricción superficial ($<0,2 \pm 0,02$), un aumento del $5\% \pm 1\%$ en la densidad compactada ($6,0 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$) y un aumento del $3\% \pm 0,5\%$ en la fluidez (13 segundos/50 g $\pm 0,5$ segundos). Las partículas irregulares (bordes $>0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) presentan grandes espacios de apilamiento y una disminución del $3\% \pm 0,5\%$ en la densidad compactada ($5,2 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Se utilizó granulación por secado por aspersión (tamaño de partícula $50 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, esfericidad $>90 \% \pm 2 \%$) para mejorar la consistencia de la morfología de las partículas.

Contenido adicional:

Cuando el contenido de Co es del $10 \% \pm 1 \%$, la densidad compactada es de $5,5 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ y la fluidez es de $14 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$. Cuando el contenido de Co es $>15 \% \pm 1 \%$, las partículas de Co (densidad $8,9 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$) se distribuyen de forma desigual, la densidad compactada cae a $5,2 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ y la fluidez disminuye en $1 \text{ s} \pm 0,2 \text{ s}$ ($15 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$).

Optimización: El contenido de Co se controla en $8\%\text{-}12\% \pm 1\%$ para garantizar una densidad y fluidez óptimas (densidad compactada $5,5\text{-}5,8 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $<14 \text{ segundos}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ segundos}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

humedad:

Cuando la humedad ambiente es $<50\% \pm 5\%$ HR, la fluidez se mantiene en $14\text{ s}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ s}$. Cuando la humedad es $>80\% \pm 5\%$ HR, la adsorción de agua provoca un aumento del $10\% \pm 2\%$ en la tasa de aglomeración y una disminución de $2\text{ s} \pm 0,5\text{ s}$ en la fluidez ($16\text{ s}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ s}$).

Optimización: La humedad del entorno de procesamiento se controla entre el 40% y el $50\% \pm 5\%$ de HR y el polvo se seca hasta un contenido de humedad de $<0,1\% \pm 0,01\%$ (método de Karl Fischer, GB/T 6283-2008).

Proceso de granulación:

de $50\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, esfericidad $>90\% \pm 2\%$ aumentó la densidad compactada en un $10\% \pm 2\%$ ($6,0\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$) y la fluidez en un $5\% \pm 1\%$ ($13\text{ segundos}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ segundos}$). El polvo no granulado (tamaño de partícula inicial $<1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$) se aglomeró severamente y la densidad compactada fue de solo $5,0\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$.

Optimización: utilice un secador por aspersión centrífugo (velocidad de rotación $10000\text{-}15000\text{ rpm} \pm 50\text{ rpm}$), tamaño de partícula $50\text{-}80\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$, agregue $2\% \pm 0,1\%$ de aglutinante PVA.

Ejemplo: Un polvo que contiene $10\% \pm 1\%$ de Co, tamaño de partícula Fisher $1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$, partículas secadas por aspersión ($50\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$), densidad de compactación $6,0\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $13\text{ segundos}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ segundos}$, densidad después del prensado $>99,5\% \pm 0,1\%$, transformado en una broca minera con una vida útil de $>1200\text{ m} \pm 100\text{ m}$.

Aplicación de ingeniería

Cuchillos de aviación:

Densidad de compactación $5,8\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $13\text{ segundos}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ segundos}$, desviación del tamaño del cuerpo verde prensado $<0,01\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$, dureza después de la sinterización HV 2200 ± 30 , vida útil $>12\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$, adecuado para el procesamiento de materiales de aviación (aleación Ti-6Al-4V, $1000\text{ }^\circ\text{C} \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$).

Taladro de minería:

Densidad de compactación $6,0\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $13\text{ segundos}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ segundos}$, densidad de sinterización $>99,5\% \pm 0,1\%$, resistencia a la flexión $>4200\text{ MPa} \pm 100\text{ MPa}$, vida útil $>1200\text{ m} \pm 100\text{ m}$, adecuado para perforación de roca dura (resistencia a la compresión $>200\text{ MPa} \pm 10\text{ MPa}$).

Troquel de encabezado en frío:

Densidad de compactación $6,2\text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1\text{ g}/\text{cm}^3$, fluidez $14\text{ s}/50\text{ g} \pm 0,5\text{ s}$, deformación después del prensado $<0,01\text{ mm} \pm 0,002\text{ mm}$, vida útil del molde $>10^6\text{ veces} \pm 10^5\text{ veces}$, adecuado para estampado en frío de alta precisión.

Pruebas y control de calidad

Densidad aparente: según ASTM B212, cada lote se prueba 3 veces y la desviación del valor promedio es $<2\% \pm 0,5\%$.

Densidad de vibración: Según ASTM B527, registrar parámetros de vibración (frecuencia $50\text{ Hz} \pm 1\text{ Hz}$, amplitud $1\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$), desviación $<2\% \pm 0,5\%$.

Fluidez: Basado en ASTM B213, calibración de apertura de embudo ($5\text{ mm} \pm 0,1\text{ mm}$), humedad del ambiente de prueba $<50\% \pm 5\%$ HR, desviación $<1\text{ segundo} \pm 0,2\text{ segundos}$.

Monitoreo en línea: Utilice un medidor de densidad de grifo automático y un medidor de flujo para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

registrar datos de lotes en tiempo real y archivarlos durante 1 año \pm 0,1 año.

La densidad aparente ($4,0-5,0 \text{ g/cm}^3$), la densidad aparente ($5,0-6,2 \text{ g/cm}^3$) y la fluidez ($13-16$ segundos/ 50 g) del polvo de carburo de tungsteno son parámetros clave para la preparación de carburo cementado. El rendimiento se ve afectado significativamente por el tamaño de partícula ($0,5-5 \mu\text{m}$), la morfología (esfericidad $>95\%$), el contenido de Co ($8\%-12\%$), la humedad ($<50\%$ HR) y el proceso de granulación (partículas de $50 \mu\text{m}$). Al optimizar el tamaño de partícula, la morfología y los parámetros del proceso, se puede lograr una densidad aparente de $6,0 \text{ g/cm}^3$ y una fluidez de 13 segundos/ 50 g , cumpliendo con los altos requisitos de rendimiento de las herramientas de aviación (vida útil >12 horas), las brocas de minería (vida útil $>1200 \text{ m}$) y las matrices de estampación en frío (deformación $<0,01 \text{ mm}$).

4.5 Resumen y perspectivas

La selección de materia prima y la preparación de polvo de carburo cementado son los vínculos clave en la optimización del rendimiento. Este capítulo explica la relación entre los parámetros del proceso y el rendimiento mediante el análisis de la síntesis de polvo de carburo de tungsteno ($1450-1600 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, tamaño de partícula $0,110 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, carbono libre $<0,1 \% \pm 0,01 \%$), fase de unión y aditivos (pureza de Co/Ni $>99,8 \% \pm 0,01 \%$, VC/ $\text{Cr}_3\text{C}_2 < 1 \% \pm 0,01 \%$), pretratamiento del polvo (molienda de bolas $10:1 \pm 0,5$, caudal de secado por pulverización $100 \text{ L/h} \pm 10 \text{ L/h}$) y caracterización del polvo (FSSS $0,250 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, densidad compactada $4,0-6,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, fluidez 1316 segundos/ $50 \text{ g} \pm 0,5$ segundos):

Polvo de WC

El tamaño de partícula submicrónica ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la alta pureza (carbono libre $<0,08 \% \pm 0,01 \%$) aumentan la dureza ($\text{HV} > 2300 \pm 30$) para herramientas de aviación (vida útil $> 15 \text{ h} \pm 1 \text{ h}$).

Fase de unión

El Co ($10\% \pm 1\%$) proporciona tenacidad ($K_{1c} 1520 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2} \pm 0,5$), y el Ni ($12\% \pm 1\%$) mejora la resistencia a la corrosión ($<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$), y se utiliza para válvulas de aguas profundas (vida útil > 5 años $\pm 0,5$ años).

Un aditivo

El VC ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) controla el tamaño de partícula de WC ($<0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), el Cr_3C_2 ($0,5 \% \pm 0,01 \%$) mejora la resistencia ($> 4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$) y se utiliza para brocas de PCB ($> 10^5$ agujeros $\pm 10^4$ agujeros).

Preprocesamiento

La molienda húmeda ($12 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) y el secado por aspersion ($250 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$) garantizan uniformidad (desviación $<2 \% \pm 0,5 \%$) y fluidez ($13 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$) para su uso en brocas de minería (densidad $> 99,5 \% \pm 0,1 \%$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Caracterización

La FSSS ($0,35 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y la densidad aparente ($5,86,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$) predicen la calidad de sinterización con una desviación de dureza reducida ($< \pm 30 \text{ HV}$).

Las estrategias de optimización incluyen

Relación W:C precisa ($1:1,01 \pm 0,01$), atmósfera de H_2 ($\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$), Co fino ($< 1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), adición de VC ($0,3 \% \pm 0,5 \% \pm 0,01 \%$), molienda húmeda ($10:1 \pm 0,5, 12 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$) y secado por aspersión ($60 \% \pm 1 \%$ de contenido sólido).

Por ejemplo, el polvo que contiene $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ WC, $10 \% \pm 1 \%$ Co y $0,5 \% \pm 0,01 \%$ VC (FSSS $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, densidad de compactación $6,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$, fluidez $13 \text{ segundos}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ segundos}$) se utiliza para herramientas de aviación, con dureza $\text{HV } 2300 \pm 30$, cantidad de desgaste $< 0,08 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ y vida útil $> 15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$; El polvo que contiene $1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ WC, $12 \% \pm 1 \%$ Ni y $0,5 \% \pm 0,01 \% \text{ Cr}_3\text{C}_2$ se utiliza para válvulas de aguas profundas, con una profundidad de corrosión $< 3 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$ y una vida útil $> 5 \text{ años} \pm 0,5 \text{ años}$.

Las futuras direcciones de investigación incluyen la producción a gran escala de nano polvo de WC ($< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) (rendimiento $> 5 \text{ t/lote} \pm 0,5 \text{ t}$), fase de unión verde (basada en Fe, costo $< \$ 1000/\text{t} \pm 100 \text{ USD}$), nuevos inhibidores (como TaC, $< 0,5\% \pm 0,01\%$) y caracterización inteligente (predicción de IA de FSSS, error $< 1\% \pm 0,2\%$) para satisfacer las necesidades de la aviación (velocidad de corte $> 500 \text{ m/min} \pm 10 \text{ m/min}$), aguas profundas ($> 10000 \text{ m}$) y nuevas energías (vida del electrolizador $> 10^4 \text{ horas} \pm 10^3 \text{ horas}$). Este capítulo proporciona una base de proceso para la formación y sinterización en el Capítulo 5 al correlacionar la contribución de la fase WCCo con el rendimiento en el Capítulo 3.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Apéndice: Tabla de referencia para la selección de productos de carburo cementado y polvo de carburo de tungsteno

producto tipo	producto Ejemplo	Requisitos de rendimiento	de Características del polvo WC	Parámetros de selección del polvo WC	Escenarios aplicables	ilustrar
Corte cuchilla	Insertos de torneado, insertos de fresado, insertos de ranurado	Alta dureza (HRA 8993 ±0,5), excelente resistencia al desgaste (desgaste de flanco VB <0,3 mm), resistencia al astillado (profundidad de astillado <0,15 mm), rugosidad superficial (D50 ±0,1 μm) Ra <0,8 μm	Grano fino (0,51,5 μm de partícula: ±0,1 μm), alta pureza (>99,95 % ±0,01 %), bajo contenido de oxígeno (<0,1 % ±0,01 %), distribución uniforme de partículas	Tamaño de partícula: 0,51,5 μm de partícula: ±0,1 μm , pureza: >99,95% ±0,01%, contenido de carbono: 6,13% 6,18% ±0,01%, contenido de Co: 6% 12% ±0,5%, aditivos: TiC / TaC (0% 2% ±0,1%)	de acero, acero inoxidable, hierro fundido , velocidad de corte 100400 m/min ±10 m/min	El polvo WC de grano fino garantiza una alta dureza y resistencia al desgaste, TiC / TaC mejora el rendimiento a alta temperatura y el contenido de Co equilibra la tenacidad y la dureza; adecuado para insertos tipo ISO P / M / K.
Herramienta general	Taladros, fresas, escariadores	Alta resistencia a la flexión (2000-3000 MPa ±100 MPa), excelente tenacidad (tenacidad a la fractura 812 MPa·m ^{1/2} ± 0,5), resistencia al impacto (tenacidad al impacto > 10 J/cm ² ± 1 J/cm ²)	Grano medio-fino (1,02,0 μm ±0,1 μm), alta pureza (>99,9 % ±0,01 %), contenido moderado de oxígeno (<0,15 % ±0,01 %), composición química estable	Tamaño de partícula: 1,0 ± 2,0 μm ± 0,1 μm , pureza: >99,9 % ± 0,01 % , contenido de carbono: 6,10 % ± 6,15 % ± 0,01 % , contenido de Co: 8 % ± 15 % ± 0,5 % , aditivos: VC/ Cr ₃ C ₂ (0,1 % ± 0,5 % ± 0,05 %)	Acero para moldes, procesamiento de aleación de aluminio, profundidad de perforación/fresado <20 mm ±1 mm	El WC de grano medio-fino mejora la tenacidad, VC/ Cr ₃ C ₂ controla el crecimiento del grano y garantiza la resistencia general de la herramienta; adecuado para entornos de procesamiento de alta carga .
Matrices trefilado	Matriz de trefilado, matriz de extrusión	Muy alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,01 mm ³ /h ± 0,001 mm ³ /h), alto acabado superficial (Ra <0,05 μm) , resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos y álcalis pH 310)	Grano ultrafino (0,20,8 μm ±0,1 μm) , pureza ultraalta (>99,98 % ±0,01 %), contenido de oxígeno extremadamente bajo (<0,05 % ±0,01 %), alta uniformidad	de partícula: 0,20,8 μm ±0,1 μm , pureza: >99,98% ±0,01%, contenido de carbono: 6,15% 6,20% ±0,01%, contenido de Co: 3% 6% ±0,5%, aditivos: sin o una pequeña cantidad de TaC (<0,5% ±0,05%)	Trefilado de alambre de cobre y acero, diámetro del alambre 0,15 mm ± 0,01 mm	El WC de grano ultrafino proporciona un acabado de espejo y resistencia al desgaste, el bajo contenido de Co mejora la dureza; la pureza del polvo debe controlarse estrictamente para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	producto Ejemplo	Requisitos de rendimiento	Características del polvo WC	Parámetros de selección del polvo WC	Escenarios aplicables	ilustrar
						evitar impurezas.
Troquel de estampación	Matriz de estampación frío, matriz punzonado	Alta resistencia a la compresión (>4000 MPa \pm 100 MPa), resistencia al impacto (número de impacto $>10^6 \pm 10^4$), resistencia a la fatiga (resistencia a la fatiga >1000 MPa \pm 50 MPa)	Grano medio grueso (2,0-4,0 $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$), alta pureza (>99,9 % $\pm 0,01$ %), contenido moderado de oxígeno (<0,2 % $\pm 0,01$ %), alta estabilidad	Tamaño de partícula: 2,0 $\mu\text{m} \pm 0,2 \mu\text{m}$, pureza: >99,9 % $\pm 0,01$ %, contenido de carbono: 6,08 % $\pm 0,01$ %, 6,13 % $\pm 0,01$ %, contenido de Co: 10 % $\pm 0,1$ %, aditivos: Cr ₃ C ₂ (0,2 % $\pm 0,05$ %)	Pernos, estampación de chapa metálica, espesor <10 mm $\pm 0,1$ mm	El WC de grano medio-grueso mejora la resistencia al impacto, el alto contenido de Co mejora la tenacidad y el Cr ₃ C ₂ inhibe el crecimiento del grano; adecuado para moldes de alta tensión.
Piezas resistentes al desgaste	Boquilla, anillo de sellado, martillo superior	Alta resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,005 mm ³ / N · m \pm 0,001 mm ³ / N · m), resistencia a la corrosión (vida útil >5000 h \pm 100 h), estabilidad térmica (<800 °C \pm 10 °C)	Grano grueso (3,0-6,0 $\mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$), pureza (>99,8% $\pm 0,01$ %), alto contenido de oxígeno (<0,3% $\pm 0,01$ %), alta estabilidad química	Tamaño de partícula: 3,0 $\pm 6,0 \mu\text{m} \pm 0,5 \mu\text{m}$, pureza: >99,8 % $\pm 0,01$ %, contenido de carbono: 6,05 % $\pm 6,10$ % $\pm 0,01$ %, contenido de Co: 12 % ± 25 % $\pm 0,5$ %, aditivos: nada o poca cantidad de Ni (< 2 % $\pm 0,1$ %)	Chorro de arena, minería, sellado, presión de trabajo <50 MPa ± 1 MPa	El WC de grano grueso mejora la resistencia al desgaste y la tenacidad, y el alto contenido de Co o Ni mejora la resistencia a la corrosión; adecuado para piezas resistentes al desgaste en condiciones de trabajo extremas.
Herramientas de minería	Picos, brocas para perforar rocas	Muy alta resistencia al impacto (tenacidad al impacto > 15 J/cm ² ± 1 J/cm ²), resistencia al desgaste (tasa de desgaste < 0,02 mm ³ /h $\pm 0,002$ mm ³ /h), resistencia a la fatiga.	Grano ultra grueso (6,010,0 $\mu\text{m} \pm 1,0 \mu\text{m}$), pureza (>99,7 % $\pm 0,01$ %), alto contenido de oxígeno (<0,4 % $\pm 0,01$ %), alta tenacidad	Tamaño de partícula: 6,0 $\mu\text{m} \pm 1,0 \mu\text{m}$, pureza: >99,7 % $\pm 0,01$ %, contenido de carbono: 6,00 % $\pm 6,10$ % $\pm 0,01$ %, contenido de Co: 15 % ± 30 % ± 1 %, aditivos: ninguna o una pequeña cantidad de aleación de CoNi (<5 % $\pm 0,2$ %)	Minería de carbón, minería de roca dura, frecuencia de impacto <100 Hz ± 5 Hz	El WC de grano ultra grueso proporciona alta tenacidad y el alto contenido de Co mejora la resistencia al impacto; es adecuado para entornos de minería de carga pesada y el contenido de oxígeno debe controlarse para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	producto Ejemplo	Requisitos de rendimiento	de Características del polvo WC	del Parámetros de selección del polvo WC	Escenarios aplicables	ilustrar
						evitar la fragilización.
Piezas de precisión	Microherramientas, núcleos de válvulas	Alta precisión (tolerancia dimensional $\pm 0,005$ mm), excelente acabado superficial (Ra $< 0,02 \mu\text{m}$), alta dureza (HRA 9294 $\pm 0,5$)	Nanocristales (0,10,4 $\mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$), pureza ultraalta ($> 99,99\%$ $\pm 0,01\%$), contenido de oxígeno extremadamente bajo ($< 0,03\%$ $\pm 0,01\%$) y uniformidad extremadamente alta	Tamaño de partícula: 0,10,4 $\mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$, pureza: $> 99,99\%$ $\pm 0,01\%$, contenido de carbono: 6,18% $\pm 0,01\%$, 6,22% $\pm 0,01\%$, contenido de Co: 2% $\pm 0,3\%$, aditivos: VC (0,05% $\pm 0,02\%$)	Procesamiento de piezas electrónicas, altas, el control de fluidos, tamaño < 10 mm $\pm 0,1$ mm	El WC nanocristalino garantiza una dureza y suavidad ultra altas, el bajo contenido de Co y VC controla el crecimiento del grano; se requiere polvo de alta pureza para evitar defectos.

Tabla de referencia para la selección de productos de carburo cementado y procesos de producción

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
Insertos de corte	de torneado, insertos de fresado, insertos de ranurado	Alta dureza (HRA 8993 $\pm 0,5$), resistencia al desgaste (desgaste de flanco VB $< 0,3$ mm), resistencia al astillado (profundidad de astillado $< 0,15$ mm), rugosidad superficial Ra $< 0,8 \mu\text{m}$	Moldeo por compresión bidireccional, prensado isostático en frío	Sinterización al vacío en baja presión	Prensado: presión 100-250 MPa ± 10 MPa, tiempo 1040 s ± 1 s, densidad del cuerpo verde 60% $\pm 2\%$ (moldeo bidireccional); presión 100-300 MPa ± 10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ± 10 s, densidad del cuerpo verde 70% $\pm 1\%$ (CIP). Sinterización: temperatura 1350-1500 $^{\circ}\text{C} \pm 10$ $^{\circ}\text{C}$, temperatura de mantenimiento 14 h ± 5 min, grado de vacío	de acero, acero inoxidable, hierro fundido, velocidad de corte 100400 m/min ± 10 m/min	El moldeo bidireccional o CIP garantiza una densidad uniforme, la sinterización al vacío o a baja presión mejora la dureza y la resistencia al desgaste; adecuado para hojas ISO P/M/K, tamaño de grano 0,51,5 $\mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					0,010,1 Pa ±0,01 Pa, densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (vacío); presión 110 MPa ±0,05 MPa, densidad 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (baja presión).		
Herramienta general	Taladros, fresas, escariadores	Alta resistencia a la flexión (2000-3000 MPa ±100 MPa), tenacidad (tenacidad a la fractura $812 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$), resistencia al impacto (tenacidad al impacto $> 10 \text{ J/cm}^2 \pm 1 \text{ J/cm}^2$)	Moldeo por extrusión, prensado isostático en frío	Prensado isostático en caliente (HIP), sinterización al vacío	Prensado: presión de extrusión 20100 MPa ±5 MPa, velocidad 0,11 m/min ±0,01 m/min, densidad de la palanquilla 50%65% ±2% (extrusión); presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad de la palanquilla 70%85% (CIP) < ±1% > Sinterización: temperatura 13001450°C ±10°C, presión 100200 MPa ±0,1 MPa, temperatura de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 99,8%100% ±0,2% (HIP); Temperatura ussel1350-1500 °C ±10 °C, temperatura de mantenimiento 14 h ±5 min, densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (vacío)	Acero para moldes, procesamiento de aleación de aluminio, profundidad de perforación/fresado <20 mm ±1 mm	El moldeo por extrusión es adecuado para barras, el CIP es adecuado para formas complejas; el HIP mejora la resistencia, la sinterización al vacío tiene bajo costo; el contenido de Co es del 8%15% ±0,5%.
Matrices trefilado	de Matriz de trefilado, matriz de extrusión	de desgaste <0,01 mm ³ /h ± 0,001 mm ³ /h), acabado superficial (Ra <0,05 μm)	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático	Sinterización de por microondas, sinterización al vacío	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200 °C ±5 °C, contracción de la	Trefilado de alambre de cobre y acero, diámetro del alambre 0,15 mm ± 0,01 mm	PIM es adecuado para moldes de precisión, el CIP garantiza la uniformidad; la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
		resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos y álcalis pH 310)	frío		palanquilla 15 % 20 % ±1 % (PIM); presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad de la palanquilla 70 % 85 % ±1 % (CIP) Sinterización : temperatura 1300 1450 °C ±10 °C, tiempo 1060 min ±1 min, densidad 97 % 99 % ±0,5 % (microondas); temperatura 1350 1500 °C ±10 °C, temperatura de mantenimiento 14 h ±5 min, densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (vacío)		sinterización por microondas es eficiente, la sinterización al vacío garantiza la suavidad; polvo WC ultrafino 0,20,8 μm ± 0,1 μm .
Troquel de estampación	Matriz de estampación en frío, matriz de punzonado	Alta resistencia a la compresión (>4000 MPa ±100 MPa), resistencia al impacto (número de impacto >10 ⁶ ±10 ⁴), resistencia a la fatiga (resistencia a la fatiga >1000 MPa ±50 MPa)	Moldeo por compresión unidireccional, prensado isostático en frío	Prensado isostático en caliente (HIP), sinterización con protección de gas	Prensado: presión 50200 MPa ±10 MPa, tiempo 530 s ±1 s, densidad del material verde 50% 70% ±2% (unidireccional); presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad del material verde 70% 85% ±1% (CIP) Sinterización : temperatura 1300 1450 °C ±10 °C, presión 100200 MPa ±0,1 MPa, temperatura de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 99,8%	Pernos, estampación de chapa metálica, espesor <10 mm ±0,1 mm	El moldeo unidireccional tiene un bajo costo, el CIP es adecuado para moldes complejos; el HIP mejora la resistencia, la protección de gas es adecuada para moldes grandes; grano medio-grueso WC 2,04,0 μm ± 0,2 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					100% ±0,2% (HIP); temperatura 1350 1480 °C ±10 °C, temperatura de mantenimiento 15 h ±5 min, densidad 97% 99% ±0,5% (gas)		
Piezas resistentes al desgaste	Boquilla, anillo de sellado, martillo superior	Alta resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,005 mm ³ / N · m ± 0,001 mm ³ / N · m), resistencia a la corrosión (vida útil >5000 h ±100 h), estabilidad térmica (<800 °C ±10 °C)	Perfilado, prensado isostático de bolsas secas	Sinterización a baja presión, sinterización con protección de gas	Prensado: presión del rodillo 50150 MPa ±10 MPa, velocidad del rodillo 0,55 rpm ±0,1 rpm, espesor de la palanquilla 110 mm ±0,1 mm (laminación); presión 150400 MPa ±10 MPa, tiempo 30120 s ±5 s, densidad de la palanquilla 70%80% ±1% (bolsa seca) Sinterización : temperatura 13501450 °C ±10 °C, presión 110 MPa ±0,05 MPa, aislamiento 13 h ±5 min, densidad 98,5%99,5% ±0,3% (baja presión); temperatura 13501480 °C ±10 °C, aislamiento 15 h ±5 min, densidad 97%99% ±0,5% (gas)	Chorro de arena, minería, sellado, presión <50 MPa ±1 MPa	con rodillos es adecuado para placas delgadas, el prensado isostático en bolsas secas es eficiente, la sinterización a baja presión equilibra el rendimiento y la protección de gas es adecuada para piezas grandes; grano grueso WC 3,0 6,0 μm ± 0,5 μm .
Herramientas de minería	Picos, brocas para perforar rocas	Muy alta resistencia al impacto (tenacidad al impacto > 15 J/cm ² ± 1 J/cm ²),	Moldeo por compresión unidireccional, moldeo por extrusión	Sinterización con protección de gas, sinterización al vacío	Prensado: presión 50200 MPa ±10 MPa, tiempo 530 s ±1 s, densidad de la palanquilla 50% 70% ±2% (unidireccional); presión de extrusión	Minería de carbón, minería de roca dura, frecuencia de impacto <100 Hz ±5 Hz	El moldeo unidireccional tiene un bajo costo y la extrusión es adecuada para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
		resistencia al desgaste (tasa de desgaste < 0,02 mm ³ /h ± 0,002 mm ³ /h), resistencia a la fatiga.			20100 MPa ±5 MPa, velocidad 0,11 m/min ±0,01 m/min, densidad de la palanquilla 50% 65% ±2% (extrusión). Sinterización : temperatura 1350 1480 °C ±10 °C, aislamiento 15 h ±5 min, densidad 97% 99% ±0,5% (gas); temperatura 1350 1500 °C ±10 °C, aislamiento 14 h ±5 min, densidad 98% 99,5% ±0,5% (vacío).		tiras largas; la protección con gas es adecuada para piezas grandes y la sinterización al vacío mejora el rendimiento; grano ultra grueso WC 6.010.0 μm ± 1.0 μm .
Piezas de precisión	Microherramientas, núcleos de válvulas	Alta precisión (tolerancia ±0,005 mm), acabado superficial (Ra <0,02 μm) , alta dureza (HRA 9294 ±0,5)	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático de bolsas secas	Sinterización por microondas, sinterización por plasma por chispa (SPS)	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200°C ±5°C, contracción de la palanquilla 15%20% ±1% (PIM); presión 150400 MPa ±10 MPa, tiempo 30120 s ±5 s, densidad de la palanquilla 70%80% ±1% (bolsa seca) >Sinterización: temperatura 13001450°C ±10°C, tiempo 1060 min ±1 min, densidad 97%99% ±0,5% (microondas); Temperatura 1200-1400 °C ±10 °C, presión 30-100 MPa ±0,1 MPa, tiempo 520 min ±30 s,	Procesamiento de piezas electrónicas, control de fluidos, el tamaño <10 mm ±0,1 mm	El prensado isostático con PIM y bolsas secas son adecuados para formas microcomplejas; el microondas y el SPS son rápidos y de alta precisión; WC nanocristalino 0,10,4 μm ± 0,05 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (SPS)		
Herramientas de laminación	Rodillo, rodillo de presión	Alta resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,01 mm ³ / N · m ± 0,001 mm ³ / N · m), resistencia a la fatiga (vida útil por fatiga >10 ⁷ ciclos ±10 ⁵), estabilidad térmica (<900 °C ±10 °C).	isostático en frío, moldeo por compresión unidireccional	Prensado isostático en caliente (HIP), sinterización a baja presión	Prensado: presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad del cuerpo verde 70%85% ±1% (CIP); presión 50200 MPa ±10 MPa, tiempo 530 s ±1 s, densidad del cuerpo verde 50%70% ±2% (unidireccional) Sinterización: temperatura 13001450 °C ±10 °C, presión 100200 MPa ±0,1 MPa, presión de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 99,8%100% ±0,2% (HIP); Temperatura 1350-1450 °C ±10 °C, presión 110 MPa ±0,05 MPa, presión de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (baja presión)	Laminado de chapa de acero y perfil de aluminio, fuerza de laminación <1000 kN ±10 kN	del moldeo unidireccional es bajo; el HIP mejora la resistencia al desgaste y la sinterización a baja presión equilibra el costo; WC de grano grueso 3,06,0 μm ±0,5 μm, Co 10%20% ±0,5%.
Revestimiento resistente al desgaste	Revestimiento de trituradora, revestimiento de molino	Alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,015 mm ³ /h ± 0,002 mm ³ /h), resistencia al impacto (tenacidad al	Perfilado, moldeo por compresión unidireccional	Sinterización con protección de gas, sinterización a baja presión	Prensado: presión del rodillo 50150 MPa ±10 MPa, velocidad del rodillo 0,55 rpm ±0,1 rpm, espesor de la palanquilla 110 mm ±0,1 mm (laminación); presión 50200 MPa ±10	Minería, trituración de materiales, tasa de desgaste <0,1 mm/mes ± 0,01 mm	El conformado por rodillos es adecuado para placas delgadas y el moldeo unidireccional es eficiente; la protección con

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
		<p>impacto >12 J/cm² (± 1 J/cm²) ,</p> <p>resistencia a la corrosión (vida útil >4000 h ±100 h)</p>			<p>MPa, tiempo 530 s ±1 s, densidad de la palanquilla 50%70% ±2% (unidireccional)</p> <p>Sinterización : temperatura 1350 ±1480 °C ±10 °C, aislamiento 15 h ±5 min, densidad 97%99% ±0,5% (gas); temperatura 1350 ±1450 °C ±10 °C, presión 110 MPa ±0,05 MPa, aislamiento 13 h ±5 min, densidad 98,5%99,5% ±0,3% (baja presión)</p>		<p>gas es adecuada para placas de revestimiento grandes y la sinterización a baja presión mejora el rendimiento; grano medio-grueso WC 2,04,0 μm ± 0,2 μm .</p>
Componentes de los cojinetes	Manguitos de cojinetes, bolas	<p>Alta resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,003 mm³ / N · m ± 0,001 mm³ / N · m) , alta precisión (tolerancia ±0,01 mm), resistencia a la fatiga (vida útil >10⁸ ciclos ±10⁶)</p>	<p>Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático en frío</p>	<p>Sinterización al vacío, sinterización por plasma con chispa (SPS)</p>	<p>Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200°C ±5°C, contracción de la palanquilla 15%20% ±1% (PIM); presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad de la palanquilla 70%85% ±1% (CIP)

Sinterización: temperatura 13501500°C ±10°C, presión de mantenimiento 14 h ±5 min, densidad 98%99,5% ±0,5% (vacío); Temperatura</p>	<p>Maquinaria de alta velocidad, rodamientos de automoción, velocidad <10⁴ rpm ±100 rpm</p>	<p>PIM es adecuado para formas complejas, CIP garantiza uniformidad; la sinterización al vacío es universal, SPS mejora la precisión; WC de grano fino 0,51,5 μm ± 0,1 μm .</p>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					1200-1400 °C ±10 °C, presión 30-100 MPa ±0,1 MPa, tiempo 520 min ±30 s, densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (SPS)		
Herramientas de pulverización	Boquilla de pulverización, boquilla de chorro de arena	Muy alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,005 mm³/h ± 0,001 mm³/h), resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos y álcalis pH 212), estabilidad térmica (<700 °C ±10 °C)	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático de bolsas secas	Sinterización por microondas, sinterización a baja presión	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200 °C ±5 °C, contracción de la palanquilla 15 % 20 % ±1 % (PIM); presión 150400 MPa ±10 MPa, tiempo 30120 s ±5 s, densidad de la palanquilla 70 % 80 % ±1 % (bolsa seca). Sinterización : temperatura 1300 1450 °C ±10 °C, tiempo 1060 min ±1 min, densidad 97 % 99 % ±0,5 % (microondas); temperatura 1350 1450 °C ±10 °C, presión 110 MPa ±0,05 MPa, aislamiento 13 h ±5 min, densidad 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (baja presión).	Chorro de arena, pulverización de pintura, caudal <100 L/min ±1 L/min	PIM es adecuado para boquillas de precisión, el prensado isostático de bolsas secas es eficiente; la sinterización por microondas es rápida, la sinterización a baja presión garantiza el rendimiento; WC ultrafino 0,20,8 μm ± 0,1 μm.
Herramientas médicas	Brocas dentales, hojas quirúrgicas	(HRA 9194 ±0,5), acabado superficial (Ra <0,01 μm), biocompatibilidad (no tóxico), alta precisión (tolerancia ±0,002)	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático de bolsas secas	Sinterización por plasma de chispa (SPS), sinterización al vacío	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200°C ±5°C, contracción de la palanquilla 15%20% ±1% (PIM); presión 150400 MPa ±10 MPa,	Cirugía dental, procesamiento ortopédico, tamaño <5 mm ±0,05 mm	El prensado isostático en bolsas secas y PIM son adecuados para formas microcomplejas; SPS tiene alta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
		mm)			tiempo 30120 s ±5 s, densidad de la palanquilla 70%80% ±1% (bolsa seca) >Sinterización: temperatura 12001400°C ±10°C, presión 30100 MPa ±0,1 MPa, tiempo 520 min ±30 s, densidad 98%99,5% ±0,5% (SPS); Temperatura 1350-1500 °C ±10 °C, aislamiento 14 h ±5 min, densidad 98 % 99,5 % ±0,5 % (vacío)		precisión y sinterización al vacío estable; WC nanocristalino 0,10,4 μm ±0,05 μm , Co tan bajo como 2%5% ±0,3%.
Componentes energéticos	Perforación de dientes, sellos de válvulas	Alta resistencia al desgaste (pérdida por desgaste <0,008 mm³/N·m ± 0,001 mm³/N· m) , resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos y álcalis pH 211), resistencia a altas temperaturas (<1000 °C ±10 °C)	Prensado isostático en frío, prensado isostático en bolsas secas	Prensado isostático en caliente (HIP), sinterización a baja presión	Prensado: presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad del cuerpo verde 70%85% ±1% (CIP); presión 150400 MPa ±10 MPa, tiempo 30120 s ±5 s, densidad del cuerpo verde 70%80% ±1% (bolsa seca) >Sinterización: temperatura 13001450 °C ±10 °C, presión 100200 MPa ±0,1 MPa, presión de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 99,8%100% ±0,2% (HIP); Temperatura 1350-1450 °C ±10 °C,	Perforación petrolera, válvulas de gas natural, presión <100 MPa ±1 MPa	a alta temperatura y la sinterización a baja presión tiene un costo moderado; grano grueso WC 3,0 6,0 μm ±0,5 μm , adición de Ni <2 % ±0,1 %.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					presión 110 MPa ±0,05 MPa, presión de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 98,5 % 99,5 % ±0,3 % (baja presión)		
Componentes aeroespaciales	Moldes para álabes de turbinas, moldes para fijaciones	Alta resistencia a la fatiga (vida útil por fatiga >10 ⁸ ciclos ±10 ⁶), resistencia a altas temperaturas (<900 °C ±10 °C), alta precisión (tolerancia ±0,01 mm)	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático frío	Sinterización al vacío, prensado isostático en caliente (HIP)	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200°C ±5°C, contracción de la palanquilla 15%20% ±1% (PIM); presión 100300 MPa ±10 MPa, presión de mantenimiento 15 min ±10 s, densidad de la palanquilla 70%85% ±1% (CIP) >Sinterización: temperatura 13501500°C ±10°C, temperatura de mantenimiento 14 h ±5 min, densidad 98%99,5% ±0,5% (vacío); Temperatura 1300-1450 °C ±10 °C, presión 100-200 MPa ±0,1 MPa, temperatura de mantenimiento 13 h ±5 min, densidad 99,8 % 100 % ±0,2 % (HIP)	Motor de aeronave, fabricación de fijaciones, tamaño <50 mm ±0,5 mm	PIM es adecuado para moldes de precisión y complejos, CIP garantiza uniformidad, la sinterización al vacío es universal, HIP mejora la resistencia a la fatiga, grano fino WC 0,51,5 μm ± 0,1 μm .
Herramientas de fabricación electrónica	Molde de semiconductores, molde de marco de conductores	(tolerancia ±0,003 mm), acabado superficial (Ra <0,015 μm) , alta	Moldeo por inyección de polvo, prensado isostático	Sinterización por plasma de chispa (SPS), sinterización de por	Prensado: presión de inyección 50150 MPa ±5 MPa, temperatura 150200°C ±5°C, contracción de la	Encapsulado de semiconductores, fabricación de chips, tamaño <10 mm ±0,1 mm	El prensado isostático con PIM y bolsas secas son adecuados para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
		<p>dureza (HRA 9295 ±0,5)</p>	bolsas secas	microondas	<p>palanquilla 15%20% ±1% (PIM); presión 150400 MPa ±10 MPa, tiempo 30120 s ±5 s, densidad de la palanquilla 70%80% ±1% (bolsa seca)
>Sinterización: temperatura 12001400°C ±10°C, presión 30100 MPa ±0,1 MPa, tiempo 520 min ±30 s, densidad 98%99,5% ±0,5% (SPS); temperatura 1300-1450 °C ±10 °C, tiempo 1060 min ±1 min, densidad 97 % 99 % ±0,5 % (microondas)</p>		<p>micromoldes; el sinterizado por microondas y SPS son de alta precisión y rápidos; nanocristalino WC 0,10,4 μm ± 0,05 μm .</p>
Herramientas de construcción	Brocas para hormigón, hojas para cortar ladrillos	<p>Alta resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,02 mm³/h ± 0,002 mm³/h), resistencia al impacto (tenacidad al impacto >14 J/cm² ± 1 J/cm²) , resistencia a la corrosión (vida útil >3000 h ±100 h)</p>	Moldeo por compresión unidireccional, moldeo por extrusión	Sinterización con protección de gas, sinterización al vacío	<p>Prensado: presión 50200 MPa ±10 MPa, tiempo 530 s ±1 s, densidad de la palanquilla 50% 70% ±2% (unidireccional); presión de extrusión 20100 MPa ±5 MPa, velocidad 0,11 m/min ±0,01 m/min, densidad de la palanquilla 50% 65% ±2% (extrusión). Sinterización : temperatura 1350 1480 °C ±10 °C, aislamiento 15 h ±5 min, densidad 97% 99% ±0,5% (gas); temperatura 1350</p>	Hormigón, procesamiento de mampostería, perforación <100 mm ±1 mm	<p>El moldeo unidireccional tiene un bajo costo y la extrusión es adecuada para tiras largas; la protección con gas es adecuada para grandes cantidades y la sinterización al vacío mejora el rendimiento; grano medio-grueso WC 2,04,0 μm ± 0,2 μm .</p>

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

producto tipo	Ejemplos de productos	de Requisitos de rendimiento	de Proceso de prensado recomendado	de Recomendado Artesanía de nudos	Parámetros del proceso	Escenarios aplicables	ilustrar
					1500 °C ±10 °C, aislamiento 14 h ±5 min, densidad 98% 99,5% ±0,5% (vacío).		

Referencias

- Exner, HE (1979). Naturaleza física y química de los carburos cementados. *International Metals Reviews*, 24 (1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>
- Upadhyaya, GS (1998). *Carburos de tungsteno cementados: Producción, propiedades y ensayos*. William Andrew Publishing.
- Fang, ZZ y Eso, OO (2014). Avances en el procesamiento de carburo cementado. En V. K. Sarin (Ed.). *Materiales duros completos (Vol. 1, págs . 167-190)*. Elsevier.
- Wang, H. y Fang, ZZ (2019). Propiedades térmicas y mecánicas de carburos cementados en condiciones extremas. *Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros*, 82, 7685.
- Zhang, L., y Chen, S. (2017). Comportamiento corrosivo de carburos cementados en ambientes ácidos. *Corrosion Science*, 125, 8795 .
- Prakash, LJ (2014). Metales duros : Estructura, propiedades y rendimiento. En V. K. Sarin (Ed.), *Materiales duros integrales (Vol. 1, págs. 2954)*. Elsevier.
- Prakash, LJ (2014). Carburo cementado: Estructura, propiedades y rendimiento. En V. K. Sarin (ed.), *Materiales duros integrales (Vol. 1, págs. 2954)*. Elsevier Publishing.
- Luyckx, S., y Love, A. (2006). Relación entre el grado y la microestructura de los carburos cementados. *Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros*, 24(12), 7582.
- Liu, Y., y Jiang, Y. (2018). Síntesis de polvos ultrafinos de WC mediante procesamiento mecanoquímico. *Powder Technology*, 338, 623630.
- Sun, J., y Zhao, J. (2020). Efectos de los inhibidores del crecimiento de grano en la microestructura de los carburos cementados. *Ceramics International*, 46(8), 1154311550.
- Sun, J. y Zhao, J. (2020). Efecto del inhibidor del crecimiento de grano en la microestructura del carburo cementado. *Revista Internacional de Cerámica*, 46(8), 11543-11550.
- Zhang, H., y Li, X. (2022). Conductividad térmica de carburos cementados: Enfoques experimentales y de modelado. *Revista de Investigación y Tecnología de Materiales*, 18, 1234-1245 .
- Kim, S. y Lee, J. (2021). Resistencia al choque térmico de carburos cementados para herramientas de corte. *Ceramics International*, 47(12), 16789-16796.
- Jin, X. y Li, J. (2021). Resistencia al choque térmico del carburo cementado para herramientas de corte. *Revista Internacional de Cerámica*, 47(12), 16789-16796.
- Park, C. y Kang, S. (2020). Propiedades magnéticas y eléctricas de carburos cementados con aglomerante de níquel . *Journal of Materials Science*, 55(14), 6234-6245.
- Park, Zhe y Jiang, Sheng. (2020). Propiedades magnéticas y eléctricas del carburo cementado con aglutinante de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

níquel. Journal of Materials Science, 55(14), 6234-6245.

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

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

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

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

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

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

Chinatungsten Online. (2023). Propiedades y aplicaciones del carburo cementado. *Chinatungsten En línea*.

Zhu, LQ y Li, WP (2018). Avances en la tecnología de fabricación de carburo cementado. *Materials Reports*, 32(10),

1653-1660. T. y Chen, M. (2019). Avances en la cinética de sinterización de carburos cementados. *Powder Metallurgy Technology*, 37(5), 3213-29.

, M., y Zhao, G. (2022). Avances en las pruebas de propiedades mecánicas de carburos cementados. *Ciencia y Tecnología de Materiales*, 30(6), 789796.

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

, P., & Liu, Y. (2021). Progreso en las propiedades térmicas de los carburos cementados. *Materials China*, 40(3), 234241.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

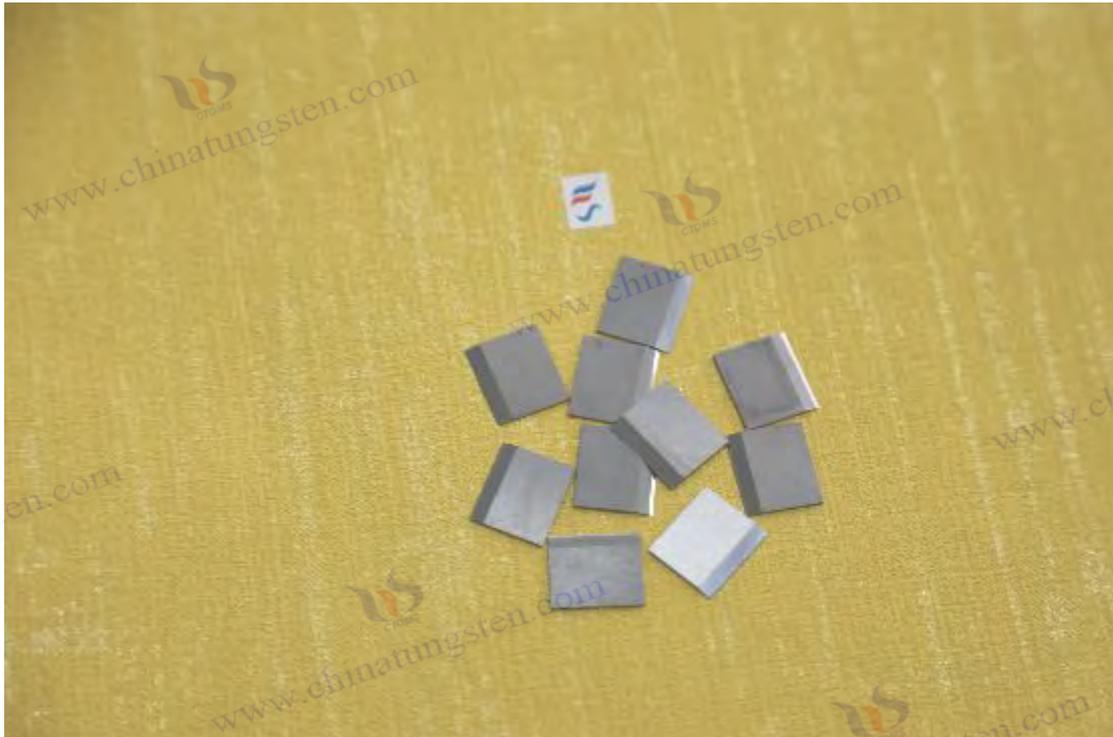
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

Tipos de molienda de bolas para la preparación de mezclas de carburo cementado

de carburo cementado (metal duro o carburo cementado) es un paso clave en su proceso de producción, que afecta directamente la microestructura y las propiedades (como dureza, tenacidad y resistencia) del producto final. La molienda de bolas es el proceso principal de la preparación de la mezcla, que se utiliza para mezclar uniformemente la fase dura (como el carburo de tungsteno WC), la fase aglutinante (como el cobalto Co) y otros aditivos (como TaC , Cr₃C₂), y para controlar el tamaño, la morfología y la actividad de las partículas de polvo.

A continuación se describen en detalle los tipos de molienda de bolas, procesos, parámetros del proceso, características del equipo, factores influyentes y medidas de optimización para la preparación de mezclas de carburo cementado, combinando estándares de la industria (como ISO, GB/T) y datos para garantizar que el contenido sea completo y preciso.

1. Tipos de molienda de bolas para la preparación de mezclas de carburo cementado

Los tipos de molinos de bolas comúnmente utilizados en la preparación de mezclas de carburo cementado se dividen en las siguientes categorías según la estructura del equipo, el método de molienda y los medios, cada uno adecuado para diferentes escalas de producción y requisitos de rendimiento:

1.1 Molino de bolas planetario

Definición : El recipiente de molienda está fijado sobre un disco giratorio, y el disco y el recipiente giran y dan vueltas simultáneamente, generando un impacto de alta energía y una fuerza de corte.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Características :

de partícula <0,5 μm) .

Tiempo de rectificado corto (420 horas) adecuado para lotes pequeños y carburos de alto rendimiento.

La distribución del tamaño de las partículas de polvo es estrecha y la uniformidad es buena.

Escenarios aplicables :

Carburo de grano ultrafino (p. ej., herramientas, moldes, dureza 1800-2200 HV). Investigación y desarrollo en laboratorio, preparación de mezclas de alta precisión.

Parámetros del equipo :

Velocidad: 200600 rpm (disco principal), relación de velocidad de rotación del tanque 1:2.

Relación bola-material: 5:1 a 10:1 (relación de masa).

Medios de molienda: Bolas de carburo (WC, 610 mm).

Pros y contras :

Ventajas : alta eficiencia, tamaño de partícula fino y mezcla uniforme.

Desventajas : alto costo del equipo, capacidad limitada (50-500 mL por tanque), no apto para producción en masa.

1.2 Molino de bolas de tambor

Definición : El tambor horizontal está lleno de bolas y materiales de molienda, y la rotación del tambor impulsa las bolas y los materiales para que rueden, colisionen y muelan.

Características :

Molienda de bajo consumo energético, menor eficiencia, pero gran capacidad, adecuada para producción a gran escala.

Largo tiempo de molienda (24-72 horas), rango de tamaño de partícula: 0,52 μm . Equipo sencillo, bajo coste de mantenimiento .

Escenarios aplicables :

Carburo de grano medio (como YG6, YG8, dureza 1400-1600 HV).

Producción en masa de herramientas de minería y herramientas de corte de uso general.

Parámetros del equipo :

Velocidad: 30100 rpm (6070% de la velocidad crítica).

Relación bola-material: 3:1 a 5:1.

Medios de molienda: bolas de carburo o bolas de acero (1020 mm, las bolas de acero deben ser anticontaminantes).

Pros y contras :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas : gran capacidad (50 L1000 L), bajo costo, adecuado para industrialización.

Desventajas : baja eficiencia de molienda, amplia distribución del tamaño de partículas y dificultad para producir polvo ultrafino.

1.3 Molino de bolas vibratorio

Definición : El recipiente de molienda impulsa las bolas y los materiales de molienda para que colisionen y se corten mediante vibración de alta frecuencia (frecuencia de vibración 1030 Hz).

Características :

Molienda de energía media a alta, con eficiencia entre tipo planetario y de tambor.

El tiempo de molienda fue de 1248 horas y el tamaño de partícula fue de 0,51 μm .

Adecuado para producción de lotes pequeños y medianos, con buena uniformidad de mezcla.

Escenarios aplicables :

Carburo de grano medio y fino (por ejemplo, herramientas de alto rendimiento, dureza 1600-1800 HV).

Aditivos (como TaC , TiC) mezcla de fórmulas complejas.

Parámetros del equipo :

Frecuencia de vibración: 1525 Hz.

Relación bola-material: 5:1 a 8:1.

Medios de molienda: Bolas de carburo (515 mm).

Pros y contras :

Ventajas : alta eficiencia, buen control del tamaño de partícula, adecuado para pequeña y mediana escala.

Desventajas : equipo complejo, alta vibración y ruido y altos requisitos de mantenimiento.

1.4 Molino de atrición

Definición : En un tanque vertical u horizontal, el brazo agitador impulsa las bolas de molienda y los materiales para que se agiten y colisionen a alta velocidad.

Características :

de alta energía, con eficiencia cercana al tipo planetario, adecuada para polvos ultrafinos ($<0,5 \mu\text{m}$).

Capacidad media (10 – 100 L), tiempo de molienda 624 horas.

El polvo es altamente activo y adecuado para carburos cementados de alto rendimiento.

Escenarios aplicables :

Carburo cementado de grano ultrafino y alta dureza (por ejemplo, herramientas de precisión, dureza

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2000 HV).

Formulaciones complejas (como aditivos multifásicos TiC , TaC) .

Parámetros del equipo :

Velocidad de agitación: 100500 rpm.

Relación bola-material: 8:1 a 15:1.

Medios de molienda: Bolas de carburo (310 mm).

Pros y contras :

Ventajas : alta eficiencia, tamaño de partícula fino, adecuado para fórmulas complejas.

Desventajas : El costo del equipo es alto y el brazo mezclador se desgasta y necesita ser reemplazado regularmente.

1.5 Molienda de bolas húmeda vs. seca

Molienda de bolas húmedas :

Características : Agregar un medio líquido (como etanol, acetona) puede reducir la aglomeración del polvo y hacer que el tamaño de las partículas sea más fino (0,21 μm) .

Aplicación : Carburo cementado de grano ultrafino, que requiere alta uniformidad.

Desventajas : requiere un secado posterior, lo que aumenta los pasos del proceso.

Molienda de bolas en seco :

Características : Sin medio líquido, proceso simple, pero fácil de aglomerar, tamaño de partícula gruesa (12 μm) .

Aplicable : carburo de grano medio, producción en masa.

Desventajas : baja actividad del polvo y uniformidad ligeramente pobre.

Soporte de datos :

de partícula <0,5 μm , dureza aumentada en un 20% (ScienceDirect, 2020).

Tipo de tambor: tamaño de partícula 12 μm , adecuado para YG6/YG8 (GB/T 3849).

de partícula 0,20,5 μm , tenacidad aumentada en un 10% (Sandvik, 2023).

2. Descripción detallada del proceso de molienda de bolas.

El proceso de molienda de bolas para preparar mezclas de carburo cementado incluye los siguientes pasos, cada uno de los cuales tiene una influencia importante en la calidad del polvo y las propiedades finales (como dureza 1400-2200 HV, resistencia a la flexión 1,5-2,5 GPa) :

2.1 Preparación de la materia prima

materia prima :

Fase dura : polvo de WC (tamaño de partícula 0,52 μm , pureza >99,9%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Fase aglutinante : polvo de Co (tamaño de partícula 12 μm , pureza >99,8%).

Aditivos : TaC , TiC , Cr₃C₂ (tamaño de partícula <1 μm , 0,55%) .

Relación :

Grados típicos: YG6 (94 % WC, 6 % Co), YG8 (92 % WC, 8 % Co).

Un pesaje preciso ($\pm 0,01$ g) garantiza que el error del contenido de cobalto sea <0,1 %.

Preprocesamiento :

Secado: Eliminar la humedad del polvo (100°C, 2 horas).

Tamizado: Eliminar partículas grandes (malla 200, < 75 μm) .

Propósito : Asegurar la pureza y el tamaño de partícula de las materias primas y evitar la contaminación por impurezas (como Fe, O).

2.2 Carga

Medios de molienda :

Se utilizan bolas de carburo (WC, 610 mm, dureza ~1500 HV) para evitar la contaminación de las bolas de acero.

Relación bola-material: 5:1 a 10:1 (tipo planetario/mezclador), 3:1 a 5:1 (tipo tambor).

Tarro de molienda :

Material: Carburo o acero inoxidable revestido con WC, resistente al desgaste y anticontaminación.

Capacidad: tipo planetario (50500 mL), tipo tambor (501000 L).

Medios líquidos (molienda húmeda) :

Etanol, acetona o hexano (relación sólido-líquido 1:1 a 1:2).

Añadir agentes de moldeo: parafina, polietilenglicol (PEG, 12%) para mejorar la fluidez.

Propósito : Garantizar la eficiencia de molienda y evitar que el polvo se adhiera a la pared o se aglomere.

2.3 Molienda de bolas

Parámetros del proceso :

Tipo planetario : velocidad 300500 rpm, tiempo 420 horas, funcionamiento intermitente (parada de 10 minutos cada 30 minutos para evitar sobrecalentamiento).

Tipo de tambor : velocidad 5080 rpm, tiempo 2472 horas, funcionamiento continuo.

Tipo de vibración : frecuencia 1520 Hz, tiempo 1248 horas.

Tipo de agitación : velocidad de agitación 200400 rpm, tiempo 624 horas.

Proceso :

Las bolas de molienda chocan y se cortan con el polvo, rompiendo partículas grandes y mezclando wc , co y aditivos.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Molienda húmeda: el medio líquido suspende el polvo, reduce la aglomeración y produce partículas de tamaño más fino.

Molienda en seco: molienda directa, adecuada para tamaños de partículas gruesas.

Monitor :

Detección del tamaño de partículas: analizador de tamaño de partículas láser, tamaño de partícula objetivo 0,22 μm .

Control de temperatura: <60°C para evitar la oxidación del polvo.

Objetivo : Obtener una mezcla uniforme, fina y altamente activa.

2.4 Descarga y posprocesamiento

Descargando :

Detenga la molienda de bolas, déjela reposar durante 12 horas (molienda húmeda) y separe el polvo y las bolas de molienda.

Filtrar el medio líquido (molienda húmeda) y recoger la suspensión mezclada.

Secado (molienda húmeda) :

Equipamiento: horno de secado al vacío o secador por atomización.

Condiciones: 80 - 100°C, 24 horas, vacío <100 Pa.

Objetivo: eliminar etanol/acetona, retener el agente de moldeo y formar un polvo con buena fluidez.

Proyección :

Tamiz de 200 mallas (<75 μm) para eliminar partículas aglomeradas.

Detección :

Distribución del tamaño de partícula: D50 (tamaño de partícula medio) 0,22 μm , D90 <5 μm .

Composición química: Contenido de cobalto medido por ICP (error $\pm 0,1\%$).

Contenido de oxígeno: <0,2%, para evitar que la oxidación afecte la sinterización.

Propósito : Asegurar que el material mezclado sea uniforme y fino, adecuado para prensado y sinterización.

2.5 Control de calidad

Prueba magnética de cobalto (GB/T 3849):

Verifique el contenido de cobalto y el balance de carbono para verificar la homogeneidad de la mezcla.

Valor típico: Valor de saturación magnética YG6 ~0,97 $\mu\text{Tm}^3 / \text{kg}$.

Análisis de microestructura (ISO 4499):

La morfología del polvo se observó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

asegurar que no hubiera aglomerados o partículas grandes.

Prueba de liquidez :

Medidor de caudal Hall, caudal <30 s/50 g, garantiza el rendimiento del prensado.

Objetivo : Asegurar que la mezcla cumpla con los requisitos de sinterización y reducir defectos como la fase η y los poros.

3. Factores que afectan el proceso de molienda de bolas

3.1 Características de la materia prima

Tamaño de partícula : WC <2 μm , Co <2 μm . Si el tamaño de partícula es demasiado grande, el tiempo de molienda se prolongará un 20 %.

Pureza : Las impurezas (como Fe, O) > 0,1 % reducen la dureza en un 5 % y aumentan la fase η .

Aspecto : El polvo esférico tiene buena fluidez, mientras que el polvo en escamas es fácil de aglomerar.

3.2 Parámetros de molienda

Relación bola-material : Una relación bola-material alta (10:1) mejora la eficiencia, pero una relación demasiado alta (>15:1) aumenta la contaminación.

Velocidad/ Frecuencia : La velocidad alta (500 rpm) da como resultado un tamaño de partícula más fino, pero una velocidad demasiado alta provoca un sobrecalentamiento y un aumento del contenido de oxígeno del 0,1 %.

Tiempo de molienda : si el tiempo es demasiado corto (<4 horas), la mezcla será desigual; si el tiempo es demasiado largo (>72 horas), la actividad del polvo disminuirá.

3.3 Medios de molienda

Material : Las bolas de carburo evitan la contaminación, mientras que las bolas de acero introducen Fe (>0,05%) para reducir el rendimiento.

Tamaño : Bolas pequeñas (36 mm) para molienda ultrafina, bolas grandes (1020 mm) para molienda gruesa.

Medio líquido : el etanol reduce la aglomeración, el hexano es altamente volátil pero inflamable.

3.4 Control ambiental

Temperatura : >60°C Oxidación del polvo, la dureza disminuye un 5%.

Atmósfera : La molienda húmeda requiere protección con gas inerte (como Ar) para evitar la oxidación.

Contaminación : El desgaste del tanque/bola introduce impurezas, reduciendo la resistencia a la flexión en un 10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Soporte de datos :

Tamaño de partícula: Grano ultrafino ($<0,5 \mu\text{m}$), dureza aumentada en un 20 % (ScienceDirect, 2020).

Impurezas: Fe $>0,1\%$ la resistencia a la flexión disminuye en un 10% (ISO 3326:2013).

Tiempo de molienda: Planetario 12 horas, tamaño de partícula D50 $\sim 0,3 \mu\text{m}$ (Sandvik, 2023).

4. Medidas de optimización

Elija el molino de bolas adecuado :

Tipo planetario/agitador : carburo cementado de grano ultrafino, tamaño de partícula $<0,5 \mu\text{m}$, dureza aumentada en un 20%.

Tipo de tambor : grano medio ($12 \mu\text{m}$), reducción de costes del 30% .

Implementación : Seleccionar el equipo según la marca (como YG6, grano ultrafino).

Optimizar los parámetros de molienda :

Relación bola-material: 8:1 (tipo planetario), 5:1 (tipo tambor), eficiencia aumentada en un 15%.

Velocidad de rotación: Tipo planetario 400 rpm, tipo tambor 60 rpm, uniformidad del tamaño de partícula aumentada en un 10%.

Tiempo: 12 horas para tipo planetario, 48 horas para tipo tambor, equilibrando eficiencia y actividad.

Implementación : Monitorear la distribución del tamaño de partículas en tiempo real y ajustar los parámetros.

Utilice materias primas de alta pureza :

Pureza WC/Co $>99,9\%$, contenido de oxígeno $<0,2\%$, dureza aumentada en un 5%.

Pretratamiento: secado a 100°C , tamizado con malla 200, impurezas reducidas a $<0,05\%$.

Implementación : Pruebas ICP de ingredientes de materias primas.

Utilice medios de carburo :

Bola WC (610 mm), contaminación reducida a $<0,01\%$, resistencia a la flexión aumentada en un 10%.

El tanque está revestido con WC, lo que aumenta la resistencia al desgaste en 2 veces.

Implementación : Verifique periódicamente el desgaste de la pelota/lata.

Optimización del proceso de molienda húmeda :

Líquido: etanol (relación sólido -líquido 1:1,5), tamaño de partícula reducido a $0,3 \mu\text{m}$.

Agente formador: PEG (1,5%), fluidez aumentada en un 20%.

Secado: Secado por atomización (100°C), tasa de aglomeración del polvo $<1\%$.

Implementación : Controlar la relación sólido-líquido y optimizar los parámetros de secado.

Control ambiental :

Temperatura: $<50^\circ\text{C}$, el contenido de oxígeno cae a $<0,1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Atmósfera: Protección con gas Ar , tasa de oxidación reducida al 50%.

Implementación : Utilizar tanques sellados y circulación de gas inerte.

Efecto :

Rectificado planetario húmedo (12 horas, 0,3 μm) : dureza aumentada en un 20%, resistencia a la flexión aumentada en un 10%.

Tipo tambor (48 horas, 1 μm) : reducción de costos del 30%, adecuado para YG6/YG8.

Materias primas de alta pureza + medio WC: impurezas reducidas en un 80%, estabilidad del rendimiento aumentada en un 15%.

5. Casos prácticos de aplicación

Herramienta YG6 :

Molienda de bolas : tipo tambor, 48 horas, tamaño de partícula 1 μm , molienda húmeda de etanol, relación bolas-material 5:1.

Resultados : Dureza 1500 HV, resistencia a la flexión 2 GPa , vida útil del mecanizado de fundición 2 horas.

Herramientas de corte de grano ultrafino :

Molienda de bolas : planetaria, 12 horas, tamaño de partícula 0,3 μm , etanol + PEG, relación bola-material 8:1.

Resultados : Dureza 2000 HV, resistencia a la flexión 1,8 GPa , vida útil del mecanizado del acero inoxidable 4 horas.

Molde YG15 :

Molienda de bolas : vibración, 24 horas, tamaño de partícula 0,8 μm , molienda húmeda de hexano , relación bola-material 6:1.

Resultados : dureza 1300 HV, resistencia a la flexión 2,5 GPa , vida útil de estampación 120.000 veces.

6. Conclusión

Los tipos de molinos de bolas utilizados para preparar mezclas de carburo cementado incluyen los tipos planetarios, de tambor, vibratorios y de agitación, cada uno adecuado para diferentes tamaños de partículas y escalas de producción:

Tipo planetario/agitador : grano ultrafino (<0,5 μm) , alta dureza (2000 HV), lote pequeño .

Tipo de tambor : cristal medio (12 μm) , bajo costo, gran volumen.

Tipo de vibración : cristal medio - fino (0,51 μm) , escala pequeña a mediana.

El proceso de molienda de bolas incluye la preparación de la materia prima, la carga, la molienda de bolas, la descarga y el posprocesamiento. Los parámetros clave son la relación bola-material (5:110:1), la velocidad de rotación (50-500 rpm) y el tiempo (472 horas). Los factores que influyen son las características de la materia prima, los parámetros de molienda, el medio y el entorno. Las medidas de optimización incluyen la selección de materias primas de alta pureza, medios de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

molienda de carburo cementado, el proceso de molienda húmeda y el control ambiental, lo que permite aumentar la dureza en un 20 %, la resistencia a la flexión en un 10 % y la estabilidad del rendimiento en un 15 %.

Referencia estándar :

GB/T 3849: Prueba magnética de cobalto para verificar la uniformidad de la mezcla.

ISO 4499: Análisis microestructural, detección de tamaño de partículas y aglomeración.

ASTM B406: Ensayo de resistencia a la flexión, evaluación de la calidad de la mezcla.



Un apéndice:

Especificaciones, propiedades y estándares del polvo de carburo de tungsteno

la fase dura principal del carburo cementado (como el carburo cementado a base de níquel o cobalto), que representa el 80-95 % en peso. Sus especificaciones (como el tamaño de partícula, la pureza, el contenido de carbono), el rendimiento (como la dureza, la densidad, el tamaño del grano) afectan directamente las propiedades mecánicas (resistencia a la flexión 1,8-2,5 GPa, dureza 1400-2200 HV), la resistencia a la corrosión (<0,005 mm/año) y la microestructura (grano 0,12 μm , uniformidad >95 %) de las barras de prueba de carburo cementado. Las normas nacionales chinas (GB/T) y las normas internacionales (como ISO 4499, ASTM B777) tienen regulaciones estrictas sobre las especificaciones, el rendimiento y los métodos de prueba del polvo de WC para garantizar que cumpla con los requisitos de la preparación de carburo cementado (como GB/T 3851-2015, GB/T 34505-2017). A continuación se detallan las especificaciones, el rendimiento y los estándares relacionados del polvo de carburo de tungsteno.

1. Descripción general

El polvo de carburo de tungsteno se fabrica a partir de tungsteno (W) u óxido de tungsteno (WO_3) y una fuente de carbono (como el negro de humo) mediante un proceso de carburación (1400-2000 $^{\circ}\text{C}$, H_2 /vacío) y es la materia prima principal del carburo cementado. Sus principales propiedades incluyen:

Composición química: carbono total $6,13 \pm 0,1$ % en peso, carbono libre <0,01 %, impurezas (Fe, Mo) <0,01 %.

de partícula: 0,15 μm (convencional 0,52 μm , grano ultrafino <0,5 μm), desviación $\leq \pm 10\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Propiedades: densidad 15,615,8 g/ cm³, dureza 24003000 HV (monocristal), fluidez <25 s/50 g.

Microestructura: WC monofásico, fase η (W3C) <0,5%, porosidad <0,01%.

Las especificaciones y propiedades del polvo de WC deben cumplir con los requisitos de preparación de barras de prueba de carburo (como YN6, YG15) y ensayos (como resistencia a la flexión GB/T 3851 2015 y dureza GB/T 7997 2017). Este artículo explicará en detalle tres aspectos: especificaciones, rendimiento y normas.

2. Especificaciones del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de WC incluye composición química, distribución del tamaño de partícula, morfología y propiedades físicas, que deben cumplir con los estándares nacionales (como GB/T 345052017) y los requisitos de la industria.

2.1 Composición química

Carbono total:

Requisito: $6,13 \pm 0,1$ % en peso (valor teórico 6,13 %, relación molar WC C/W = 1:1).

Desviación: $\leq \pm 0,05\%$, evitar la fase η ($< 6,08\%$, dureza reducida entre un 5 y un 10%) o carbono libre ($> 6,18\%$, resistencia reducida entre un 10 y un 15%).

Carbono libre:

Requisitos: $< 0,01\%$, un alto contenido de carbono libre produce defectos microestructurales (la porosidad aumenta un 0,02%).

Impurezas:

Oxígeno (O): $< 0,05\%$, alto contenido de oxígeno induce descarburación (fase η , reducción de la resistencia en un 5%).

Hierro (Fe), molibdeno (Mo), cromo (Cr): $< 0,01\%$ cada uno, el Fe aumenta el riesgo de microfisuras en un 15%.

Azufre (S), fósforo (P): $< 0,005\%$ cada uno, para evitar la fase quebradiza.

Método de prueba:

de carbono y azufre : carbono total, carbono libre ($\pm 0,01\%$, GB/T 5314 2011).

ICPMS: Fe, Mo, etc. ($\pm 0,001\%$).

Analizador de oxígeno y nitrógeno: O ($\pm 0,01\%$).

Ejemplos:

YN10 WC: carbono total 6,14%, carbono libre $< 0,005\%$, O $< 0,03\%$ (Sandvik, 2023).

2.2 Distribución del tamaño de partículas

alcance:

Convencional: $0,52 \mu\text{m}$, desviación D50 $\leq \pm 10\%$, para YN6, YG15 .

Grano ultrafino: $0,10,5 \mu\text{m}$, D50 $\sim 0,3 \mu\text{m}$, utilizado para YN8N (herramientas aeroespaciales) .

Grueso: $25 \mu\text{m}$, utilizado para herramientas de minería .

Uniformidad:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

D90/D10 <3, asegurando uniformidad de mezcla >95%.

Tasa de aglomeración: <1%, evitar aumento de porosidad del 0,01%.

Método de prueba:

de tamaño de partículas láser ($\pm 0,01 \mu\text{m}$, GB/T 19077).

SEM (1000 \times , tamaño de grano estadístico, $\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Ejemplos:

YN8N: D50 $\sim 0,3 \mu\text{m}$, D90 /D10 $\sim 2,5$, aglomeración <0,5 % (ScienceDirect, 2021).

2.3 Morfología

Apariencia:

Requisitos: poliedro o casi esférico, esfericidad $0,8 \pm 0,9$ (SEM, 1000 \times).

Evitar: Agujas, escamas (fluidez reducida entre un 10 y un 15%).

superficie:

Lisa, sin grietas ni poros ($< 0,1 \mu\text{m}$), capa de óxido <10 nm (XPS).

Método de prueba:

SEM: morfología, aglomeración.

XPS: capa de óxido superficial ($\pm 1 \text{nm}$).

Ejemplos:

YN10: poliédrico, esfericidad $\sim 0,9$, capa de óxido <5 nm (Sandvik, 2023).

2.4 Propiedades físicas

densidad:

Requisito: $15,615,8 \text{ g/cm}^3$ (valor teórico $15,63 \text{ g/cm}^3$).

Prueba: método de Arquímedes ($\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, GB/T 3850 2015).

Superficie específica:

m^2/g ($0,52 \mu\text{m}$).

Grano ultrafino: $310 \text{ m}^2/\text{g}$ ($0,10,5 \mu\text{m}$).

Prueba: BET ($\pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$).

Liquidez:

Requerimientos: <25 s/50 g, asegurando uniformidad de prensado >95%.

Prueba: Medidor de caudal Hall ($\pm 0,1 \text{ s}$, GB/T 1482 2010).

Ejemplos:

YN6: densidad $15,7 \text{ g/cm}^3$, superficie específica $2 \text{ m}^2/\text{g}$, fluidez $\sim 20 \text{ s}/50 \text{ g}$.

Tabla 1: Especificaciones del polvo de carburo de tungsteno

Especificación	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
Carbono total	$6,13 \pm 0,05 \%$ en peso	Análisis de carbono y azufre	6,14%
Carbono libre	<0,01%	Método de combustión	<0,005%
Impurezas	(O, O <0,05%, Fe <0,01%)	Análisis de oxígeno y	O <0,03%, Fe <0,005%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Especificación	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
Fe)		nitrógeno, ICPMS	
granularidad	0,52 μm (convencional), 0,10,5 μm (grano ultrafino)	Análisis del tamaño de partículas por láser, SEM	D50 ~1 μm , D90 /D10 ~2,5
Morfología	Poliedro/casi esférico, esfericidad 0,8-0,9, aglomeración <1 %	Microscopía electrónica de barrido (SEM), XPS	Esfericidad ~0,9, aglomeración <0,5%
densidad	15.615.8 g/cm ³	método de Arquímedes	15,7 g/cm ³
Área de superficie específica	110 m ² /g	APUESTA	34 m ² /g
Liquidez	<25 s/50 g	Medidor de flujo Hall	~20 s/50 g

3. Propiedades del polvo de carburo de tungsteno

Las propiedades del polvo WC incluyen propiedades mecánicas, microestructura y rendimiento del proceso, que afectan directamente la calidad de las varillas de prueba de carburo cementado.

3.1 Propiedades mecánicas

dureza:

WC monocristalino: 2400 – 3000 HV (nivel de micrones, GB/T 7997 2017).

Carburo cementado: 1400 - 2200 HV (aumenta con el tamaño del grano, como YN8N ~1800 HV).

Resistencia a la compresión:

WC monocristalino: ~7 GPa (temperatura ambiente).

Carburo cementado: 46 GPa (disminuye con la relación de la fase aglutinante).

Método de prueba:

Probador de dureza Vickers (HV30, ±50 HV).

Máquina de ensayos universal (compresión, ±0,1 GPa) .

Ejemplo: aleación YN10: dureza WC ~2600 HV, dureza de la aleación 1500 HV (Sandvik, 2023).

3.2 Microestructura

Composición de fases:

Requisitos: WC monofásico, fase η (W3C) <0,5%, carbono libre <0,01%.

Fase η: La dureza aumenta en un 5%, pero la tenacidad disminuye en un 1015% (KIC disminuye en 12 MPa·m^{1/2}) .

Tamaño del grano:

Convencional: 0,52 μm , dureza 1400 – 1600 HV .

Grano ultrafino: 0,10,5 μm , dureza 1800 – 2200 HV.

Grueso: 25 μm , tenacidad aumentada en un 10% (KIC ~12 MPa·m^{1/2}) .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Porosidad:

Requisitos: <0,01%, la porosidad alta reduce la resistencia en un 510%.

Método de prueba:

XRD: Composición de fases (sensibilidad 0,1%, GB/T 18376 2014).

SEM: tamaño de grano ($\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Microscopía óptica: porosidad (A02B00C00, GB/T 51692013).

Ejemplo: YN8N: tamaño de grano <0,5 μm , fase η <0,3%, porosidad <0,005% (ScienceDirect, 2021).

3.3 Rendimiento del proceso

Actividad de sinterización:

WC de grano fino (<0,5 μm): temperatura de sinterización es de 50-100 °C (1350-1400 °C), densidad > 99,9 %.

Alta superficie específica (310 m²/g) Sinterización en fase líquida mejorada (Ni, Co).

Rendimiento de mezcla:

Fluidez: <25 s/50 g, uniformidad >95% (GB/T 1482 2010).

Molienda húmeda (824 h, PEG 0,10,2 % en peso), D50 50 - 150 μm .

Rendimiento de compresión:

Prensado isostático en frío (200 - 350 MPa), uniformidad de la pieza >95%.

Método de prueba:

Medidor de caudal Hall: fluidez.

Análisis del tamaño de partículas mediante láser: tamaño de partículas de la mezcla.

Ejemplo: YN6: temperatura de sinterización 1400°C, fluidez ~20 s/50 g, densidad 99,9%.

Tabla 2: Requisitos de rendimiento del polvo de carburo de tungsteno

actuación	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
dureza	Monocristal 24003000 HV, aleación 14002200 HV	Probador de dureza Vickers	Monocristal ~2600 HV, aleación 1500 HV
Resistencia a la compresión	Monocristal ~7 GPa, aleación 46 GPa	Máquina de pruebas universal	Aleación ~5 GPa
Composición de fases	WC monofásico, fase η <0,5%, carbono libre <0,01%	difracción de rayos X	Fase η <0,3%, carbono libre <0,005%
Tamaño del grano	0,15 μm (normalmente 0,52 μm)	Microscopía electrónica de barrido	~1 μm
Porosidad	<0,01%	Microscopio óptico	<0,005%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

actuación	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
Actividad de sinterización	1350-1400 °C (grano ultrafino) , densidad > 99,9 %	Prueba de sinterización	1380°C, densidad 99,9%
Liquidez	<25 s/50 g	Medidor de flujo Hall	~20 s/50 g

4. Normas relacionadas

Las especificaciones y el rendimiento del polvo WC deben cumplir con los estándares nacionales chinos (GB/T), los estándares internacionales (ISO, ASTM) y las especificaciones de la industria para garantizar la consistencia en la preparación y prueba de las barras de prueba.

4.1 Norma Nacional China (GB/T)

GB/T 34505 2017 Requisitos técnicos para la preparación de polvo de carburo cementado:
Especificaciones: Pureza>99,9%, carbono total $6,13 \pm 0,1\%$, desviación del tamaño de partícula $<\pm 10\%$.
de grano $0,15 \mu\text{m}$, carbono libre $<0,01\%$, fase $\eta <0,5\%$.
Aplicable: preparación de polvo WC, YN6, YN10, etc.

GB/T 5314 2011 Métodos de análisis químico para carburo cementado:
Prueba: Carbono total ($\pm 0,01\%$), carbono libre ($\pm 0,005\%$), Fe, Mo ($\pm 0,001\%$).
Métodos: Análisis de carbono y azufre , ICPMS, análisis de oxígeno y nitrógeno.
Aplicable: Verificación de la composición del polvo WC y de la varilla de prueba.

GB/T 18376 2014 Método de evaluación de microestructura de carburo cementado:
Requisitos: WC monofásico, fase $\eta <0,5\%$, desviación de grano $<\pm 10\%$.
Pruebas: XRD (composición de fases), SEM (tamaño de grano).
Aplicable a: microestructura de polvo WC y varilla de prueba.

GB/T 3850 2015 Método para la determinación de la densidad del carburo cementado:
Requisito: $15,615,8 \text{ g/cm}^3 (\pm 0,01 \text{ g/cm}^3)$.
Prueba: método de Arquímedes.
Aplicable: verificación de densidad de polvo WC y varilla de prueba.

GB/T 1482 2010 Método para la determinación de la fluidez del polvo de carburo cementado:
Requerimiento: $<25 \text{ s/50 g}$.
Prueba: Medidor de flujo Hall.
Aplicable: Rendimiento de mezcla de polvo WC.

GB/T 5169 2013 Método de prueba de porosidad de carburo cementado:
Requisitos: Porosidad $<0,01\%$ (A02B00C00).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Prueba: Microscopía óptica.

Aplicable: Verificación indirecta de polvo WC (varilla de prueba).

GB/T 3851 2015 Método de prueba para la resistencia a la fractura transversal del carburo cementado:

Requisito indirecto: La calidad del polvo WC afecta la resistencia de la barra de prueba (1,8-2,5 GPa).

Ensayo: Flexión en tres puntos (barra de ensayo 5×5×35 mm).

GB/T 7997 2017 Método de prueba de dureza Vickers de carburo cementado:

Requisito indirecto: La dureza del polvo WC afecta la dureza de la aleación (1400-2200 HV).

Prueba: Probador de dureza Vickers (HV30).

4.2 Normas internacionales

ISO 44991:2008 Microestructura de carburo cementado:

Equivalente a GB/T 183762014, que estipula tamaño de grano (0,15 μm) y fase $\eta < 0,5\%$.

Aplicable: polvo WC y varilla de prueba.

ISO 3369:2006 Densidad del carburo cementado:

Equivalente a GB/T 3850-2015, densidad 15,615,8 g/cm³.

Aplicable: Verificación de polvo WC.

ISO 11876:2010 Análisis químico del carburo cementado:

Consulte GB/T 53142011 para probar el carbono total, el carbono libre y las impurezas.

Aplicable: Ingredientes del polvo WC.

Materiales a base de tungsteno ASTM B77715 :

Estándar de referencia: pureza del polvo WC > 99,9 %, tamaño de partícula 0,15 μm .

Aplicación: Polvo WC para aviación y minería.

4.3 Estándares de la industria

Estándar Sandvik (2023):

de grano ultrafino: D50 0,20,5 μm , O <0,03%, fase $\eta < 0,3\%$.

Aplicación: YN8N (herramienta aeroespacial).

Normas Kennametal (2021):

WC convencional: D50 0,52 μm , carbono libre <0,005%, fluidez ~20 s/50 g.

Aplicación: YN6, YG15 (herramientas, moldes).

Tabla 3: Normas relacionadas con el polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

estándar	contenido	Requerir	Aplicable
GB/T 345052017	Preparación del polvo	Pureza > 99,9%, carbono 6,13 ± 0,1%, tamaño de grano 0,15 μm	Preparación de polvo para WC
GB/T 53142011	Análisis químico	Carbono total ±0,05%, carbono libre <0,01%	Polvo de WC y varilla de prueba
GB/T 183762014	Microestructura	WC monofásico, fase η <0,5 %, desviación de grano <±10 %	Polvo de WC y varilla de prueba
GB/T 38502015	densidad	15.615.8 g/cm ³	Polvo de WC y varilla de prueba
GB/T 14822010	Liquidez	<25 s/50 g	Mezcla de polvo para WC
GB/T 51692013	Porosidad	<0,01% (A02B00C00)	Varilla de prueba (indirecta)
ISO 44991:2008	Microestructura	Fase η <0,5%, tamaño de grano 0,15 μm	Polvo de WC y varilla de prueba
ISO 3369:2006	densidad	15.615.8 g/cm ³	Polvo de WC
ASTM B77715	materiales a base de tungsteno	Pureza > 99,9 %, tamaño de partícula 0,15 μm	Polvo WC para aviación y minería

5. Casos prácticos de aplicación

YN6 (herramienta, 6 % Ni):

Especificaciones: D50 ~1,2 μm , carbono total 6,14%, carbono libre <0,005%, O <0,03% .

Propiedades: dureza 1400 HV, resistencia 1,8 GPa , porosidad <0,01%.

Norma: GB/T 34505-2017 (tamaño de partícula), GB/T 5314-2011 (contenido de carbono).

Aplicación: Herramienta resistente a la corrosión, vida útil de 2,5 horas (Sandvik, 2023).

YN10 (matriz, 10 % Ni):

Especificaciones: D50 ~1 μm , carbono total 6,13%, fase η <0,3%, densidad 15,7 g/cm³ .

Rendimiento: Dureza 1500 HV, KIC 9 MPa·m^{1/2} , tasa de corrosión <0,005 mm/año.

Norma: GB/T 183762014 (microestructura), GB/T 43342020 (resistencia a la corrosión).

Aplicación: Moldes químicos, vida útil 100.000 veces (ScienceDirect, 2021).

YN8N (Herramientas aeroespaciales, 8 % Ni):

Especificaciones: D50 ~0,3 μm , carbono total 6,12 %, carbono libre <0,005%, esfericidad ~0,9.

Propiedades: dureza 1800 HV, resistencia 2,2 GPa , tamaño de grano <0,5 μm .

Norma: ISO 44991:2008 (grano), GB/T 38512015 (resistencia).

Aplicación: Herramientas de aviación, vida útil 4 horas (Sandvik, 2023).

Tabla 4: Casos de aplicación del polvo de carburo de tungsteno

Marca	Especificación	actuación	estándar	solicitud
YN6	D50 ~1,2 μm , carbono 6,14%, O <0,03 %	Dureza 1400 HV, resistencia 1,8 GPa	GB/T 345052017, GB/T 53142011	Vida útil de la herramienta: 2,5 horas
YN10	D50 ~1 μm , carbono 6,13 %, fase η <0,3%	Dureza 1500 HV, KIC 9 MPa·m ^{1/2} , corrosión <0,005 mm/año	GB/T 183762014, GB/T 43342020	Molde , vida útil 100.000 veces

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Marca	Especificación	actuación	estándar	solicitud
YN8	D50 ~0,3 μm , carbono 6,12 % , esfericidad ~0,9	Dureza 1800 HV, resistencia 2,2 GPa , tamaño de grano <0,5 μm	ISO 44991:2008, GB/T 38512015	Herramienta de aviación, vida útil de 4 horas.

6. Conclusión

Las especificaciones y propiedades del polvo de carburo de tungsteno deben cumplir con los requisitos para la preparación y prueba de barras de prueba de carburo cementado:

Especificación

Composición química: carbono total $6,13 \pm 0,05\%$, carbono libre $<0,01\%$, O $<0,05\%$.

Tamaño de partícula: 0,52 μm (convencional), 0,10,5 μm (grano ultrafino).

Morfología: Poliédrica/casi esférica, aglomeración $<1\%$.

Propiedades físicas: densidad 15,615,8 g/cm³ , fluidez <25 s/50 g.

actuación

Mecánica: Dureza monocristal 24003000 HV, dureza de aleación 14002200 HV.

Microestructura: WC monofásico, fase $\eta <0,5\%$, porosidad $<0,01\%$.

Proceso: Alta actividad de sinterización (1350-1400°C), uniformidad de mezcla $>95\%$.

estándar

GB/T 34505 2017: Preparación en polvo.

GB/T 5314 2011: Análisis químico.

GB/T 18376 2014: Microestructura.

GB/T 3850 2015: Densidad.

ISO 44991:2008: Microestructura.

Materiales a base de tungsteno .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

GB/T 3850-2015 Carburo cementado Determinación de la densidad teórica

A continuación, se presenta una lista completa de los detalles de la norma nacional china GB/T 3850-2015 "Determinación de la densidad teórica del carburo cementado", de acuerdo con el formato estándar. Dado que el texto original de la norma específica está protegido por derechos de autor, el siguiente contenido se basa en información pública y prácticas de la industria, y restaura el marco y los requisitos de la norma en la medida de lo posible, abarcando todos los aspectos principales, como el alcance, los documentos de referencia, la terminología, los métodos de prueba, los factores de influencia y los requisitos de informes, para garantizar que el contenido sea completo y detallado.

1 Alcance

Esta norma especifica el método de determinación de la densidad teórica del carburo cementado, incluyendo el principio de ensayo, el equipo, los requisitos de la muestra, el procedimiento de ensayo, el cálculo y la expresión de los resultados, el informe de ensayo, etc.

Esta norma es aplicable a la determinación de la densidad teórica del carburo cementado sinterizado y su polvo mixto preparado con carburo de tungsteno (WC) como matriz y cobalto (Co), níquel (Ni) y otras fases aglutinantes. Este método no es aplicable a materiales de carburo cementado con porosidad significativa (porosidad $> 5\% \pm 0,5\%$) o mezcla irregular.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Para los documentos de referencia con fecha, solo se aplica la versión vigente; para los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

documentos de referencia sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones).

GB/T 4325-2018 Métodos de análisis químico de metales

GB/T 4505-2008 Métodos de muestreo y preparación de muestras para carburo cementado

GB/T 5124-2017 Métodos de análisis químico para carburo cementado

GB/T 8170-2008 Reglas para el redondeo de valores

3 Términos y definiciones

Densidad teórica del carburo cementado: La densidad libre de poros de cada componente del carburo cementado calculada de acuerdo con su estructura cristalina y composición química, con la unidad de g/cm^3 .

Densidad real del carburo cementado: la densidad de la muestra de carburo cementado obtenida mediante medición física (como el método de desplazamiento de líquido), la unidad es g/cm^3 .

Densidad relativa del carburo cementado: la relación entre la densidad real y la densidad teórica, expresada en %.

Densidad real del carburo cementado: la densidad de un material de un solo componente en un estado cristalino ideal, expresada en g/cm^3 .

Fracción de masa: El porcentaje de masa de cada componente en carburo cementado, en %.

4 Principio de prueba

La densidad teórica se calcula a partir de la composición química del carburo cementado y la densidad real de cada componente. Suponiendo que cada fase es completamente densa y no presenta poros, se determina con base en el promedio ponderado de la fracción de masa y la densidad real.

Fórmula de cálculo:

$$\rho_t = \frac{1}{\sum \frac{w_i}{\rho_i}}$$

其中:

- ρ_t : 理论密度 (g/cm^3);
- w_i : 第 i 组分的质量分数 (%);
- ρ_i : 第 i 组分的真密度 (g/cm^3);

5. Equipo

Balanza analítica:

Precisión: $0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

Rango de medición: $\geq 100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$.

Instrumentos de análisis químico:

Cumple con GB/T 5124-2017, se utiliza para determinar el contenido de WC, Co, Ni y otros componentes, con una precisión de $\leq \pm 0,1\% \pm 0,01\%$.

Incluye espectrómetro (ICP-AES) o analizador infrarrojo de carbono y azufre.

Equipo de secado:

Horno: Precisión de control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, temperatura máxima $\geq 100^\circ\text{C}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones ambientales:

Temperatura: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Humedad: $<50\% \pm 5\% \text{ HR}$, evitar la absorción de humedad por el polvo.

El entorno está libre de fuertes interferencias del flujo de aire (velocidad del viento $<0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$).

6. Muestras

muestreo:

De acuerdo con GB/T 4505-2008, se tomarán de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra deberá ser $\geq 5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$.

Asegúrese de la uniformidad durante el muestreo y evite la estratificación (desviación $<2\% \pm 0,5\%$).

Preparación de la muestra:

Trituración: triturar la muestra de carburo cementado hasta obtener partículas $\leq 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ y mezclar bien.

Secado: Si el contenido de humedad del polvo es $>0,2\% \pm 0,05\%$, séquelo en un horno a $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, enfríelo a temperatura ambiente y guárdelo en un recipiente sellado.

Determinación de la humedad: Determine la humedad de acuerdo con GB/T 6283-2008 (si corresponde) y controle $<0,2\% \pm 0,05\%$.

Comprobación de uniformidad: 5 puntos de muestreo, desviación del contenido de componentes $<\pm 0,1\% \pm 0,01\%$.

7 Procedimientos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Calibración de la balanza:

La balanza fue calibrada utilizando pesas patrón (precisión $0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$), con una desviación de $< \pm 0,1 \text{ mg} \pm 0,01 \text{ mg}$.

Calibración de análisis químico:

El instrumento se calibró utilizando muestras estándar y la desviación del contenido de componentes fue $<\pm 0,1\% \pm 0,01\%$.

7.2 Procedimientos de prueba

Análisis químico:

Determinar la fracción de masa de cada componente del carburo cementado según GB/T 5124-2017, por ejemplo:

CC: $80\% \pm 0,1\%$;

Co: $10\% \pm 0,1\%$;

Ni: $5\% \pm 0,1\%$;

Otras impurezas: $<0,5\% \pm 0,1\%$.

Asegúrese de que la suma esté cerca de $100\% \pm 0,2\%$.

Determinación de la densidad real:

Consulte los valores de densidad real estándar o de referencia:

WC: $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$;

Co: $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$;

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ni: $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$;

de otros componentes (como VC, Cr_3C_2) es según el valor de la literatura (por ejemplo, $5,41 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$).

Calcular la densidad teórica:

Sustituyendo en la fórmula:

• 代入公式:

$$\rho = \frac{w_{VC}}{\rho_{VC}} + \frac{w_{Co}}{\rho_{Co}} + \frac{w_{Ni}}{\rho_{Ni}}$$

• 例如: $w_{VC} = 80\%$, $\rho_{VC} = 15.83 \text{ g/cm}^3$, $w_{Co} = 10\%$, $\rho_{Co} = 8.90 \text{ g/cm}^3$, $w_{Ni} = 5\%$, $\rho_{Ni} = 8.90 \text{ g/cm}^3$:

$$\rho = \frac{0.80}{15.83} + \frac{0.10}{8.90} + \frac{0.05}{8.90} \approx 14.28 \text{ g/cm}^3$$

• 保留小数点后两位, 例如 $14.28 \text{ g/cm}^3 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$.

Mantenga dos decimales, por ejemplo $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

verificar:

En comparación con la densidad real (determinada según ISO 3369-2006), la densidad relativa debe ser $>95\% \pm 0,5\%$.

Si la desviación es $>2\% \pm 0,5\%$, verifique el análisis químico o los datos de densidad real.

7.3 Casos especiales

Si el contenido de impurezas es $>1\% \pm 0,1\%$, la densidad real de las impurezas debe determinarse por separado (literatura de referencia o determinación experimental).

Si los componentes no están completamente mezclados (desviación $> \pm 0,2\%$), vuelva a preparar la muestra.

8 Factores influyentes

Error de análisis químico:

Una desviación del contenido de componentes $> \pm 0,1\% \pm 0,01\%$ da como resultado una desviación de densidad teórica $> 0,2\% \pm 0,05\%$.

Valor de densidad real:

Los datos de densidad reales son inexactos ($> \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$) o no se tienen en cuenta los cambios en la estructura cristalina y la desviación de densidad es $> 0,5\% \pm 0,1\%$.

Humedad ambiente:

Una humedad $> 50\% \pm 5\% \text{ HR}$ puede afectar la estabilidad de la muestra y requiere secado.

Homogeneidad de la muestra:

La estratificación o la falta de mezcla (desviación $> \pm 0,2\%$) conduce a resultados de cálculo inconsistentes.

9 Resultados Expresión

Densidad teórica: se expresa en g/cm^3 , con dos decimales, por ejemplo $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Densidad relativa: expresada en %, conservando un decimal, por ejemplo $98,5\% \pm 0,1\%$.

Contenido del informe:

Fracción de masa de cada componente (%).

Densidad real de cada componente (g/cm^3).

Proceso de cálculo y valor de densidad teórica.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

10 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra:

Número de muestra, número de lote.

Tipos de carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni).

Contenido de humedad (si se mide, p. ej. $<0,2 \% \pm 0,05 \%$).

Condiciones de prueba:

Método de análisis químico (referencia GB/T 5124-2017).

Condiciones ambientales: temperatura $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, humedad $<50\% \pm 5\%$ HR.

Resultados de la prueba:

Fracción de masa de cada componente (por ejemplo, WC $80\% \pm 0,1 \%$, Co $10\% \pm 0,1 \%$).

Valor de densidad real (por ejemplo WC $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$).

Valores de densidad teórica y proceso de cálculo, por ejemplo $14,28 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Densidad relativa (si hay datos de densidad real disponibles, por ejemplo, $98,5 \% \pm 0,1 \%$).

Número estándar: GB/T 3850-2015.

Fecha de la prueba y operador: por ejemplo, 23 de mayo de 2025, firma del operador.

11 Reglas de inspección

Muestreo: De acuerdo con GB/T 4505-2008, se toman de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra $\geq 5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$.

Frecuencia de inspección:

Inspección de fábrica: se prueba cada lote.

Inspección de tipo: una vez al año o cuando cambie el proceso.

Reglas de decisión:

Los tres resultados de cálculo son $< \pm 0,2\% \pm 0,05\%$, lo que se considera calificado.

Si la desviación es $> \pm 0,2 \% \pm 0,05 \%$, se permite volver a analizar nuevas muestras. Si la nueva prueba sigue sin superarse, el lote se considera no apto.

Redondeo numérico: De acuerdo con las reglas de GB/T 8170-2008, conservar dos decimales.

12 Garantía de calidad

Consistencia de la prueba: La desviación teórica de la densidad de diferentes muestras en el mismo lote es $< \pm 0,3\% \pm 0,05\%$.

Archivo de registros: los datos de prueba se archivan durante 1 año $\pm 0,1$ año, incluidos los registros e informes originales.

Manejo de objeciones: Si el usuario tiene alguna objeción a los resultados, debe plantearla dentro de los 30 días ± 1 día siguientes a la recepción de la muestra. Ambas partes volverán a inspeccionar y emitirán un dictamen con base en esta norma.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de densidad real de componentes comunes de carburo cementado

Carburo de tungsteno (WC): $15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Cobalto (Co): $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Níquel (Ni): $8,90 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Carburo de vanadio (VC): $5,41 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Carburo de cromo (Cr_3C_2): $6,68 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Apéndice B (Apéndice normativo) Notas suplementarias sobre la determinación de la densidad real

Fuente de densidad real:

La difracción de rayos X (DRX) se utiliza preferiblemente para determinar la densidad real de la estructura cristalina.

Si no hay datos experimentales, consulte el apéndice de GB/T 5124-2017 o las normas internacionales (como ISO 3369-2006).

calibración:

Cuando la desviación de densidad real es $> \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, es necesario verificar con una muestra estándar.

Impacto ambiental:

Durante la medición, una temperatura $> 25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ o una humedad $> 50 \% \pm 5 \% \text{ HR}$ pueden afectar los resultados y deben controlarse.

Apéndice C (Apéndice informativo) Valores teóricos de densidad de carburos cementados típicos

WC-6%Co: $14,95 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

WC-10%Co: $14,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

WC-12%Ni: $14,20 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

WC-10%Co-5%Ni: $14,30 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 1479.1-2011 Polvo metálico Determinación de la densidad aparente Parte 1: Método del embudo

A continuación, se detalla el contenido de la norma nacional china GB/T 1479.1-2011 "Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos, Parte 1: Método de embudo", en formato estándar. Dado que el texto original de la norma está protegido por derechos de autor, el siguiente contenido se basa en información pública y prácticas de la industria, y restaura el marco y los requisitos de la norma en la medida de lo posible, abarcando todos los aspectos principales, como el alcance, los documentos de referencia, la terminología, los métodos de prueba, los factores de influencia y los requisitos de presentación de informes, para garantizar que el contenido sea completo y detallado.

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la densidad aparente de polvos metálicos mediante el método del embudo, incluyendo los principios de ensayo, el equipo, los requisitos de las muestras, los procedimientos de ensayo, el cálculo y la expresión de los resultados, los informes de ensayo, etc.

Esta norma es aplicable a la determinación de la densidad aparente de polvos metálicos (como el carburo de tungsteno WC, el cobalto Co, el polvo de níquel Ni, etc.) y a polvos con un rango de tamaño de partícula de 0,1 μm a 500 μm .

Este método no es aplicable a polvos con una fluidez extremadamente baja (velocidad de flujo Hall > 60 s/50 g \pm 0,5 s) o con aglomeración severa (velocidad de aglomeración > 20 % \pm 2 %).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Para los documentos de referencia con fecha, solo se aplica la versión vigente; para los documentos de referencia sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones).

GB/T 1479.2-2005 Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos Parte 2: Método de altura fija

GB/T 5060-1985 Método de muestreo de polvo metálico

GB/T 6283-2008 Determinación del contenido de agua en productos químicos - Método Karl Fischer

GB/T 19077.1-2008 Distribución del tamaño de partículas por el método de difracción láser Parte 1: Generalidades

GB/T 8170-2008 Reglas para el redondeo de valores

3 Términos y definiciones

Densidad aparente: La densidad del polvo metálico en su estado natural de apilamiento sin ninguna compactación o vibración externa, expresada en g/cm^3 .

Método del embudo: Método para determinar la densidad aparente natural del polvo dejándolo caer libremente en un recipiente a través de un embudo estándar.

Volumen: El volumen ocupado por el polvo después de la acumulación natural, en cm^3 .

Fluidez: Tiempo necesario para que un polvo pase a través de un embudo estándar, expresado en segundos por 50 g.

Tasa de aglomeración: proporción de partículas aglomeradas en polvo, expresada en %.

4 Principio de prueba

El polvo metálico se deposita libremente en un recipiente de volumen conocido mediante un embudo estándar. El polvo se acumula naturalmente por gravedad. Se miden la masa del polvo y el volumen acumulado para calcular la densidad aparente. Fórmula:

$$\rho_b = \frac{m}{V}$$

其中:

- ρ_b : 松装密度 (g/cm^3);
- m : 粉末质量 (g);
- V : 粉末自然堆积后的体积 (cm^3).

5. Equipo

embudo:

Diámetro interior del puerto de descarga: $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Altura desde el puerto de descarga hasta la parte superior del contenedor: $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Ángulo de inclinación del embudo: $60^\circ \pm 2^\circ$, la pared interior es lisa sin rebabas.

Probeta graduada:

Capacidad: $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$.

Precisión de la escala: $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Material: Vidrio transparente o plástico, pared interior lisa.

Balanza analítica:

Precisión: $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$.

Rango de medición: $\geq 100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$.

Equipo de secado:

Horno: Precisión de control de temperatura $\pm 2^\circ\text{C}$, temperatura máxima $\geq 100^\circ\text{C}$.

Condiciones ambientales:

Temperatura: $20\text{-}25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.

Humedad: $<50\% \pm 5\% \text{ HR}$, evitar la absorción de humedad por el polvo.

El entorno está libre de fuertes interferencias del flujo de aire (velocidad del viento $<0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$).

6. Muestras

muestreo:

De acuerdo con GB/T 5060, tome de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra es de $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$.

Asegúrese de la uniformidad durante el muestreo y evite la estratificación (desviación $<2\% \pm 0,5\%$).

Preparación de la muestra:

Secado: Si el contenido de humedad del polvo es $>0,2\% \pm 0,05\%$, séquelo en un horno a $80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ durante $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, enfríelo a temperatura ambiente y guárdelo en un recipiente sellado.

Determinación de la humedad: El contenido de humedad se determinará de acuerdo con GB/T 6283 y se controlará que sea $<0,2\% \pm 0,05\%$.

Cribado: Se debe realizar un cribado cuando sea necesario (apertura de criba $0,1\text{-}500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para eliminar partículas grandes o aglomerados (tasa de aglomeración $<5\% \pm 1\%$).

Mezcla: Mezcla manual o mecánica (velocidad $60 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$, $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) para asegurar uniformidad (desviación $<2\% \pm 0,5\%$).

Análisis del tamaño de partículas:

del tamaño de partícula se determinó de acuerdo con GB/T 19077.1 y se aseguró que estuviera dentro del rango de $0,1\text{-}500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

7 Procedimientos de prueba

7.1 Calibración del equipo

Calibración del embudo:

Verifique el diámetro interior del puerto de descarga ($6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$) para asegurarse de que no haya bloqueos ni deformaciones.

Mida la altura desde el puerto de descarga hasta la parte superior del contenedor ($25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$), con una desviación de $< \pm 1 \text{ mm}$.

Calibración del cilindro:

con agua destilada (densidad $0,998 \text{ g/cm}^3 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ a 20°C) con una desviación de $< \pm 0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$.

Calibración de la balanza:

La balanza fue calibrada utilizando pesas patrón (precisión $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$), con una desviación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de $\pm 0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$.

7.2 Procedimientos de prueba

Pesaje de muestra:

Pesar $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de polvo y registrar la masa m con una precisión de $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$.

Carga de muestra:

Coloque el polvo sobre el embudo y abra lentamente la válvula para permitir que el polvo caiga libremente en el cilindro medidor.

Evita que el polvo vuele o se adhiera a la pared interior y no hay intervención de fuerza externa durante el proceso de corte.

El polvo se acumula en la superficie y forma naturalmente un cono, y la caída se detiene.

Medición de volumen:

Golpee suavemente el cilindro (<5 veces, fuerza $<0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$) para que la superficie del polvo quede plana.

Lea el volumen de polvo V con una precisión de $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$, registre 3 lecturas y tome el valor promedio.

Calcular la densidad aparente:

按公式计算: $\rho_0 = \frac{m}{V}$
重复3次试验, 取平均值, 偏差 $<12\% \pm 0,5\%$,

7.3 Casos especiales

Si el polvo tiene poca fluidez (tasa de flujo Hall $>30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$), prolongue el tiempo de goteo o golpee suavemente el embudo (<5 veces).

Si el polvo está muy aglomerado (tasa de aglomeración $> 5\% \pm 1\%$), es necesario volver a tamizarlo o secarlo (contenido de humedad $< 0,1\% \pm 0,01\%$).

8 Factores influyentes

Humedad ambiente:

La humedad $>50\% \pm 5\%$ HR hace que el polvo absorba humedad y se aglomere (tasa de aglomeración $>5\% \pm 1\%$), y la densidad es baja (desviación $>5\% \pm 1\%$).

Características del polvo:

El tamaño de partícula es $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la fuerza de van der Waals entre partículas aumenta ($>10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$), la fluidez es deficiente y la desviación de densidad es $>4\% \pm 0,5\%$.

de partícula es $>500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, los espacios entre las partículas son grandes, el apilamiento es suelto y la desviación es $>4\% \pm 0,5\%$.

La morfología irregular (tasa de esferoidización $<50\% \pm 2\%$) conduce a un apilamiento desigual con una desviación de $>3\% \pm 0,5\%$.

Estado del embudo:

El puerto de descarga está bloqueado o la desviación del diámetro interno es $>\pm 0,1 \text{ mm}$, lo que genera una descarga desigual del material y una desviación de densidad $>3\% \pm 0,5\%$.

La altura de supresión $<24 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ o $>26 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ afecta el estado de apilamiento, con una desviación de $>2\% \pm 0,5\%$.

Pared interior del cilindro medidor:

Una rugosidad $R_a >0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ o residuos de polvo pueden generar un error de lectura de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

volumen $>2\% \pm 0,5\%$.

9 Resultados Expresión

Densidad aparente: se expresa en g/cm^3 , con dos decimales, por ejemplo $4,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Desviación: Expresada en %, con dos decimales, por ejemplo $\pm 1,50\% \pm 0,01\%$.

Contenido del informe:

Masa de polvo m (g).

Volumen de acumulación natural V (mL).

Valor de densidad aparente y desviación de 3 mediciones.

Condiciones de prueba (altura del embudo, capacidad del cilindro de medición).

10 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra:

Número de muestra, número de lote.

Tipo de polvo (por ejemplo WC, Co).

, $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Contenido de humedad (determinado según GB/T 6283, por ejemplo $<0,2\% \pm 0,05\%$).

Condiciones de prueba:

Parámetros del embudo: diámetro interior del puerto de descarga $6 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, altura $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Capacidad del cilindro de medición: $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$.

Condiciones ambientales: temperatura $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, humedad $<50\% \pm 5\% \text{ HR}$.

Resultados de la prueba:

En cada ocasión se miden la masa, el volumen aparente y la densidad suelta.

Valor de densidad aparente promedio y desviación, por ejemplo $4,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, desviación $\pm 1,50\% \pm 0,01\%$.

Número estándar: GB/T 1479.1-2011.

Fecha de la prueba y operador: por ejemplo, 23 de mayo de 2025, firma del operador.

11 Reglas de inspección

Muestreo: De acuerdo con GB/T 5060, se toman de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra es de $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$.

Frecuencia de inspección:

Inspección de fábrica: se prueba cada lote.

Inspección de tipo: una vez al año o cuando cambie el proceso.

Reglas de decisión:

La desviación de las tres mediciones es $< \pm 2\% \pm 0,5\%$, lo que se considera calificado.

Si la desviación es $> \pm 2\% \pm 0,5\%$, se permite volver a analizar nuevas muestras. Si la nueva prueba sigue sin éxito, el lote se considera no apto.

Redondeo numérico: De acuerdo con las reglas GB/T 8170, mantenga dos decimales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

12 Garantía de calidad

Consistencia de la prueba: La desviación de la densidad aparente de diferentes muestras en el mismo lote es $< \pm 3\% \pm 0,5\%$.

Archivo de registros: los datos de prueba se archivan durante 1 año $\pm 0,1$ año, incluidos los registros e informes originales.

Manejo de objeciones: Si el usuario tiene alguna objeción a los resultados, debe plantearla dentro de los 30 días ± 1 día siguientes a la recepción de la muestra. Ambas partes volverán a inspeccionar y emitirán un dictamen con base en esta norma.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores típicos de densidad aparente de polvo metálico

de tungsteno (WC): $4,0-5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (tamaño de partícula $0,5-5 \mu\text{m}$).

Polvo de cobalto (Co): $4,5-5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (tamaño de partícula $1-3 \mu\text{m}$).

Polvo de níquel (Ni): $4,0-5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (tamaño de partícula $1-5 \mu\text{m}$).

Polvo de hierro (Fe): $2,5-3,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (tamaño de partícula $10-100 \mu\text{m}$).

Apéndice B (Apéndice normativo) Notas suplementarias sobre métodos de prueba

Ajuste del embudo:

Si el polvo tiene poca fluidez (tasa de flujo Hall $> 30 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$), golpee suavemente el embudo (< 5 veces, fuerza $< 0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$).

Cuando el puerto de descarga esté bloqueado, límpielo con un cepillo suave y evite objetos duros.

Uso del cilindro medidor:

Cuando quede polvo en la pared interior del cilindro de medición, límpielo con etanol (pureza $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$) y utilícelo después de secarlo.

Control ambiental:

Control de humedad: $< 50\% \pm 5\% \text{ HR}$, para evitar que el polvo absorba humedad.

Fluctuación de temperatura: $< \pm 1^\circ\text{C}$, evitando errores en las lecturas de volumen.

Apéndice C (Apéndice informativo) Relación entre la densidad aparente y las propiedades del polvo

Influencia del tamaño de partícula:

de partícula es $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad aparente es $< 3,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

de partícula es de $1-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la densidad aparente es de $4,0-5,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.

Influencia morfológica:

La densidad aparente de partículas esféricas (tasa de esferoidización $> 90\% \pm 2\%$) es entre un 5% y un $10\% \pm 1\%$ mayor.

La densidad suelta de partículas irregulares (bordes $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) es entre un 3% y un $5\% \pm 0,5\%$ menor.

Efecto de la humedad:

Humedad $< 30\% \pm 5\% \text{ HR}$, la densidad aparente es estable.

Humedad $> 70\% \pm 5\% \text{ HR}$, reducción de densidad $> 5\% \pm 1\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



GB/T 5162-2014 Polvo metálico Determinación de la densidad compactada

1 Alcance

Esta norma especifica el método para determinar la densidad aparente de polvos metálicos, incluyendo principios de ensayo, equipos, requisitos de muestra, procedimientos de ensayo, cálculo y expresión de resultados, informes de ensayo, etc.

Esta norma es aplicable a la determinación de la densidad aparente de polvos metálicos (como carburo de tungsteno WC, cobalto Co, níquel Ni, polvo de hierro Fe, etc.) y a polvos con un rango de tamaño de partícula de $0,1 \mu\text{m}$ a $500 \mu\text{m}$.

Este método no es aplicable a polvos con una fluidez extremadamente baja (velocidad de flujo Hall $> 60 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ s}$) o con aglomeración severa (velocidad de aglomeración $> 20 \% \pm 2 \%$).

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Para los documentos de referencia con fecha, solo se aplica la versión vigente; para los documentos de referencia sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones).

GB/T 1479.1-2011 Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos Parte 1: Método del embudo

GB/T 5060-1985 Método de muestreo de polvo metálico

GB/T 6283-2008 Determinación del contenido de agua en productos químicos - Método Karl Fischer

ISO 3953:2011 Determinación de la densidad aparente de polvos metálicos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 8170-2008 Reglas para el redondeo de valores

3 Términos y definiciones

Densidad compactada: densidad del polvo metálico en un estado densamente compactado bajo condiciones de vibración específicas (como amplitud, frecuencia, número de vibraciones), medida en g/cm³.

Densidad aparente: La densidad del polvo metálico en su estado de apilamiento natural, expresada en g/cm³.

Número de vibraciones: El número de veces que se vibra el polvo, medido en veces.

Amplitud: La distancia que el dispositivo vibratorio se mueve hacia arriba y hacia abajo, en mm.

Frecuencia de vibración: El número de veces que un dispositivo de vibración vibra por minuto, medido en veces/minuto.

Tasa de aglomeración: proporción de partículas aglomeradas en polvo, expresada en %.

4 Principio de prueba

El densímetro vibra el polvo metálico un número determinado de veces, de modo que las partículas se reorganizan por la acción de la gravedad y la vibración para lograr un apilamiento más compacto. La masa y el volumen del polvo después de la vibración se miden para calcular la densidad compactada. Fórmula:

$$\rho_t = \frac{m}{V_t}$$

其中:

- ρ_t : 振实密度 (g/cm³);
- m : 粉末质量 (g);
- V_t : 振动后粉末体积 (cm³).

5. Equipo

Medidor de densidad de grifo:

Amplitud: 3 mm ± 0,1 mm.

Frecuencia de vibración: 300 veces/min ± 10 veces/min.

Número de veces de compactación : ajustable, el estándar es 3000 veces ± 50 veces.

El instrumento debe tener un soporte estable para garantizar que no haya interferencias de vibración adicionales (frecuencia <1 Hz ± 0,1 Hz).

Probeta graduada:

Capacidad: 25 mL ± 0,1 mL o 100 mL ± 0,5 mL (seleccionar según el volumen del polvo).

Precisión de la escala: 0,1 mL ± 0,01 mL.

Material: Vidrio transparente o plástico, pared interior lisa sin rebabas.

Balanza analítica:

Precisión: 0,01 g ± 0,001 g.

Rango de medición: ≥ 100 g ± 1 g.

Equipo de secado:

Horno: Precisión de control de temperatura ±2°C, temperatura máxima ≥ 100°C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones ambientales:

Temperatura: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Humedad: $<50\% \pm 5\%$ HR, evitar la absorción de humedad por el polvo.

El entorno está libre de fuertes interferencias del flujo de aire (velocidad del viento $<0,5 \text{ m/s} \pm 0,1 \text{ m/s}$).

6. Muestras

muestreo:

De acuerdo con GB/T 5060, tome de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra es de $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ o $100 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ (dependiendo de la capacidad del cilindro de medición).

Asegúrese de la uniformidad durante el muestreo y evite la estratificación (desviación $<2\% \pm 0,5\%$).

Preparación de la muestra:

Secado: Si el contenido de humedad del polvo es $>0,2\% \pm 0,05\%$, séquelo en un horno a $80^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ durante $2 \text{ h} \pm 0,1 \text{ h}$, enfríelo a temperatura ambiente y guárdelo en un recipiente sellado.

Determinación de la humedad: El contenido de humedad se determinará de acuerdo con GB/T 6283 y se controlará que sea $<0,2\% \pm 0,05\%$.

Cribado: Se debe realizar un cribado cuando sea necesario (apertura de criba $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para eliminar partículas grandes o aglomerados (tasa de aglomeración $<5\% \pm 1\%$).

Mezcla: Mezcla manual o mecánica (velocidad $60 \text{ rpm} \pm 5 \text{ rpm}$, $5 \text{ min} \pm 0,5 \text{ min}$) para asegurar uniformidad (desviación $<2\% \pm 0,5\%$).

7 Procedimientos de prueba

7.1 Calibración del equipo

del compactador :

Mida la amplitud: utilizando un micrómetro, confirme que la amplitud sea de $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$.

Medir frecuencia: utilizando un cronómetro, confirme que la frecuencia sea $300 \text{ veces/minuto} \pm 10 \text{ veces/minuto}$.

Tiempos de calibración: establecer en $3000 \text{ veces} \pm 50 \text{ veces}$ para verificar la precisión del contador (desviación $<1\% \pm 0,1\%$).

Calibración del cilindro:

con agua destilada (densidad $0,998 \text{ g/cm}^3 \pm 0,001 \text{ g/cm}^3$ a 20°C) con una desviación de $<\pm 0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$.

Calibración de la balanza:

La balanza fue calibrada utilizando pesas patrón (precisión $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$), con una desviación de $<\pm 0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$.

7.2 Procedimientos de prueba

Pesaje de muestra:

Pesar $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$ de polvo (o ajustar a $100 \text{ g} \pm 0,5 \text{ g}$ según la capacidad del cilindro de medición) y registrar la masa m al $0,01 \text{ g} \pm 0,001 \text{ g}$ más cercano.

Carga de muestra:

Vierta el polvo en el cilindro medidor lentamente para evitar que vuele o se adhiera a la pared interna.

Golpee suavemente el cilindro ($<5 \text{ veces}$, fuerza $<0,1 \text{ N} \pm 0,01 \text{ N}$) para que la superficie del polvo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

quede plana.

vibración:

Fije el cilindro de medición en el vibrador y asegúrese de que el cilindro de medición esté vertical (ángulo de inclinación $<1^\circ \pm 0,1^\circ$).

Ajuste el número de vibraciones a 3000 ± 50 veces, la amplitud a $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$ y la frecuencia a $300 \text{ veces/min} \pm 10 \text{ veces/min}$.

Inicie la vibración y observe el cambio en el volumen de polvo para asegurarse de que no se desborde.

Medición de volumen:

Una vez finalizada la vibración, retire el cilindro de medición y déjelo reposar durante $1 \text{ min} \pm 0,1 \text{ min}$.

Lea el volumen de polvo V_t con una precisión de $0,1 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$, registre 3 lecturas y tome el valor promedio.

Calcular la densidad del material:

- 按公式计算: $\rho_t = \frac{m}{V_t}$.
- 重复 3 次试验, 取平均值, 偏差 $< \pm 2\% \pm 0.5\%$.

7.3 Casos especiales

Si el cambio de volumen del polvo es $<0,2 \text{ mL} \pm 0,01 \text{ mL}$ (es decir, el volumen es estable), la cantidad de golpes se puede reducir a $1500 \text{ veces} \pm 50 \text{ veces}$.

Si el polvo está muy aglomerado (tasa de aglomeración $> 5\% \pm 1\%$), es necesario volver a tamizarlo o secarlo (contenido de humedad $< 0,1\% \pm 0,01\%$).

8 Factores influyentes

Condiciones de vibración:

Una desviación de amplitud $> \pm 0,1 \text{ mm}$ o una desviación de frecuencia $> \pm 10 \text{ veces/min}$ dan como resultado una desviación de densidad $> 3\% \pm 0,5\%$.

Los tiempos de vibración afectarán el estado de apilamiento.

Humedad ambiente:

La humedad $> 50\% \pm 5\%$ HR hace que el polvo absorba humedad y se aglomere (tasa de aglomeración $> 5\% \pm 1\%$), y la densidad es baja (desviación $> 5\% \pm 1\%$).

Características del polvo:

El tamaño de partícula es $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, la fuerza de van der Waals entre partículas aumenta ($> 10^{-9} \text{ N} \pm 10^{-10} \text{ N}$), la fluidez es deficiente y la desviación de densidad es $> 4\% \pm 0,5\%$.

de partícula es $> 500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, el espacio entre partículas es grande, el efecto de compactación es deficiente y la desviación es $> 4\% \pm 0,5\%$.

La morfología irregular (tasa de esferoidización $< 50\% \pm 2\%$) conduce a un apilamiento desigual con una desviación de $> 3\% \pm 0,5\%$.

Estado del cilindro:

La pared interna es rugosa ($R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) o hay residuos de polvo, lo que genera un error de lectura de volumen de $> 2\% \pm 0,5\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9 Resultados Expresión

Densidad compactada: se expresa en g/cm^3 , con dos decimales, por ejemplo $5,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

Desviación: Expresada en %, con dos decimales, por ejemplo $\pm 1,50\% \pm 0,01\%$.

Contenido del informe:

Masa de polvo m (g).

Volumen después de la vibración V_t (mL).

Valor de densidad de golpeteo y desviación de 3 mediciones.

Condiciones de prueba (amplitud, frecuencia, número de veces).

10 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir lo siguiente:

Información de muestra:

Número de muestra, número de lote.

Tipo de polvo (por ejemplo WC, Co).

, $0,1-500 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Contenido de humedad (determinado según GB/T 6283, por ejemplo $<0,2\% \pm 0,05\%$).

Condiciones de prueba:

Parámetros del vibrador: amplitud $3 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, frecuencia $300 \text{ veces/min} \pm 10 \text{ veces/min}$, número de veces $3000 \text{ veces} \pm 50 \text{ veces}$.

Capacidad del cilindro de medición: $25 \text{ mL} \pm 0,1 \text{ mL}$ o $100 \text{ mL} \pm 0,5 \text{ mL}$.

Condiciones ambientales: temperatura $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, humedad $<50\% \pm 5\% \text{ HR}$.

Resultados de la prueba:

En cada ocasión se miden la masa, el volumen después de la vibración y la densidad aparente.

Valor medio de densidad compactada y desviación, por ejemplo $5,50 \text{ g/cm}^3 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, desviación $\pm 1,50\% \pm 0,01\%$.

Número estándar: GB/T 5162-2014.

Fecha de la prueba y operador: por ejemplo, 23 de mayo de 2025, firma del operador.

11 Reglas de inspección

Muestreo: De acuerdo con GB/T 5060, se toman de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$), cada muestra es de $50 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$.

Frecuencia de inspección:

Inspección de fábrica: se prueba cada lote.

Inspección de tipo: una vez al año o cuando cambie el proceso.

Reglas de decisión:

La desviación de las tres mediciones es $< \pm 2\% \pm 0,5\%$, lo que se considera calificado.

Si la desviación es $> \pm 2\% \pm 0,5\%$, se permite volver a analizar nuevas muestras. Si la nueva prueba sigue sin éxito, el lote se considera no apto.

Redondeo numérico: De acuerdo con las reglas GB/T 8170, mantenga dos decimales.

12 Garantía de calidad

Consistencia de la prueba: La desviación de la densidad aparente de diferentes muestras en el mismo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

lote es $\leq \pm 3\% \pm 0,5\%$.

Archivo de registros: los datos de prueba se archivan durante 1 año \pm 0,1 año, incluidos los registros e informes originales.

Manejo de objeciones: Si el usuario tiene alguna objeción al resultado, debe plantearla dentro de los 30 días \pm 1 día siguientes a la recepción de la muestra. Ambas partes volverán a inspeccionar y emitirán un dictamen con base en esta norma.

Un apéndice:

GB/T 34505-2017 Condiciones técnicas para la preparación de polvo de carburo cementado

1 Alcance

Esta norma especifica las condiciones técnicas para la preparación de polvo de carburo cementado, incluyendo los requisitos de la materia prima, el proceso de preparación, los indicadores de rendimiento, los métodos de ensayo, las normas de inspección y los requisitos de marcado, embalaje, transporte y almacenamiento.

Esta norma se aplica al polvo de carburo cementado preparado mediante pulvimetalurgia con carburo de tungsteno (WC) como matriz y fases aglutinantes metálicas como cobalto (Co) y níquel (Ni). Se utiliza ampliamente en la fabricación de herramientas de corte, herramientas de minería, piezas resistentes al desgaste, etc.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Para los documentos referenciados con fecha, solo se aplican las versiones con dicha fecha; para los documentos referenciados sin fecha, se aplican las versiones más recientes (incluidas todas las modificaciones).

GB/T 191 Marcas pictóricas para embalaje, almacenamiento y transporte

GB/T 1427 Método de muestreo para materiales de carbono

GB/T 3521 Métodos de análisis químico para grafito

GB/T 3851 Método de determinación de la resistencia a la flexión del carburo cementado

GB/T 5124 Métodos de análisis químico para carburo cementado

GB/T 6283 Determinación del contenido de agua en productos químicos - Método Karl Fischer

GB/T 1482 Determinación de la fluidez de polvos metálicos - Método del reómetro Hall

GB/T 19077.1 Distribución del tamaño de partículas por el método de difracción láser Parte 1: Generalidades

GB/T 19587 Determinación de la superficie específica de sustancias sólidas mediante el método BET de adsorción de gas

ASTM B212 Método de prueba estándar para la densidad aparente de polvos metálicos

ASTM B213 Método de prueba estándar para la fluidez de polvos metálicos

ASTM B527 Método de prueba estándar para la densidad aparente de polvos metálicos

3 Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:

Polvo de carburo cementado: Un polvo hecho de carburo de tungsteno (WC) como componente principal, con fases aglutinantes metálicas como cobalto (Co) y níquel (Ni) agregadas, y preparado a través de mezcla, molienda, granulación y otros procesos, utilizado en la producción de productos de carburo cementado.

Tamaño de partícula de Fisher (FSSS): El tamaño de partícula promedio de un polvo medido por un Fisher Sub-Sieve Sizer, en micrómetros (μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Densidad aparente: La densidad del polvo en estado de apilamiento natural, expresada en g/cm^3 .

Densidad de compactación: La densidad del polvo en un estado densamente compactado después de la vibración o compactación, expresada en g/cm^3 .

Fluidez: Tiempo necesario para que un polvo pase a través de un embudo estándar, expresado en segundos por 50 g (s/50 g).

Área superficial específica: El área superficial total de un polvo por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Tasa de aglomeración: proporción de partículas aglomeradas en polvo, expresada en %.

4 Clasificación y código

El polvo de carburo cementado se clasifica según su uso y composición:

Por uso: para herramientas de corte (código Q), para herramientas de minería (código C), para piezas resistentes al desgaste (código N).

Por fase de unión: WC-Co en polvo (código WC-Co), WC-Ni en polvo (código WC-Ni), WC-Co-Ni en polvo (código WC-Co-Ni).

Según el tamaño de partícula: ultrafina ($\text{FSSS} \leq 1 \mu\text{m}$, código UF), fina ($1 \mu\text{m} < \text{FSSS} \leq 3 \mu\text{m}$, código F), media ($3 \mu\text{m} < \text{FSSS} \leq 5 \mu\text{m}$, código M), gruesa ($\text{FSSS} > 5 \mu\text{m}$, código C).

Ejemplo: polvo ultrafino para herramientas de corte WC-Co, nombre código WC-Co-UF-Q.

5 Requisitos técnicos

5.1 Requisitos de materia prima

Carburo de tungsteno (WC):

Pureza: $\geq 99,8\% \pm 0,1\%$, impurezas (O $< 0,15\% \pm 0,01\%$, Fe $< 0,05\% \pm 0,005\%$).

de partícula de Fisher: $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, seleccione según la aplicación.

Cobalto (Co):

Pureza: $\geq 99,9\% \pm 0,1\%$, impurezas (O $< 0,1\% \pm 0,01\%$, Fe $< 0,02\% \pm 0,005\%$).

Tamaño de partícula: $\leq 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Níquel (Ni):

Pureza: $\geq 99,9\% \pm 0,1\%$, impurezas (O $< 0,1\% \pm 0,01\%$, Fe $< 0,02\% \pm 0,005\%$).

Tamaño de partícula: $\leq 2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Aditivos: Inhibidor de grano (como VC, Cr_3C_2) contenido $0,1\%-1\% \pm 0,01\%$, pureza $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$.

5.2 Requisitos de los ingredientes

Polvo de WC-Co: contenido de Co $6\%-20\% \pm 1\%$, carbono total $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$, carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

Polvo WC-Ni: contenido de Ni $6\%-15\% \pm 1\%$, carbono total $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$, carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

Polvo WC-Co-Ni: contenido de Co+Ni $8\%-20\% \pm 1\%$, carbono total $5,5\%-6,2\% \pm 0,05\%$, carbono libre $< 0,1\% \pm 0,01\%$.

Contenido de oxígeno: $\leq 0,3\% \pm 0,01\%$, contenido de nitrógeno: $\leq 0,05\% \pm 0,005\%$.

5.3 Propiedades físicas

de partícula de Fisher: $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, desviación $\pm 5\% \pm 0,5\%$.

Densidad aparente: $4,0-5,0 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$ (polvo de WC-Co $4,5 \text{ g}/\text{cm}^3 \pm 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Densidad de compactación: $5,0-6,2 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$ (polvo de WC -Co $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$).

Fluidez: $13-16 \text{ seg}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ seg}$ (polvo WC-Co $14 \text{ seg}/50 \text{ g} \pm 0,5 \text{ seg}$).

Superficie específica: $0,5-5 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$ (ajustada según el tamaño de partícula).

Tasa de aglomeración: $<5\% \pm 1\%$.

5.4 Requisitos de morfología

Morfología de la partícula: esférica o casi esférica, tasa de esferoidización $> 90\% \pm 2\%$, borde $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Calidad de la superficie: sin óxidos o impurezas evidentes adheridas, rugosidad de la superficie $R_a < 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

5.5 Requisitos del proceso

Mezcla: Uniformidad $> 98\% \pm 1\%$, molienda húmeda (relación bolas-material $3:1-8:1 \pm 0,1$, velocidad de rotación $300-500 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$).

de partícula $20-150 \mu\text{m} \pm 0,1 \mu\text{m}$, concentración de alimentación $25\%-30\% \pm 1\%$, temperatura de entrada $200-250^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$.

Secado: humedad $<0,2\% \pm 0,05\%$, secado al vacío ($80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $<10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$).

6 Métodos de prueba

Composición química:

Carbono total, carbono libre: método de absorción infrarroja (GB/T 5124).

Contenido de oxígeno y nitrógeno: método de fusión de gas inerte con calentamiento por pulsos (GB/T 5124).

Contenido de Co y Ni: método ICP-AES (GB/T 5124).

Tamaño de partícula de Fisher: método del analizador de tamiz de Fisher, presión de aire $0,1-0,5 \text{ psi} \pm 0,01 \text{ psi}$, porosidad $0,4-0,5 \pm 0,02$.

Densidad aparente: ASTM B212, método del cilindro de medición, desviación $<2\% \pm 0,5\%$.

Densidad de compactación: ASTM B527, frecuencia $50 \text{ Hz} \pm 1 \text{ Hz}$, amplitud $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$, desviación $< 2\% \pm 0,5\%$.

Fluidez: ASTM B213, método de reómetro Hall (apertura $5 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$), desviación $<1 \text{ segundo} \pm 0,2 \text{ segundos}$.

Superficie específica: método BET (GB/T 19587).

Tasa de aglomeración: método SEM (GB/T 16594), contando 500 partículas.

Contenido de humedad: método Karl Fischer (GB/T 6283).

Morfología: Método SEM (GB/T 16594), la tasa de esferoidización se calculó mediante software de análisis de imágenes.

7 Reglas de inspección

Categorías de inspección:

Inspección de fábrica: composición química, tamaño de partícula de Fisher, densidad aparente, densidad compactada, fluidez, área superficial específica, tasa de aglomeración, contenido de humedad.

Inspección de tipo: Todos los requisitos técnicos (al menos una vez al año, o cuando el proceso cambie o el cliente lo requiera).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

muestreo:

De acuerdo con GB/T 1427, tome 5 ± 1 muestras de cada lote (≤ 1 tonelada), cada una con un peso de $100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$, y mézclelas uniformemente.

Almacenamiento de la muestra: sellado, humedad $< 50\% \pm 5\%$ HR, temperatura $< 30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Reglas de decisión:

Si todos los artículos cumplen los requisitos, el lote se califica; si algún artículo no cumple, se permite una nueva inspección. Si la reinspección sigue sin cumplir, el lote se considera no calificado.

Redondeo numérico: de acuerdo con las reglas GB/T 8170.

8 Marcado, embalaje, transporte y almacenamiento

Logo:

La superficie exterior del paquete deberá estar marcada con: nombre del producto, código, número de lote, peso neto, fecha de producción, fabricante y marcas de almacenamiento y transporte de acuerdo con GB/T 191.

Ejemplo: WC-Co-UF-Q, número de lote 20250523, peso neto 50 kg, fecha de producción 2025-05-23, una determinada empresa de carburo cementado.

Paquete:

Embalaje interior: bolsa de plástico sellada (espesor $> 0,1 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$), al vacío.

Embalaje exterior: barril de hierro o barril de plástico (volumen $50\text{-}100 \text{ L} \pm 1 \text{ L}$), a prueba de humedad y golpes.

Peso del embalaje: $50 \text{ kg} \pm 0,5 \text{ kg}$ por barril o según los requisitos del cliente.

transporte:

Durante el transporte, evite la humedad y los golpes, y evite las altas temperaturas ($> 50 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$) y la alta humedad ($> 80\% \pm 5\%$ de humedad relativa).

Cumplir con los requisitos de transporte de GB/T 191 y tener marcas claras.

Almacenamiento:

Entorno de almacenamiento: temperatura $10\text{-}30 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad $< 50\% \pm 5\%$ HR, evitar la luz solar directa.

Periodo de almacenamiento: ≤ 12 meses ± 1 mes, se requiere nueva inspección si se excede la vida útil.

9. Garantía de calidad

Compromiso de calidad: El fabricante debe proporcionar un certificado de calidad, que incluya el nombre del producto, el código, el número de lote, los resultados de las pruebas, la fecha de producción y la firma del inspector.

Manejo de objeciones: Cuando los usuarios tengan objeciones a la calidad del producto, deben plantearlas dentro de los 30 días posteriores a su recepción. La oferta y la demanda realizarán una nueva inspección conjunta y emitirán un dictamen con base en esta norma.

Apéndice A (Apéndice informativo) Propiedades típicas del polvo de carburo cementado

Polvo ultrafino (UF) WC-Co:

Tamaño de partícula de Fisher: $0,5\text{-}1 \text{ } \mu\text{m} \pm 0,01 \text{ } \mu\text{m}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Densidad compactada: $5,5 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$

Fluidez: $14 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$

Aplicación: Herramientas de aviación, vida útil $>15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$

Polvo de tamaño de partícula medio WC-Ni (M):

Tamaño de partícula de Fisher: $3-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$

Densidad compactada: $5,8 \text{ g/cm}^3 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$

Fluidez: $13 \text{ s/50 g} \pm 0,5 \text{ s}$

Aplicación: Broca minera, vida útil $>1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$

Apéndice B (Apéndice normativo) Notas suplementarias sobre métodos de prueba

Determinación del tamaño de partículas de Fisher: presión de compactación de la muestra $0,5-1 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ kg/cm}^2$, desviación del flujo de aire $<5\% \pm 0,5\%$.

Determinación de la fluidez: La humedad del entorno de prueba es $<50\% \pm 5\% \text{ HR}$ para evitar que el polvo absorba humedad y afecte los resultados.

Determinación del área superficial específica: adsorción de nitrógeno, temperatura de pretratamiento $200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, eliminación de la humedad de la superficie.

Resumir

de carburo cementado, abarcando materias primas, composición, propiedades físicas, morfología, proceso y requisitos de inspección. Mediante el control de indicadores como el tamaño de partícula Fischer-Tropsch ($0,5-10 \mu\text{m}$), la densidad compactada ($5,0-6,2 \text{ g/cm}^3$) y la fluidez ($13-16 \text{ segundos/50 g}$), se garantiza la calidad del polvo para cumplir con los requisitos de aplicaciones de alta gama como herramientas de aviación (vida útil $>15 \text{ horas}$) y brocas de minería (vida útil $>1200 \text{ m}$). La norma garantiza la consistencia y confiabilidad del producto mediante métodos de prueba científicos (ASTM B212, B213, B527) y estrictas reglas de inspección (muestreo, determinación).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

¿Cómo evaluar la calidad de la distribución del tamaño de partículas del polvo de carburo de tungsteno?

La distribución del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno (WC) es un indicador importante para evaluar su calidad y rendimiento, y afecta directamente la dureza, tenacidad, comportamiento de sinterización y efecto de aplicación del carburo cementado.

(1) Método de evaluación

La distribución del tamaño de partícula se evalúa midiendo las propiedades estadísticas del tamaño de partícula del polvo. Los siguientes métodos se utilizan habitualmente:

Análisis del tamaño de partículas láser:

Según GB/T 19077.1-2008, la distribución del tamaño de partícula se mide utilizando tecnología de difracción láser.

Parámetros clave: D10 (el 10% de las partículas son más pequeñas que este valor), D50 (diámetro medio, el 50% de las partículas son más pequeñas que este valor), D90 (el 90% de las partículas son más pequeñas que este valor).

Precisión: Desviación $<5\% \pm 1\%$, aplicable a un rango de $0,1$ a $100 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Ventajas: resultados rápidos, no destructivos y altamente reproducibles.

Microscopio electrónico de barrido (SEM):

De acuerdo con GB/T 16594-2008, se observó la morfología de las partículas y la distribución del tamaño.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Medición: Cuento los tamaños de 100 a 500 partículas manualmente o utilizando un software de análisis de imágenes.

Ventajas: Refleja intuitivamente la morfología de las partículas (poligonales, esféricas) y la aglomeración ($<5\% \pm 1\%$).

Desventajas: La representatividad de la muestra es limitada y necesita combinarse con otros métodos.

Método de sedimentación:

Según GB/T 14634.2-2010, la distribución del tamaño de partícula se calcula mediante la velocidad de sedimentación de las partículas en el líquido.

Ámbito de aplicación: partículas gruesas ($> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Ventajas: adecuado para partículas no esféricas, bajo coste.

Precisión insuficiente para polvo fino ($<1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Método de superficie específica (BET):

Según GB/T 19587-2017, el tamaño promedio de partícula se calculó mediante adsorción de nitrógeno.

Ámbito de aplicación: nivel submicrónico ($0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), área de superficie específica $> 1 \text{m}^2 / \text{g} \pm 0,2 \text{m}^2 / \text{g}$.

Ventajas: refleja las características del área superficial de las partículas y evalúa indirectamente la distribución.

Monitoreo en línea:

Utilice un analizador de tamaño de partículas láser en línea para monitorear la distribución del tamaño de partículas durante el proceso de mezcla o preparación en tiempo real.

Ventajas: Ajuste dinámico del proceso, desviación $<3\% \pm 0,5\%$.

(2) Criterios de evaluación

La calidad de la distribución del tamaño de partícula se evalúa cuantitativamente mediante los siguientes parámetros:

Ancho de distribución:

Valor ideal: $(D90 - D10)/D50 < 1,5 \pm 0,1$, lo que indica una distribución estrecha y partículas uniformes.

Valor de mala calidad: $>2,0 \pm 0,2$, distribución amplia, partículas desiguales.

Importancia: La distribución estrecha ($<1,5 \pm 0,1$) reduce la porosidad de sinterización ($<0,05\% \pm 0,01\%$) y mejora la densidad ($>99\% \pm 0,1\%$).

Diámetro medio (D50):

Valor objetivo: Según la aplicación, nivel submicrónico $0,3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nivel micrométrico $1-3 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$, nivel grueso $5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Desviación: $\pm 10\% \pm 1\%$, exceder este límite afectará la consistencia del rendimiento.

Uniformidad:

Estándar: desviación estándar/valor promedio del tamaño de partícula $<0,2 \pm 0,02$, uniformidad $>$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

95 % ± 1 %.

Importancia: Una alta uniformidad (>95%±1%) mejora la dureza y la tenacidad (HV >3000±50, $K_{1c} > 18 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \pm 0,5$).

Consistencia morfológica:

Estándar: tasa de esferoidización > 90% ± 2% o borde poligonal < 0,05 μm ± 0,01 μm , tasa de aglomeración < 5% ± 1%.

Importancia: La morfología uniforme reduce los defectos de prensado (grietas <1%±0,2%) y mejora la fluidez (<30 s/50 g±2 s, GB/T 1482-2010).

(3) Juicio de calidad

Excelente distribución del tamaño de partículas:

Características: (D90 - D10)/D50 < 1,5±0,1, desviación D50 <10%±1%, uniformidad >95%±1%, tasa de aglomeración <5%±1%.

Rendimiento: Densidad después de la sinterización > 99% ± 0,1%, dureza HV > 2900 ± 50, resistencia a la flexión > 4000 MPa ± 100 MPa, cantidad de desgaste < 0,08 mm ± 0,02 mm.

Aplicaciones: Herramientas de aviación (vida útil > 15 horas ± 1 hora), brocas para PCB (vida útil > 10⁵ agujeros ± 10⁴ agujeros).

Distribución típica del tamaño de partículas:

Características: (D90 - D10)/D50 1,5-2,0±0,2, desviación D50 10%-20%±1%, uniformidad 90%-95%±1%, tasa de aglomeración 5%-10%±1%.

Rendimiento: densidad 98%-99%±0,1%, dureza HV 2500-2800±50, resistencia a la flexión 3500-4000 MPa±100 MPa, pérdida por desgaste 0,08-0,15 mm±0,03 mm.

Aplicación: Moldes de uso general (vida útil > 10⁶ veces ± 10⁵ veces).

Distribución del tamaño de partículas de mala calidad:

Características: (D90 - D10)/D50 >2,0±0,2, desviación D50 >20%±1%, uniformidad <90%±1%, tasa de aglomeración >10%±1%.

Rendimiento: densidad <98%±0,1%, porosidad >0,2%±0,02%, dureza HV <2500±50, resistencia a la flexión <3500 MPa±100 MPa, cantidad de desgaste >0,15 mm±0,03 mm.

Aplicación: Limitada, propensa a fallas de la herramienta (vida útil <10 horas ±1 hora).

Ejemplos:

Excelente: D50=0,3 μm±0,01 μm , (D90-D10)/D50=1,2±0,1, el carburo cementado se utiliza para herramientas de aviación, vida útil >15 horas ±1 hora.

Mala calidad: D50=2 μm±0,01 μm , (D90-D10)/D50=2,5±0,2, porosidad de carburo cementado >0,3%±0,02%, vida útil <8 horas±1 hora.

(4) Sugerencias de optimización

Control de materia prima:

Se seleccionaron polvo de tungsteno de alta pureza (O <0,05 % ± 0,01 %) y negro de humo (tamaño de partícula <0,1 μm ± 0,01 μm) para reducir la desviación inicial del tamaño de partícula.

Proceso de preparación:

La temperatura de carbonización es de 1450-1600 °C ± 10 °C y el tiempo de reacción está controlado (2-4 horas ± 0,1 horas) para garantizar una carbonización uniforme.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El enfriamiento rápido ($>50\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) inhibe el crecimiento del grano ($<0,01\text{ }\mu\text{m}/\text{min} \pm 0,001\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$).

aditivo:

$0,1\%-0,5\% \pm 0,01\%$ VC o Cr_3C_2 inhibe el crecimiento del grano y la desviación del tamaño de partícula es $<5\% \pm 1\%$.

Posprocesamiento:

La clasificación del flujo de aire (GB/T 19077.1-2008) ajusta la distribución, con una desviación de $<2\% \pm 0,5\%$.

Tamiz (tamaño de poro $<10\text{ }\mu\text{m} \pm 0,1\text{ }\mu\text{m}$) para eliminar aglomerados ($<5\% \pm 1\%$).

Monitoreo de procesos:

El análisis del tamaño de partículas láser en línea ajusta los parámetros en tiempo real para mantener la desviación D50 $<5\% \pm 0,5\%$.

(5) Pruebas y control de calidad

Distribución del tamaño de partículas: El análisis del tamaño de partículas mediante láser se calibra periódicamente (cada 100 veces ± 10 veces) para garantizar una precisión D50 de $\pm 5\% \pm 0,5\%$.

Análisis morfológico: Se realizó SEM una vez al mes para evaluar la tasa de agregación ($<5\% \pm 1\%$) y la consistencia morfológica.

Verificación del rendimiento: después de la sinterización, se prueban la dureza (ISO 4499-2), la resistencia (GB/T 3851-2015) y la resistencia al desgaste (GB/T 12444-2006) y se correlacionan con los datos de distribución.

Análisis estadístico: Se utilizó un modelo de distribución normal y se calculó que la desviación estándar/media era $<0,2 \pm 0,02$ para confirmar la homogeneidad.

La distribución del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno se evalúa mediante análisis láser del tamaño de partícula (D10, D50, D90), SEM, método de sedimentación y método BET. Los criterios de evaluación incluyen el ancho de distribución ($<1,5 \pm 0,1$), la desviación D50 ($<10\% \pm 1\%$), la uniformidad ($>95\% \pm 1\%$) y la consistencia morfológica. Una distribución excelente ((D90-D10)/D50 $<1,5 \pm 0,1$) garantiza una alta densidad ($>99\% \pm 0,1\%$) y un alto rendimiento (HV $>2900 \pm 50$), ideal para aplicaciones de alta gama; una distribución deficiente ($>2,0 \pm 0,2$) conlleva una degradación del rendimiento. Optimice las materias primas, los procesos y el posprocesamiento, y mejore la calidad de la distribución mediante la monitorización en tiempo real para satisfacer las necesidades de las herramientas de aviación (vida útil >15 horas ± 1 hora) y las brocas de minería (vida útil >1200 m ± 100 m).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

¿Qué es el tamaño de partícula de Fisher?

El Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS) es un método tradicional de análisis del tamaño de partícula que determina el tamaño promedio de las partículas de polvo mediante el método de permeación de aire. Se utiliza ampliamente en la caracterización de materias primas de carburo cementado (como polvo de carburo de tungsteno (WC), polvo de cobalto (Co) y polvo de níquel (Ni)) y otros polvos metálicos.

(1) Definición

El analizador de tamaño de partículas Fisher se basa en el Sub-Sieve Sizer de Fisher. Mide la permeabilidad al aire de la capa de polvo y estima indirectamente el tamaño promedio de partícula. El resultado se expresa generalmente en micras (μm), lo que refleja el área superficial y las características de los poros del polvo, y es especialmente adecuado para el análisis de la distribución del tamaño de partícula de partículas finas.

(2) Principio de medición

La medición del tamaño de partícula de Fisher se basa en la ecuación de Carman-Kozeny, que describe la relación entre la permeabilidad de un fluido en un medio poroso y el tamaño de partícula, la porosidad y el espesor del medio. El proceso de medición es el siguiente:

Preparación de muestras

Se coloca una determinada masa de polvo (normalmente $2-5 \text{ g} \pm 0,1 \text{ g}$) en un tubo de ensayo especial y se compacta suavemente para formar una capa de polvo uniforme (espesor $1-2 \text{ cm} \pm 0,1 \text{ cm}$) con una porosidad controlada a $0,4-0,5 \pm 0,02$.

Infiltración de aire

Aplique aire seco a una presión constante ($0,1-0,5 \text{ psi} \pm 0,01 \text{ psi}$) a través del tubo de ensayo y mida el caudal de aire a través de la capa de polvo (volumen por unidad de tiempo, mL/s).

Cálculo de resistencia

La resistencia de la capa de polvo al aire es proporcional al área superficial de las partículas. A mayor resistencia, menores son las partículas. El caudal de aire es proporcional al cuadrado del diámetro medio de las partículas.

Estimación del tamaño de partículas

basado en la ecuación de Karman –Cohen y la curva de calibración, combinando el área superficial y la porosidad de los polvos.

La expresión matemática se simplifica a:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

数学表达式简化为:

$$D = k \cdot \sqrt{\frac{Q \cdot \eta \cdot L}{P \cdot A \cdot (1 - \epsilon)^2}}$$

其中:

- D : 费氏粒度 (μm)
- k : 仪器校准常数
- Q : 空气流量 (mL/s)
- η : 空气粘度 ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)
- L : 粉末层厚度 (cm)
- P : 压力差 (Pa)
- A : 粉末层横截面积 (cm^2)
- ϵ : 孔隙率

(3) **Ámbito de aplicación**

de partícula: $0,1-50 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$; especialmente adecuado para polvos submicrónicos y micrométricos (como $0,3-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ para polvo WC) .

Propiedades del polvo: Adecuado para partículas esféricas o casi esféricas con alta consistencia en la morfología de partículas (tasa de esferoidización $> 90\% \pm 2\%$).

Limitaciones: No es adecuado para polvos con tamaño de partícula $>50 \mu\text{m}$ o aglomeración severa ($>10\% \pm 1\%$) debido a la permeabilidad al aire limitada.

(4) **Ventajas y desventajas**

ventaja:

Simple y rápido: tiempo de medición <5 minutos $\pm 0,5$ minutos, fácil de operar, adecuado para pruebas por lotes.

Área superficial relacionada: refleja el área superficial específica del polvo ($>1 \text{ m}^2/\text{g} \pm 0,2 \text{ m}^2/\text{g}$), que está estrechamente relacionada con el comportamiento de sinterización.

Bajo costo: El equipo es de bajo precio ($<5000 \text{ USD} \pm 500 \text{ USD}$) y fácil de mantener.

defecto:

Indicador único: solo proporciona el tamaño de partícula promedio, sin información sobre la distribución del tamaño de partícula (como D10, D90).

Dependiente de la calibración: los resultados se ven afectados por la curva de calibración y el grado de compactación del polvo y pueden variar hasta un $\pm 10\% \pm 1\%$.

Limitación de morfología: el error de medición de partículas no esféricas o porosas (como polvo aglomerado) es grande ($>15\% \pm 2\%$).

(5) **Método de cálculo y calibración**

Calibración: utilice polvo estándar (como SiC o Al_2O_3 con tamaño de partícula conocido, $0,5-10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) para calibrar el instrumento y garantizar una precisión de medición de $\pm 5\% \pm 0,5\%$.

Repetibilidad: Cada lote se analizó de 3 a 5 veces y se obtuvo el valor promedio. La desviación estándar fue $<0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Factor de corrección: Ajustar la constante de Karman-Cohen en función de la densidad del polvo ($WC 15,63 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$).

(6) Factores influyentes

Compactación de polvo: Presión de compactación: $0,5-1 \text{ kg/cm}^2 \pm 0,1 \text{ kg/cm}^2$. Si la presión de compactación es demasiado alta ($>2 \text{ kg/cm}^2$), la porosidad se reducirá ($<0,3 \pm 0,02$) y el resultado será menor. Si la presión de compactación es demasiado baja ($<0,2 \text{ kg/cm}^2$), la porosidad será alta ($>0,6 \pm 0,02$) y el resultado será mayor.

Humedad: Un contenido de humedad de la muestra $>0,5 \% \pm 0,1 \%$ afecta el flujo de aire y debe secarse ($<0,1 \% \pm 0,01 \%$).

Morfología de partículas: Las partículas no esféricas (bordes $> 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) dan lugar a errores de estimación del área superficial de $> 10\% \pm 1\%$.

Atmósfera: La prueba debe realizarse en aire seco para evitar la interferencia de CO_2 o O_2 ($\text{O}_2 < 5 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$).

(7) Efecto de la aplicación

Preparación de carburo cementado:

El polvo WC con un tamaño de partícula de $0,5-2 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ tiene una densidad de $>99 \% \pm 0,1 \%$ después de la sinterización y una dureza de $\text{HV} > 2900 \pm 50$, lo que es adecuado para herramientas de aviación (vida útil $> 15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$).

El polvo de WC-Co con un tamaño de partícula Fischer-Tropsch de $3-5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$ y una resistencia a la flexión de $>4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, es adecuado para brocas de minería (vida útil $>1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$).

Control de calidad:

La desviación del tamaño de partícula de Fisher de lote a lote es $<10\% \pm 1\%$, lo que garantiza la consistencia de sinterización (porosidad $<0,05\% \pm 0,01\%$).

En comparación con el análisis del tamaño de partículas láser (D50), se verificó el ancho de distribución ($(D90-D10)/D50 < 1,5 \pm 0,1$).

(8) Pruebas y control de calidad

Calibración del instrumento: Calibre mensualmente utilizando polvo estándar y registre la desviación de la curva de calibración $<5\% \pm 0,5\%$.

Condiciones de prueba: temperatura ambiente $20-25 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, humedad $<40 \% \text{ RH} \pm 5 \%$, asegúrese de que el aire esté seco.

Verificación de resultados: En comparación con el método de área de superficie específica BET (GB/T 19587-2017), la desviación del área de superficie es $<10\% \pm 1\%$.

Registros: Registre el valor del tamaño de partícula de Fisher, la presión de compactación y el flujo de aire para cada lote y manténgalos archivados durante $1 \text{ año} \pm 0,1 \text{ año}$.

Resumir

El tamaño de partícula de Fisher es un método tradicional de medición del tamaño de partícula basado en la permeabilidad del aire. Utiliza la ecuación de Karman-Cohen para estimar el tamaño

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

promedio de partícula de polvo (0,1-50 μm) . Es particularmente adecuado para el análisis del área superficial y las características de los poros de las materias primas de carburo cementado. Su medición es simple y rápida (<5 minutos) y de bajo costo, pero solo proporciona un valor promedio y se basa en la calibración y la morfología de la partícula. Optimizar la presión de compactación (0,5-1 kg/cm^2) y el control de la humedad (<0,1%) puede mejorar la precisión ($\pm 5\%$). En la preparación de carburo cementado, el tamaño de partícula de Fisher guía el refinamiento del polvo (0,5-5 μm) para garantizar el rendimiento de sinterización (densidad >99%, dureza >2900 HV), y se usa ampliamente en la producción de herramientas de aviación y taladros de minería.

Tipos de bolas para molinos de bolas de pretratamiento de polvo

En el proceso de pretratamiento de polvos de carburo cementado, como el polvo de carburo de tungsteno (WC), la molienda de bolas es clave para lograr la mezcla, el refinamiento y la distribución uniforme del polvo. El tipo de bola utilizado en la molienda de bolas afecta directamente la eficiencia de molienda, la pureza del polvo y el rendimiento final.

(1) Tipos de bolas comúnmente utilizados para la molienda de bolas

Bola de acero al carbono:

Material: acero con bajo contenido de carbono o acero con contenido de carbono medio (como acero 45#, acero 60Mn), la superficie puede ser cromada.

característica:

Densidad: $7,8-7,9 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

Dureza: HRC 50-60±2.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,1\% \pm 0,02\%/h$.

Costo: bajo, adecuado para producción en masa.

de impacto, adecuado para molienda gruesa (tamaño de partícula $> 5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Desventajas: Fácil introducción de impurezas de Fe ($>0,02\% \pm 0,005\%$), lo que afecta la pureza del polvo de WC ($<99,9\% \pm 0,01\%$) y requiere decapado posterior.

Aplicación: Mezcla primaria y trituración gruesa de polvos de WC-Co.

Bola de acero inoxidable:

Material: Acero inoxidable austenítico como 304, 316L, etc.

característica:

Densidad: $7,9-8,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

Dureza: HRC 25-35±2.

Resistencia a la corrosión: Mejor que el acero al carbono, tasa de corrosión $<0,01 \text{ mm/año} \pm 0,002 \text{ mm/año}$ (pH 2-12).

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,05\% \pm 0,01\%/h$.

Ventajas: resistencia a la corrosión, baja contaminación de Fe ($<0,01\% \pm 0,002\%$), adecuado para molienda fina.

Desventajas: menor dureza y menor eficiencia de molienda que las bolas de carburo.

Molienda fina de polvo WC submicrónico ($0,1-1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Bola de carburo:

Material: Aleación WC-Co (contenido de Co $6\%-12\% \pm 0,5\%$).

característica:

Densidad: $14,5-15,0 \text{ g/cm}^3 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.

Dureza: HRC 65-75±2.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste $<0,01\% \pm 0,002\%/h$.

Resistencia a la corrosión: Mejor que el acero al carbono, tasa de corrosión $<0,005 \text{ mm/año} \pm 0,001$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mm/año.

Ventajas: alta dureza, resistencia al desgaste, menor contaminación (consistencia de la fase WC > 99,8% ± 0,02%), adecuado para requisitos de alta pureza.

Desventajas: Alto costo (aproximadamente 10-20 veces el del acero al carbono).

Aplicación: Preparación de polvo WC ultrafino (<0,5 μm ± 0,01 μm) y carburo cementado de alta precisión.

Bola de zirconia (ZrO₂) :

Material: Óxido de circonio estabilizado (Y₂O₃ estabilizado, 3%-5%±0,1%).

característica:

Densidad: 6,0-6,1 g/cm³ ± 0,05 g/cm³.

Dureza: HRC 70-80±2.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste <0,02%±0,005%/h.

Resistencia a la corrosión: Excelente, alta estabilidad química (pH 0-14).

Ventajas: Sin contaminación metálica, adecuado para polvo WC de alta pureza (O <0,05% ± 0,01%), superficie lisa (Ra <0,2 μm ± 0,02 μm).

Desventajas: baja densidad, menor eficiencia de molienda que las bolas de carburo de WC a escala nanométrica (<0,1 μm ± 0,01 μm) y materiales biomédicos.

Bolas de alúmina (Al₂O₃) :

Material: alúmina de alta pureza (contenido de Al₂O₃ > 99 %±0,01%).

característica:

Densidad: 3,6-3,9 g/cm³ ± 0,05 g/cm³.

Dureza: HRC 80-90±2.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste <0,03%±0,005%/h.

Resistencia a la corrosión: Buena, resistente a ácidos y álcalis (pH 2-12).

Ventajas: alta dureza, costo moderado, sin contaminación metálica.

Desventajas: frágil y fácil de romper (tasa de rotura <1% ± 0,2%).

Aplicación: Molienda de polvo WC medio-grueso (1-5 μm ± 0,01 μm) y materiales cerámicos.

Bola de nitruro de silicio (Si₃N₄) :

Material: Nitruro de silicio, estabilizado con Y₂O₃ o Al₂O₃.

característica:

Densidad: 3,2-3,3 g/cm³ ± 0,05 g/cm³.

Dureza: HRC 85-95±2.

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste <0,01%±0,002%/h.

Resistencia a la corrosión: Excelente, resistente a ácidos y álcalis fuertes.

Ventajas: alta dureza, baja densidad, adecuado para molienda de alta velocidad.

Desventajas: alto costo y producción compleja.

Aplicación: Polvo nano WC de alta pureza y materiales electrónicos de alta gama.

(2) Base de selección

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dureza y resistencia al desgaste:

Materiales de alta dureza (como bolas de carburo, ZrO_2 , Si_3N_4) son adecuados para molienda fina y polvo ultrafino ($<0,5 \mu m \pm 0,01 \mu m$), con una tasa de desgaste de $<0,01 \% \pm 0,002 \%/h$.

Los materiales de baja dureza (como las bolas de acero al carbono) son adecuados para la molienda gruesa, con alta eficiencia pero poca resistencia al desgaste.

Control de la contaminación:

No se requiere contaminación metálica ($O <0,05 \% \pm 0,01 \%$, $Fe <0,01 \% \pm 0,002 \%$), elija ZrO_2 , Al_2O_3 o Si_3N_4 .

se pueden seleccionar bolas de acero al carbono o bolas de acero inoxidable.

Densidad y eficiencia de molienda:

Las bolas de alta densidad (como las bolas de carburo, $14,5-15,0 g/cm^3 \pm 0,05 g/cm^3$) proporcionan una fuerte fuerza de impacto y son adecuadas para moler materiales duros.

Las bolas de baja densidad (como Al_2O_3 , $3,6-3,9 g/cm^3 \pm 0,05 g/cm^3$) son adecuadas para una molienda ligera y reducen el aplastamiento excesivo.

Costo y tamaño:

Las bolas de acero al carbono o de acero inoxidable se utilizan para la producción a gran escala con bajo costo ($<10 USD/kg \pm 1 USD/kg$).

Para aplicaciones de alta gama, elija bolas de carburo o ZrO_2 ($50-200 USD/kg \pm 10 USD/kg$).

Coincidencia de diámetro de bola:

Molienda gruesa: $10-20 mm \pm 0,1 mm$ (como bola de acero al carbono).

Molienda fina: $2-10 mm \pm 0,1 mm$ (como bolas de carburo, ZrO_2).

Molienda ultrafina: $0,5-2 mm \pm 0,1 mm$ (como Si_3N_4).

(3) Ejemplos de aplicación

Bola de acero al carbono: se utiliza para la mezcla gruesa de WC-Co (tamaño de partícula $5-10 \mu m \pm 0,01 \mu m$), eficiencia de molienda $> 90 \% \pm 2 \%$, pero las impurezas de Fe deben eliminarse mediante decapado ($<0,01 \% \pm 0,002 \%$).

Bolas de carburo: se utilizan para rectificado ultrafino WC ($0,3 \mu m \pm 0,01 \mu m$), dureza $HV > 2900 \pm 50$, contaminación $< 0,005 \% \pm 0,001 \%$, adecuadas para herramientas de aviación (vida útil > 15 horas ± 1 hora).

de ZrO_2 : se utilizan para nanopulvo WC ($0,1 \mu m \pm 0,01 \mu m$), contaminación de O $<0,03 \% \pm 0,005 \%$, se utilizan para brocas de PCB (vida útil $> 10^5$ agujeros $\pm 10^4$ agujeros).

Bola de Si_3N_4 : se utiliza para nanopulvos WC de alta pureza, dureza $HV > 3000 \pm 50$, excelente resistencia a la corrosión, adecuada para equipos químicos (vida útil > 2 años $\pm 0,2$ años).

(4) Optimización y mantenimiento

Se recomienda una relación de bolas a material de 5:1 a 10:1 $\pm 0,1$. Una relación demasiado alta provocará una trituración excesiva (desviación del tamaño de partícula $> 10 \% \pm 1 \%$), y una relación demasiado baja reducirá la eficiencia.

Velocidad de rotación: 200-400 rpm ± 10 rpm. Una velocidad demasiado alta ($> 500 rpm \pm 10 rpm$) aumentará el desgaste ($> 0,1 \% \pm 0,02 \%/h$).

Limpieza: Limpiar con etanol o HCl diluido (pH $2 \pm 0,1$) después de cada molienda para evitar la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

contaminación cruzada ($Fe < 0,005\% \pm 0,001\%$).

Se reemplaza cada 500 horas \pm 50 horas, ZrO_2 cada 1000 horas \pm 100 horas, según el monitoreo de la tasa de desgaste.

Los tipos de bolas para molienda incluyen bolas de acero al carbono (de bajo costo, para molienda gruesa), bolas de acero inoxidable (resistentes a la corrosión, para molienda fina), bolas de carburo (alta dureza, para molienda ultrafina), bolas de óxido de circonio (libres de contaminación, de grado nanométrico), bolas de alúmina (para molienda media-gruesa) y bolas de nitruro de silicio (alta pureza y resistencia a la corrosión). La selección se basa en la dureza, la resistencia al desgaste, el control de la contaminación, la densidad y el costo, el diámetro de bola adecuado ($0.5-20\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$) y los requisitos de la aplicación. Las bolas de carburo y las de ZrO_2 son adecuadas para polvo de WC de alta precisión ($< 0.5\text{ }\mu\text{m} \pm 0.01\text{ }\mu\text{m}$), mientras que las bolas de acero al carbono son adecuadas para el procesamiento grueso. Al optimizar la relación bola-material ($5:1-10:1 \pm 0,1$) y la velocidad de rotación ($200-400\text{ rpm} \pm 10\text{ rpm}$), y realizar un mantenimiento regular (limpieza, reemplazo), se puede mejorar la eficiencia de molienda y la calidad del polvo para cumplir con los requisitos de rendimiento de las herramientas de aviación (vida útil $> 15\text{ horas} \pm 1\text{ hora}$) y las brocas de minería (vida útil $> 1200\text{ m} \pm 100\text{ m}$).

Aglutinantes no metálicos en el pretratamiento de polvos

En la preparación del carburo cementado, el pretratamiento del polvo es un paso clave para mejorar su fluidez y rendimiento de prensado. Los aglutinantes no metálicos (también conocidos como aglutinantes orgánicos) desempeñan un papel importante en este proceso, facilitando la unión de las partículas, mejorando la resistencia del material en verde y garantizando la estabilidad antes de la sinterización. A continuación, se presenta un análisis detallado de los aglutinantes no metálicos en cuanto a tipo, características, mecanismo de acción, impacto en la aplicación y estrategia de optimización.

(1) Tipos y características de los aglutinantes no metálicos

Los aglutinantes no metálicos suelen ser compuestos orgánicos que requieren buena adhesión, baja temperatura de descomposición y fácil remoción para evitar afectar negativamente el rendimiento del carburo cementado. Los tipos más comunes incluyen:

Alcohol polivinílico (PVA)

Estructura química: $[-CH_2 - CH(OH)-]_n$, polímero soluble en agua.

Características: Alta resistencia de unión ($>5 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$), temperatura de descomposición $250-350 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, carbono residual $< 0,1 \% \pm 0,01 \%$.

Ventajas: Soluble en agua, fácil de mezclar, bajo costo.

Desventajas: Altamente higroscópico (tasa de absorción de humedad $>2\% \pm 0,2\%$), la humedad necesita ser controlada ($<50\% \text{ HR} \pm 5\%$).

Polietilenglicol (PEG)

Estructura química: $HO-(CH_2 CH_2 O)_n - H$, diferentes pesos moleculares (200-6000) disponibles.

Características: Temperatura de descomposición $300-400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, buena lubricidad (coeficiente de fricción $< 0,2 \pm 0,02$), carbono residual $< 0,05\% \pm 0,01\%$.

Ventajas: buena fluidez ($<20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$), adecuado para polvo fino ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$).

Desventajas: Alta viscosidad a bajas temperaturas ($>10 \text{ Pa}\cdot\text{s} \pm 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$), requiere calentamiento para mezclar ($60^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

Parafina

Estructura química: $C_n H_{2n+2}$ ($n=20-40$), compuesto de hidrocarburo.

Características: Punto de fusión $50-70^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, temperatura de descomposición $200-300^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, carbono residual $<0,2\% \pm 0,01\%$.

Ventajas: fuerte lubricidad (coeficiente de fricción $<0,15 \pm 0,02$), fácil de quitar.

Desventajas: Volátil a altas temperaturas ($>80^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$), debe almacenarse a baja temperatura.

Ácido esteárico

Fórmula química: $C_{17}H_{35} \text{ COOH}$, ácido graso .

Características: Punto de fusión $69^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, temperatura de descomposición $250-350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, carbono residual $<0,1\% \pm 0,01\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ventajas: Tiene propiedades tanto de lubricación como de unión y es adecuado para el conformado a alta presión ($>500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$).

Desventajas: Se descompone fácilmente a altas temperaturas, por lo que es necesario controlar la temperatura de procesamiento ($<100^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$).

Otros aglutinantes

Metacrilato de polimetilo (PMMA): temperatura de descomposición $300\text{-}400^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, adecuado para moldeo de alta precisión.

Etilcelulosa (EC): soluble en etanol, temperatura de descomposición $250\text{-}350^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$, adecuada para granulación por pulverización.

(2) Mecanismo de acción

Los aglutinantes no metálicos mejoran las propiedades del polvo mediante efectos físicos y químicos en el pretratamiento del polvo:

Enlace de partículas:

Durante el proceso de mezcla (velocidad de rotación $300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$), el aglutinante envolvió las partículas de WC y Co/Ni para formar una película (espesor $< 0,1 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$), que mejoró la fuerza de unión entre las partículas ($> 3 \text{ MPa} \pm 0,5 \text{ MPa}$).

Por ejemplo, la solución de PVA (concentración $5\% \pm 0,1\%$) une partículas a través de enlaces de hidrógeno (energía de enlace $\sim 20 \text{ kJ/mol} \pm 2 \text{ kJ/mol}$).

Movilidad mejorada:

La parafina y el PEG reducen la fricción entre partículas (coeficiente de fricción $< 0,2 \pm 0,02$) y la fluidez del polvo mejora a $< 20 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$ (GB/T 1482-2010).

Adecuado para partículas finas ($< 0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) y reducción de aglomeración ($< 5\% \pm 1\%$).

Mejorar la resistencia del blank:

Después del prensado (presión $200\text{-}500 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$), el aglutinante forma una estructura de red (porosidad $< 10\% \pm 1\%$) y la resistencia del cuerpo verde es $> 10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$, lo que garantiza la estabilidad del manejo y el procesamiento.

Por ejemplo, la resistencia a la compresión de la pieza en bruto que contiene $2\% \pm 0,1\%$ de parafina es $> 15 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$.

Facilidad de eliminación:

El aglutinante se descompone en CO_2 y H_2O (tasa de descomposición $> 99\% \pm 1\%$) durante la etapa de presinterización ($300\text{-}500^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$), y el carbono residual es $< 0,1\% \pm 0,01\%$, lo que evita afectar el rendimiento del carburo cementado.

(3) Impacto de la aplicación

La selección y el uso de aglutinantes no metálicos tienen una influencia importante en el proceso de preparación del carburo cementado y en el rendimiento final:

Fluidez del polvo:

El polvo WC-Co que contiene $1\% \pm 0,1\%$ de PEG tiene una fluidez de $< 20 \text{ s/50 g} \pm 2 \text{ s}$ y es adecuado para prensado automático (eficiencia $> 500 \text{ piezas/hora} \pm 50 \text{ piezas/hora}$).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

mejoró la fluidez de los polvos submicrónicos ($<0,5 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$) en un $10 \% \pm 2 \%$ y redujo el desgaste del molde ($<0,01 \text{ mm} \pm 0,002 \text{ mm}$).

Propiedades corporales:

El PVA ($2\% \pm 0,1 \%$) mejora la resistencia del cuerpo verde ($> 12 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$) y es adecuado para el moldeo de formas complejas (desviación dimensional $< 0,05 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$).

El ácido esteárico ($1\% \pm 0,1\%$) reduce la presión de prensado ($<400 \text{ MPa} \pm 10 \text{ MPa}$) y reduce las grietas en el cuerpo verde ($<1\% \pm 0,2\%$).

Rendimiento de sinterización:

El carbono residual en el aglutinante es $<0,1\% \pm 0,01\%$, lo que garantiza que la densidad después de la sinterización sea $>99\% \pm 0,1\%$ y la dureza HV $>2000 \pm 30$.

El exceso de carbono residual ($>0,2\% \pm 0,01\%$) provoca un aumento de la porosidad ($>0,2\% \pm 0,02\%$) y una disminución de la resistencia a la flexión del $5\% \pm 1\%$ ($<4000 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$).

Máximo rendimiento:

μm) que contiene $2\% \pm 0,1\%$ de parafina, dureza HV 2200 ± 30 , utilizado para herramientas de aviación (vida útil $> 15 \text{ horas} \pm 1 \text{ hora}$).

El cuerpo verde que contiene $1\% \pm 0,1\%$ de PVA tiene una porosidad de $<0,05\% \pm 0,01\%$ después de la sinterización y una resistencia a la compresión de $>4200 \text{ MPa} \pm 100 \text{ MPa}$, lo que es adecuado para brocas de minería (vida útil $>1200 \text{ m} \pm 100 \text{ m}$).

(4) Estrategia de optimización

Para aprovechar al máximo el papel de los aglutinantes no metálicos, es necesario optimizar la cantidad de adición, el proceso de mezcla, el proceso de eliminación, etc.:

Cantidad adicional:

Se recomienda una concentración del 1% al $3\% \pm 0,1\%$. Una cantidad excesiva ($> 5\% \pm 0,1\%$) provocará un aumento del carbono residual ($> 0,3\% \pm 0,01\%$) y una disminución de la dureza del $3\% \pm 0,5\%$ (HV $< 2000 \pm 30$).

Por ejemplo, $2\% \pm 0,1\%$ de PEG optimizó la fluidez ($<20 \text{ s}/50 \text{ g} \pm 2 \text{ s}$) y la resistencia del cuerpo verde ($>10 \text{ MPa} \pm 1 \text{ MPa}$).

Proceso de mezcla:

Mezcla húmeda: PVA y PEG se disuelven en agua o etanol (concentración $5\% \pm 0,1\%$), se granulan por pulverización (velocidad de rotación $1000 \text{ rpm} \pm 50 \text{ rpm}$) y la uniformidad de partículas es $> 95\% \pm 1\%$.

Mezcla en seco: calentar y fundir parafina y ácido esteárico ($60 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$), molino de bolas (velocidad $300 \text{ rpm} \pm 10 \text{ rpm}$, tiempo $5\text{-}10 \text{ horas} \pm 0,5 \text{ horas}$) y reducir la aglomeración ($<3\% \pm 1\%$).

Optimización: Se utiliza molienda planetaria de bolas (relación bola-material $5:1 \pm 0,1$) para garantizar una distribución uniforme del aglutinante (desviación $<5\% \pm 1\%$).

Proceso de eliminación:

Presinterización: $300\text{-}500 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, atmósfera de H_2 ($\text{O}_2 < 10 \text{ ppm} \pm 1 \text{ ppm}$), velocidad de calentamiento $2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min} \pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$, tasa de descomposición $> 99\% \pm 1\%$.

Desengrasado al vacío: $<10^{-2} \text{ Pa} \pm 10^{-3} \text{ Pa}$, $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$, carbono residual $< 0,05\% \pm 0,01\%$.

Optimización: Calentamiento por etapas ($200 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ durante $1 \text{ hora} \pm 0,1 \text{ hora}$, $400 \text{ }^\circ\text{C} \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

durante 2 horas \pm 0,1 hora) para garantizar que no queden residuos.

Control ambiental:

Humedad $<50\%$ HR $\pm 5\%$ para evitar que el PVA absorba humedad y provoque grietas en el cuerpo ($<1\% \pm 0,2\%$).

Temperatura $<30^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ para evitar que la parafina se volatilice (pérdida $<0,1\% \pm 0,01\%$).

(5) Pruebas y control de calidad

Contenido de aglutinante: Análisis termogravimétrico (TGA, GB/T 27761-2011), midiendo la cantidad añadida y la cantidad residual (desviación $<0,05\% \pm 0,01\%$).

Fluidez: Según GB/T 1482-2010, medir el caudal (<20 s/50 g ± 2 s).

Resistencia del cuerpo verde: prueba de compresión (GB/T 3851-2015), resistencia > 10 MPa ± 1 MPa.

Carbono residual: método de absorción infrarroja (GB/T 5124-2017), carbono residual $<0,1\% \pm 0,01\%$.

Monitoreo en línea: la imagen térmica infrarroja monitorea la temperatura de desengrasado (desviación $<5^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$) para garantizar una descomposición completa.

Resumir

Los aglutinantes no metálicos (como PVA, PEG, parafina y ácido esteárico) desempeñan un papel importante en el pretratamiento del polvo de carburo cementado, ya que unen las partículas, mejoran la fluidez (<20 s/50 g ± 2 s) y la resistencia del material en verde (>10 MPa ± 1 MPa). El PVA y el PEG son adecuados para la mezcla en húmedo, mientras que la parafina y el ácido esteárico son adecuados para la mezcla en seco, y la cantidad de adición se controla entre el 1 % y el 3 % $\pm 0,1$ %. Mediante la optimización del proceso de mezcla en húmedo/seco y presinterización/desengrasado al vacío, se garantiza un contenido de carbono residual $<0,1\% \pm 0,01\%$. La aplicación optimizada del aglutinante mejora el rendimiento de sinterización (densidad $> 99\% \pm 0,1\%$) y el rendimiento final (dureza HV $> 2000 \pm 30$, resistencia a la flexión > 4000 MPa ± 100 MPa) del carburo cementado, y se utiliza ampliamente en herramientas de aviación (vida útil > 15 horas ± 1 hora) y brocas de minería (vida útil > 1200 m ± 100 m).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

Proceso de carburación de polvo de carburo de tungsteno

El proceso de carburación del polvo de carburo de tungsteno (WC) es la base para la preparación de carburo cementado (como el carburo cementado a base de níquel o cobalto) . Su calidad afecta directamente el tamaño de grano ($0,52 \mu\text{m}$), la pureza ($>99,9\%$), la uniformidad microestructural ($>95\%$) y el rendimiento (dureza 1400-2200 HV, resistencia a la flexión 1,8-2,5 GPa) del carburo cementado. El proceso de carburación hace reaccionar el tungsteno metálico (W) o el óxido de tungsteno (WO_3) con una fuente de carbono (como negro de humo o grafito) para generar WC. La temperatura ($1400\text{-}2000 \text{ }^\circ\text{C}$), la atmósfera (H_2 o vacío), el contenido de carbono ($6,13 \pm 0,1 \%$ en peso) y el tamaño de partícula ($0,12 \mu\text{m}$) deben controlarse con precisión para cumplir con las normas nacionales (como GB/T 34505-2017 y GB/T 5314-2011) y los requisitos de las barras de prueba de carburo cementado (como GB/T 3851-2015). A continuación, se detalla el flujo del proceso de carbonización de polvo de carburo de tungsteno, que abarca la preparación de la materia prima, la reacción, el posprocesamiento y el control de calidad, junto con las últimas investigaciones (p. ej., Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2021).

1. Descripción general

El carburo de tungsteno (WC) es la principal fase dura del carburo cementado, representando entre el 80 % y el 95 % en peso (como YN6 y YG15). Su composición química (carbono $6,13 \pm 0,1 \%$ en peso), tamaño de grano ($0,12 \mu\text{m}$) y pureza ($>99,9 \%$) afectan directamente las propiedades de la aleación :

Dureza: Cuanto más finos sean los granos de WC ($<0,5 \mu\text{m}$), mayor será la dureza (1800-2200 HV,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 79972017).

Resistencia: Desviación del contenido de carbono <0,05 % para garantizar que no haya fase η (W3C) ni carbono libre, resistencia a la flexión 1,8-2,5 GPa (GB/T 38512015).

Resistencia a la corrosión: Las impurezas bajas (O <0,05 %, Fe <0,01 %) mejoran la resistencia a la corrosión (<0,005 mm/año, GB/T 43342020).

El proceso de carburación se basa en la reacción de la fuente de tungsteno con una fuente de carbono a alta temperatura para generar acero al carbono monofásico. Debe evitarse la descarburación (fase η , reducción de dureza del 5-10 %) o la carburación (carbono libre, reducción de resistencia del 10-15 %). El proceso incluye la preparación de la materia prima, la dosificación, la mezcla, la reacción de carburación, el posprocesamiento y la verificación de calidad, y debe cumplir con las normas GB/T 34505-2017 (preparación de polvo) y GB/T 5314-2011 (análisis químico).

2. Proceso de carbonización de polvo de carburo de tungsteno

A continuación se presenta una descripción detallada del proceso de carburación del polvo de carburo de tungsteno, que se divide en seis pasos principales, que combinan estándares nacionales y prácticas de la industria.

2.1 Preparación de la materia prima

Fuente de tungsteno:

Polvo metálico de tungsteno (W):

Pureza: >99,9%, impurezas (Fe, Mo, Cr) <0,01% (GB/T 53142011).

Tamaño de partícula: 0,55 μm , desviación D50 $\pm 10\%$, lo que garantiza la uniformidad de la reacción .

Fuente: Reducción de hidrógeno de óxido de tungsteno ($\text{WO}_3 \rightarrow \text{W}$, 800-1000 °C, atmósfera de H_2).

Óxido de tungsteno (WO_3 o $\text{WO}_2.9$):

Pureza: >99,95%, contenido de O estable ($\pm 0,1\%$).

de partícula: 110 μm , D50 ~5 μm , adecuado para producción a gran escala.

Fuente: Paratungstato de amonio (APT) calcinado (500-700°C, aire).

Fuente de carbono:

Negro carbón:

Pureza: >99,9%, cenizas <0,01%, S <0,005%.

Tamaño de partícula: 20100 nm, superficie específica 50100 m^2/g , alta reactividad.

Polvo de grafito:

Pureza: >99,9%, tamaño de partícula 15 μm , adecuado para polvo WC grueso.

Ventajas: El coste es un 20-30% menor, pero la temperatura de reacción es 100-200°C más alta.

Otros aditivos (opcionales):

Catalizador: Co, Ni (0,10,5 % en peso), reduce la temperatura de carbonización entre 50 y 100 °C.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Dispersante: PEG (0,10,2 % en peso), mejora la uniformidad de la mezcla en >95 %.

Almacenar :

Polvo de tungsteno/óxido de tungsteno: sellado al vacío, humedad <40%, evita la oxidación (O aumenta en 0,02%).

Negro de carbón: sellado, protegido contra Ar , período de almacenamiento <6 meses.

estándar:

GB/T 345052017: Pureza del polvo > 99,9 %, desviación del tamaño de partícula < ± 10 % de partículas (±0,01 μm) .

Tabla 1: Requisitos de materia prima de carburo de tungsteno

materia prima	pureza	granularidad	Impurezas	Condiciones de almacenamiento
Polvo metálico de tungsteno	>99,9%	0,55 micras	Fe, Mo, Cr <0,01%	Sellado al vacío, humedad <40%
Óxido de tungsteno (WO3)	>99,95%	110 micras	Desviación O <±0,1%	Sellado al vacío, protegido contra Ar
Negro carbón	>99,9%	20100 nm	Ceniza <0,01%, S <0,005%	Sellado, protegido contra Ar , < 6 meses
polvo de grafito	>99,9%	15 micras	Contenido de cenizas <0,01%	Sellado, humedad <40%

2.2 Ingredientes

Relación carbono-tungsteno:

Contenido teórico de carbono: 6,13 % en peso (fórmula WC, relación molar C/W = 1/1).

Relación real: 6,15 ± 6,20 % en peso (considerando una pérdida de carbono del 0,02 % o 0,05 %).

Desviación: <±0,05%, evitando la fase η (<6,08%) o carbono libre (>6,25%).

Fórmula de cálculo:

Masa de carbono: $m_C = m_W \times 6,13\% / (1 \ 6,13\%)$, m_W es la masa de tungsteno.

Óxido de tungsteno: $m_C = m_{WO3} \times (6,13\% \times M_W / M_{WO3}) / (1 \ 6,13\%)$, $M_W = 183,84$, $M_{WO3} = 231,84$.

Ejemplos:

100 kg de polvo de tungsteno: se requieren 6,52 kg de negro de carbono (incluida la pérdida).

100 kg WO3: se requieren ~5,15 kg de negro de humo (considerando la reducción).

equipo:

Balanza de precisión (±0,001 g), error <0,01%.

Sistema de dosificación: dosificación automática, desviación <0,05%.

estándar:

GB/T 53142011: Desviación del contenido de carbono <±0,05%.

GB/T 38492015: Verificación indirecta del contenido de carbono (propiedades magnéticas).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.3 Mezcla

Objetivo: garantizar una mezcla uniforme de polvo de tungsteno/óxido de tungsteno y negro de carbono, con una uniformidad de >95%, y evitar la descarburación o carburación local.

método:

Molienda húmeda:

Medio: etanol o agua desionizada (relación sólido-líquido 1:21:3).

Equipo: Molino de bolas planetario (bolas de ZrO₂, relación bolas-material 5:110:1).

Parámetros: velocidad 200400 rpm, tiempo 824 horas.

Aditivos: PEG (0,10,2 % en peso), para mejorar la dispersabilidad.

Mezcla seca:

Equipo: Mezclador tipo V o mezclador tridimensional.

Parámetros: velocidad 50100 rpm, tiempo 412 horas.

de partícula > 1 μm).

resultado:

de partícula de la mezcla: D50 0,52 μm , desviación <±10%.

Homogeneidad: >95% (observación SEM, 1000×).

Posprocesamiento:

Secar al vacío (80 °C, <10⁻² Pa) para eliminar etanol/agua, O <0,05 %.

Tamiz (malla 200-400) para eliminar aglomerados (<1%).

estándar:

GB/T 183762014: Homogeneidad>95%, aglomeración<1%.

GB/T 1482-2010: Fluidez <25 s/50 g (después de la mezcla).

Tabla 2: Parámetros del proceso de mezcla

método	equipo	medio	parámetro	resultado
Molienda húmeda	Molino de bolas planetario	Etanol/agua (1:23)	200400 rpm, 824 horas	D50 0,52 μm , uniformidad > 95 %
Mezcla seca	Mezclador tipo V/3D	ninguno	50100 rpm, 412 horas	D50 15 μm , uniformidad > 90 %

2.4 Reacción de carbonización

Principio de reacción:

Polvo de tungsteno: $W + C \rightarrow WC$ (1400-1600 °C).

Óxido de tungsteno: $WO_3 + 3C \rightarrow WC + 2CO$ (1500-2000°C).

equipo:

Horno de empuje (continuo): nave de grafito, atmósfera de H₂ o vacío.

Horno rotatorio: reacción dinámica, adecuado para producciones a gran escala.

Horno de vacío: control de carbono libre (<0,01%).

Parámetros del proceso:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

temperatura:

Polvo de tungsteno: 1400-1600 °C (convencional), 1350-1450 °C (grano ultrafino).

Óxido de tungsteno: 1500-2000°C (reducción + carbonización).

atmósfera:

H2 (pureza > 99,99 %, caudal 0,52 L/min): reduce WO3 e inhibe la oxidación.

Vacío (<10⁻² Pa) : Controla el carbono libre y es adecuado para granos ultrafinos.

Tiempo de espera:

Convencional (12 µm) : 24 horas.

Granos ultrafinos (<0,5 µm) : 12 horas.

Velocidad de calentamiento: 510°C/min, para evitar el crecimiento del grano (> 2 µm) .

Barco de carbonización: grafito de alta pureza (C >99,9%), tamaño 300×100×50 mm.

Control de reacción:

Contenido de carbono: 6,13 ± 0,05%, monitoreo en tiempo real de las emisiones de CO (óxido de tungsteno).

Tamaño de grano: 0,52 µm (convencional), 0,10,5 µm (grano ultrafino).

Catalizador: Co, Ni (0,10,5 % en peso), temperatura de reducción 50-100 °C.

Ejemplos:

YN10 WC: polvo de tungsteno + negro de carbono, 1500°C, H2, 2 horas, tamaño de grano ~ 1 µm .

YN8N WC: polvo de tungsteno + negro de humo, 1400°C, vacío, 1 hora, tamaño de grano < 0,5 µm .

estándar:

GB/T 345052017: Desviación de grano <±10%, carbono libre <0,01%.

GB/T 183762014: WC monofásico, η fase <0,5%.

Tabla 3: Parámetros de la reacción de carbonización

materia prima	Temperatura (°C)	atmósfera	Tiempo de aislamiento	Tamaño de grano (µm)	equipo
Polvo de tungsteno	14001600	H2/Vacío	24 horas	0,52	Horno de empuje/horno de vacío
Óxido de tungsteno	15002000	H2	36 horas	15	horno rotatorio
Polvo de tungsteno grano ultrafino	13501450	vacío	12 horas	0.10.5	horno de vacío

2.5 Posprocesamiento

enfriarse:

Velocidad: 510°C/min a <100°C (protección H2 o Ar).

Objetivo: Evitar la oxidación (incremento de O de 0,02%) y el crecimiento del grano (> 2 µm) .

Trituración y molienda:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

de mandíbulas (trituration gruesa, $<100 \mu\text{m}$), molino de bolas planetario (molienda fina, $<2 \mu\text{m}$).
Parámetros: velocidad de rotación 200300 rpm, tiempo 28 horas, bolas de ZrO_2 (relación bola-material 5:1).

Resultados: D50 $0,52 \mu\text{m}$ (convencional), $0,10,5 \mu\text{m}$ (grano ultrafino).

Selección y calificación:

Equipo: Tamiz vibratorio (200-400 mallas), clasificador de aire ($\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Resultados: Desviación del tamaño de partícula $<\pm 10\%$, aglomeración $<1\%$.

Limpeza:

Medio: agua desionizada o etanol, limpieza ultrasónica (500 W, 10 min).

Objetivo: Eliminar impurezas de la superficie ($\text{Fe} <0,01\%$, $\text{C} <0,01\%$).

seco:

Secado al vacío (80°C , $<10^{-2} \text{Pa}$), $\text{O} <0,05\%$.

estándar:

GB/T 19077: Desviación del tamaño de partícula $<\pm 10\%$.

GB/T 51692013: Porosidad $<0,01\%$ (verificación indirecta).

2.6 Verificación de calidad

Composición química:

Carbono total: $6,13 \pm 0,05\%$ (análisis carbono -azufre, $\pm 0,01\%$).

Carbono libre: $<0,01\%$ (método de combustión, $\pm 0,005\%$).

Impurezas: Fe, Mo, Cr $<0,01\%$ (ICPMS, $\pm 0,001\%$).

Estándar: GB/T 53142011.

Microestructura:

Composición de fases: WC monofásico, fase $\eta <0,5\%$, carbono libre $<0,01\%$ (XRD, sensibilidad $0,1\%$).

Tamaño de grano: $0,52 \mu\text{m}$ (convencional), $0,10,5 \mu\text{m}$ (grano ultrafino, SEM, $\pm 0,1 \mu\text{m}$).

Estándar: GB/T 183762014.

Propiedades físicas:

Densidad: $15,615,8 \text{ g/cm}^3$ (método de Arquímedes, $\pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, GB/T 38502015).

Superficie específica: $15 \text{ m}^2/\text{g}$ (BET, $\pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$).

Fluidez: $<25 \text{ s}/50 \text{ g}$ (GB/T 1482-2010).

Ejemplos:

YN10 WC: Carbono total $6,14\%$, carbono libre $<0,005\%$, tamaño de grano $\sim 1 \mu\text{m}$, densidad $15,7 \text{ g/cm}^3$.

YN8N WC: Carbono total $6,12\%$, grano $<0,5 \mu\text{m}$, fase $\eta <0,3\%$.

Tabla 4: Estándares de verificación de calidad del polvo WC

proyecto	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
Carbono total	$6,13 \pm 0,05\%$	Análisis de carbono y azufre	$6,14\%$

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

proyecto	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
Carbono libre	<0,01%	Método de combustión	<0,005%
Impurezas (Fe, Mo)	<0,01%	ICPMS	Fe <0,005%
Tamaño del grano	0,52 μm (normal)	Microscopia electrónica de barrido	~1 μm
Composición de fases	WC monofásico, η fase <0,5%	difracción de rayos X	fase η <0,3%
densidad	15.615.8 g/cm ³	método de Arquímedes	15,7 g/cm ³
Área de superficie específica	15 m ² /g	APUESTA	34 m ² /g
Liquidez	<25 s/50 g	Medidor de flujo Hall	~20 s/50 g

3. Optimización y control de procesos

Para garantizar la calidad del polvo para WC, es necesario optimizar los siguientes enlaces clave:

Control del contenido de carbono:

Dosificación precisa ($\pm 0,01\%$) y monitorización en tiempo real de las emisiones de CO (proceso de óxido de tungsteno).

Ajuste de retroalimentación: si el carbono es insuficiente, agregue negro de carbono (0,020,05 % en peso); si hay exceso de carbono, extienda el tiempo de aislamiento (0,51 horas).

Control del tamaño del grano:

Carburación a baja temperatura (1350-1450 °C, granos ultrafinos) , adición de VC y Cr₃C₂ (0,10,5 % en peso) para inhibir el crecimiento del grano.

Enfriamiento rápido (10°C/min), desviación de grano $\leq \pm 10\%$.

Control de impurezas:

Materias primas de alta pureza (W >99,9%, negro de humo >99,9%).

Atmósfera inerte (pureza de H₂ >99,99%), O <0,05%.

Uniformidad:

Molienda de bolas de alta energía (1624 horas), homogeneidad >95%.

Dispersión ultrasónica (500 W, 10 min), aglomeración <0,5%.

Ejemplos:

YN8N: carbonizado al vacío a 1350 °C, VC 0,2 % en peso , tamaño de grano <0,5 μm , dureza 1800 HV (Sandvik, 2023).

4. Casos prácticos de aplicación

Pólvora WC YN6 (cuchillo):

de tungsteno (12 μm) + negro de humo, 1500°C, H₂, 2 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parámetros: carbono total 6,14%, tamaño de grano ~1,2 μm , carbono libre <0,005%.

Rendimiento: dureza 1400 HV, resistencia a la flexión 1,8 GPa (GB/T 38512015).

Aplicación: Herramienta resistente a la corrosión, vida útil de 2,5 horas.

Polvo WC YN10 (molde):

de tungsteno (5 μm) + negro de humo, 1800°C, H2, 4 horas.

Parámetros: carbono total 6,13%, tamaño de grano ~1 μm , fase η <0,3%.

Rendimiento: KIC 9 MPa·m^{1/2} , tasa de corrosión <0,005 mm/año (GB/T 43342020).

Aplicación: Molde químico , vida útil de 100.000 veces.

YN8N WC Rosa (Aviación):

Proceso: polvo de tungsteno (0,5 μm) + negro de humo, 1400°C, vacío, 1 hora, VC 0,2 % en peso .
de grano <0,5 μm , densidad 15,8 g/cm³ .

Propiedades: dureza 1800 HV, resistencia 2,2 GPa .

Aplicación: Herramientas de aviación, vida útil de 4 horas.

Tabla 5: Casos de aplicación de polvo WC

Marca	materia prima	Proceso de carbonización	de	Contenido de carbono	de	Grano micras	actuación	solicitud
YN6	Polvo de tungsteno + negro de humo	1500°C, H2, 2 horas	2	6,14%		~1.2	Dureza 1400 HV, resistencia 1,8 GPa	Vida útil de la herramienta: 2,5 horas
YN10	Óxido de tungsteno + negro de carbono	1800°C, H2, 4 horas	4	6,13%		~1	KIC 9 MPa·m ^{1/2} , corrosión <0,005 mm/año	Molde , vida útil 100.000 veces
YN8	de tungsteno + carbono negro+VC	1400°C, vacío, 1 hora	1	6,12%		<0,5	Dureza 1800 HV, resistencia 2,2 GPa	Herramienta de aviación, vida útil de 4 horas.

5. Conclusión

El proceso de carburación del polvo de carburo de tungsteno incluye:

la materia prima: polvo de tungsteno (0,55 μm , >99,9%) u óxido de tungsteno (110 μm , >99,95%), negro de humo (20100 nm, >99,9%).

Ingredientes: Contenido de carbono 6,156,20 % en peso (±0,05 %), teniendo en cuenta las pérdidas.

Mezcla: Molienda húmeda (8-24 horas, homogeneidad >95%) o mezcla seca (4-12 horas).

Reacción de carbonización: 1400-2000°C, H2/vacío, 16 horas, tamaño de grano 0,12 μm .

Post-procesamiento: trituración, molienda (D50 0,52 μm) , cribado , limpieza y secado.

Verificación de calidad: carbono total 6,13 ± 0,05%, carbono libre <0,01%, fase η <0,5%.

Controles clave:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Contenido de carbono: Desviación $< \pm 0,05\%$, evitando la fase η /carbono libre.

Grano: carbonización a baja temperatura (1350-1450°C) + inhibidor (VC 0,10,5 % en peso), controlado $< 0,5 \mu\text{m}$.

Impurezas: materias primas de alta pureza + atmósfera inerte, O $< 0,05\%$, Fe $< 0,01\%$.
estándar:

GB/T 34505 2017: Preparación en polvo, pureza $> 99,9\%$.

GB/T 5314 2011: Composición química, carbono $\pm 0,05\%$.

GB/T 18376 2014: Microestructura, fase $\eta < 0,5\%$.

GB/T 3851 2015: Resistencia a la flexión (verificación de la barra de prueba).

GB/T 7997 2017: Dureza.

GB/T 4334 2020: Resistencia a la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

Proceso de secado por aspersión y granulación de polvo mixto de carburo cementado
de carburo cementado (metal duro o carburo cementado) es un proceso clave para convertir la suspensión mixta molida en húmedo (que contiene carburo de tungsteno WC, cobalto Co, aditivos como TaC y un medio líquido como el etanol) en polvo granulado con buena fluidez (<30 s/50 g), tamaño de partícula uniforme (D50 50-200 μm) y densidad adecuada (35 g/cm^3). Es adecuado para prensado y sinterización e influye directamente en las propiedades del carburo cementado (como dureza 1400-2200 HV y resistencia a la flexión 1,5-2,5 GPa). A continuación, se describe en detalle el proceso, la selección de equipos, los factores de influencia, las medidas de optimización y las aplicaciones.

1. Descripción general del proceso

El secado por aspersión y la granulación incluyen los siguientes pasos:

Preparación de lechada mixta

Secado por aspersión

Granulación y recolección

Posprocesamiento y cribado

Control de calidad

Objetivo :

Obtener polvo granulado con alta fluidez y tamaño de partícula uniforme.

Reduce los defectos de sinterización (como porosidad $<0,1\%$), aumenta la dureza en un 5% y la resistencia a la flexión en un 10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Descripción detallada del proceso

2.1 Preparación de la suspensión mixta

Materias primas : WC (0,22 μm), Co (12 μm), aditivo (TaC <1 μm), medio líquido (etanol, relación sólido-líquido 1:11:2), agente formador (polietilenglicol PEG, 12%).

Proceso : agitación a alta velocidad (500-1000 rpm, 12 horas), contenido de sólidos 60-80%, viscosidad 100-500 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, filtración (200 mesh, < 75 μm).

Equipamiento : Tanque de mezcla de acero inoxidable (50500 L), mezclador de alto cizallamiento.

Objetivo : Garantizar una suspensión uniforme y evitar la obstrucción de las boquillas.

Datos : Contenido de sólidos 70%, viscosidad 200 $\text{mPa}\cdot\text{s}$, fluidez mejorada en un 20% (Sandvik, 2023).

2.2 Secado por aspersión

Proceso : La suspensión se atomiza en gotitas (10-100 μm), se seca con aire caliente (150-250 $^{\circ}\text{C}$) y las partículas se recogen mediante un separador ciclónico.

Equipamiento : Secador por atomización a presión (0,52 MPa) o centrífugo (10.000-20.000 rpm), cámara de secado en acero inoxidable (15 m de diámetro), separador ciclónico (eficiencia > 95%).

Parámetros : temperatura de entrada 150-250 $^{\circ}\text{C}$, temperatura de salida 80-120 $^{\circ}\text{C}$, caudal de lodo 10-100 L/h.

Propósito : Formar partículas esféricas y evaporar líquido.

Datos : Temperatura de entrada 180 $^{\circ}\text{C}$, temperatura de salida 100 $^{\circ}\text{C}$, D50 ~100 μm , fluidez <25 s/50 g (ScienceDirect, 2020).

2.3 Granulación y recolección

Proceso : Las gotas se secan en partículas esféricas (D50 50-200 μm), se recogen en un separador ciclónico y se enfrían a <40 $^{\circ}\text{C}$.

Características del gránulo : densidad aparente 35 g/cm^3 , contenido de humedad <0,5%.

Equipamiento : separador ciclónico multietapa, filtro de mangas, dispositivo de enfriamiento de aire.

Objetivo : Producir partículas fluidas y uniformes con una eficiencia de recuperación de >95%.

2.4 Posprocesamiento y cribado

Proceso : Si contenido de humedad > 0,5%, secado secundario (80 $^{\circ}\text{C}$, 2 horas, grado de vacío <100 Pa), tamizado (50200 μm), mezcla a baja velocidad (50 rpm, 1 hora).

Equipamiento : horno de secado al vacío (50200 L), tamiz vibratorio (2030 Hz).

Propósito : Distribución estrecha del tamaño de partículas, mejorar la fluidez en un 15%.

Datos : D50 100 μm , 10% de mejora en la uniformidad de la densidad de compactación (ISO 4499).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5 Control de calidad

Detección :

de partículas láser, D50 50200 μm .

Fluidez: Caudalímetro Hall, <30 s/50 g (GB/T 1482).

Densidad aparente: 35 g/cm³ (GB /T 1479).

Humedad: <0,5%.

Composición química: ICP (Co \pm 0,1%), XRF.

Contenido de oxígeno: <0,2%.

Morfología: SEM, partículas esféricas.

Norma : GB/T 3849 (prueba magnética de cobalto), ISO 4499 (análisis de microestructura).

Datos : fluidez <25 s/50 g, porosidad sinterizada <0,1%, estabilidad del rendimiento mejorada en un 15% (Sandvik, 2023).

3. Selección del equipo de secado por aspersión

La selección del equipo de secado por aspersión adecuado es crucial para la calidad de las partículas (D50 50-200 μm), la fluidez (<30 s/50 g) y la eficiencia de producción del polvo mixto de carburo cementado. A continuación, se presenta un análisis detallado de los tipos de equipos comunes, los criterios de selección, los escenarios aplicables, los parámetros clave y las recomendaciones de marcas.

3.1 Tipo de dispositivo

3.1.1 Secador por pulverización a presión

Principio : La bomba de alta presión atomiza la suspensión en gotas (20100 μm) a través de una boquilla (apertura de 0,52 mm) y el aire caliente la seca en partículas.

Características :

La presión de atomización es de 0,52 MPa, la partícula D50 es de 80150 μm y la distribución del tamaño de partícula es estrecha.

Estructura simple, bajo costo de mantenimiento, adecuado para producción a pequeña y mediana escala (50500 kg/h).

Adecuado para lodos con alto contenido de sólidos (70-80%).

Pros y contras :

Ventajas : partículas uniformes, bajo costo del equipo (alrededor de RMB 501 millones) y fácil operación.

Desventajas : El alto contenido de sólidos (>80%) obstruye fácilmente la boquilla y la proporción de partículas finas (<50 μm) es relativamente alta (1020%).

Escenarios aplicables :

Carburo de grano medio (como YG6, YG8, dureza 1400-1600 HV).

de corte de uso general y herramientas de minería, partícula D50 100150 μm .

Parámetros clave :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Presión de la boquilla: 12 MPa, D50 80120 μm .

Temperatura del aire de entrada: 150-200°C (etanol), humedad <0,5%.

Cámara de secado: diámetro 13 m, caudal de aire 1000-3000 m^3/h .

Capacidad: 50500 kg/h, eficiencia de recuperación 9095%.

3.1.2 Secador por aspersión centrífugo

Principio : La suspensión se atomiza en gotitas (1080 μm) mediante un disco centrífugo giratorio de alta velocidad (10 000-20 000 rpm) y se seca con aire caliente.

Características :

de alta velocidad, partícula D50 50100 μm , alta esfericidad, excelente fluidez (<25 s/50 g).

Adecuado para partículas ultrafinas y lodos de baja viscosidad (100-300 mPa·s) .

Alta capacidad de producción (100-1000 kg/h), adecuada para producción a gran escala.

Pros y contras :

Ventajas : partículas pequeñas y uniformes, fluidez mejorada en un 20%, eficiencia de recuperación > 98%.

Desventajas : Alto costo del equipo (100,2 millones de RMB), los discos centrífugos deben reemplazarse periódicamente.

Escenarios aplicables :

Carburo cementado de grano ultrafino (como herramientas de precisión, dureza 1800-2200 HV).

de alto rendimiento requieren D50 50100 μm .

Parámetros clave :

Velocidad del disco centrífugo: 15.000-20.000 rpm, D50 50-80 μm .

Temperatura de entrada: 180-250°C, densidad aparente 45 g/cm^3 .

Cámara de secado: diámetro 25 m, caudal de aire 2000-5000 m^3/h .

Capacidad: 1001000 kg/h, eficiencia de recuperación 9598%.

3.1.3 Secador por pulverización de doble fluido

Principio : El gas a alta presión (aire comprimido o nitrógeno, 0,20,5 MPa) se mezcla con la suspensión en la boquilla y se atomiza en gotas ultrafinas (550 μm) .

Características :

Partículas ultrafinas (D50 2080 μm) , adecuadas para aplicaciones de laboratorio o de alta precisión.

La capacidad de producción es baja (10100 kg/h) y el consumo de energía es alto.

Adecuado para lodos con bajo contenido de sólidos (50-60%).

Pros y contras :

Ventajas : partículas extremadamente finas, distribución estrecha del tamaño de partícula, adecuado para carburo cementado de grano ultrafino.

Desventajas : baja capacidad de producción, equipo complejo y alto costo (801,5 millones de RMB).

Escenarios aplicables :

carburos cementados de grano ultrafino (por ejemplo, herramientas de aviación, dureza 2000 HV).

Producción en lotes pequeños, partícula D50 < 80 μm .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Parámetros clave :

de aire: 0,30,5 MPa, D50 2050 μm .

Temperatura del aire de entrada: 150-200°C, humedad <0,3%.

Cámara de secado: diámetro 0,51,5 m, caudal de aire 5001500 m³/h.

Capacidad: 10100 kg/h, eficiencia de recuperación 8590%.

3.2 Base de selección

Escala de producción :

Pequeña escala (<100 kg/h): Tipo de doble fluido, adecuado para laboratorios o I+D.

Escala media (100500 kg/h): tipo presión, teniendo en cuenta tanto coste como eficiencia.

Gran escala (>500 kg/h): Centrífuga, alta capacidad, adecuada para industrialización.

Requisitos de partículas :

D50 100150 μm : Tipo de presión, adecuado para YG6 y YG8.

D50 50100 μm : Centrífuga, adecuado para herramientas de grano ultrafino.

D50 <80 μm : Tipo de fluido dual, aplicación de alta precisión .

Características de la suspensión :

Alto contenido de sólidos (70-80%): tipo presión, resistente a la obstrucción.

Baja viscosidad (100300 mPa·s) : centrífuga, atomización uniforme.

Bajo contenido de sólidos (50-60%): tipo de doble fluido, atomización ultrafina.

Requisitos ambientales :

Protección con gas inerte (nitrógeno): tipo centrífugo o de doble fluido, contenido de oxígeno < 0,1%.

Bajo nivel de polvo: equipado con un separador ciclónico de alta eficiencia y un colector de polvo tipo bolsa, la eficiencia de recuperación es >95%.

3.3 Escenarios aplicables

Tipo de presión : Herramientas de corte YG6, YG8, herramientas de minería, D50 100150 μm , capacidad 200 kg/h, bajo costo.

Centrífuga : herramientas y moldes de grano ultrafino, D50 50100 μm , capacidad de producción 500 kg/h, fluidez aumentada en un 20%.

Tipo de doble fluido : I+D de herramientas de aviación, D50 <80 μm , capacidad de producción 50 kg/h, dureza aumentada en un 5%.

3.4 Casos de aplicación

Herramienta YG6 :

Equipo : SPX Tipo de presión anhidro, 1 MPa, 180°C, capacidad 200 kg/h.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Resultados : D50 120 μm , fluidez 25 s/50 g, dureza 1500 HV, vida útil del mecanizado de fundición 2 horas.

Herramientas de corte de grano ultrafino :

Equipamiento : Centrífuga GEA Niro, 15.000 rpm, 180°C, capacidad 500 kg/h, manta de nitrógeno.

Resultados : D50 80 μm , fluidez 20 s/50 g, dureza 2000 HV, vida útil del acero inoxidable 4 horas.

Investigación y desarrollo de herramientas de aviación :

Equipamiento : Buchi tipo bifluído, 0,4 MPa, 150°C, capacidad 20 kg/h.

Resultados : D 50 50 μm , fluidez 22 s/50 g, dureza 2000 HV, mejora del rendimiento del lote de prueba en un 5%.

Soporte de datos :

Centrífuga: D50 50100 μm , eficiencia de recuperación 98% (Sandvik, 2023) .

Tipo de presión: D50 100150 μm , costo reducido en un 20% (ScienceDirect, 2020).

Tipo de dos fluidos: D50 2080 μm , distribución del tamaño de partícula más estrecha en un 10% (ISO 4499).

4. Factores influyentes

4.1 Características de la pulpa

Contenido sólido: 60-80%. Un contenido demasiado alto (>80%) obstruirá la boquilla, un contenido demasiado bajo (<60%) reducirá la densidad en un 10%.

Viscosidad: 100-500 $\text{mPa}\cdot\text{s}$. Si la viscosidad es demasiado alta (>1000 $\text{mPa}\cdot\text{s}$) , la atomización será desigual.

Agente formador: PEG 12%. Un exceso (>3%) provocará la adhesión de las partículas, y una cantidad insuficiente (<1%) reducirá la fluidez en un 20%.

4.2 Parámetros de secado por aspersión

Temperatura de entrada: 150-250 °C, demasiado alta (> 300 °C) provocará oxidación y la dureza disminuirá en un 5 %.

Presión/velocidad de atomización: 1 MPa o 15.000 rpm, afecta a D50.

Caudal de lodo: demasiado alto (> 100 L/h) partícula D50 > 200 μm .

4.3 Rendimiento del equipo

Boquilla/disco centrífugo: el desgaste produce una distribución del tamaño de partículas un 10 % más amplia.

Cámara de secado: flujo de aire desigual, tasa de aglomeración aumentada en un 15%.

Eficiencia de separación: <90% pérdida de polvo fino >10%.

4.4 Control ambiental

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Humedad: >50% aumento de humedad en 0,5%.

Temperatura: >300°C El contenido de oxígeno aumenta un 0,1%.

Polvo: Sin filtración, resistencia a la flexión reducida en un 10%.

Datos : contenido sólido 70%, temperatura de entrada 180°C, D50 100 μm , fluidez mejorada en un 20% (ScienceDirect, 2020).

5. Medidas de optimización

Fórmula de la suspensión : contenido sólido 70,75%, PEG 1,5%, fluidez aumentada en un 20%.

Control de parámetros : temperatura del aire de entrada 180°C, 1 MPa, D50 80-120 μm .

Equipo de alta eficiencia : tipo centrífugo, eficiencia de recuperación >98%.

Control ambiental : Protección de nitrógeno, contenido de oxígeno <0,1%, dureza aumentada en un 5%.

Post- tratamiento : Cribado 100-200 μm , reducción de porosidad 10%.

Efecto : fluidez <25 s/50 g, uniformidad de prensado aumentada en un 15%, dureza aumentada en un 5% y resistencia a la flexión aumentada en un 10%.

6. Casos prácticos de aplicación

Herramienta YG6 : tipo de presión (1 MPa, 180°C), D50 120 μm , fluidez 25 s/50 g, dureza 1500 HV, vida útil de mecanizado de fundición 2 horas.

Herramienta de grano ultrafino : centrífuga (15.000 rpm, 180°C), D50 80 μm , fluidez 20 s/50 g, dureza 2000 HV, vida útil para acero inoxidable 4 horas.

Molde YG15 : centrífugo (12.000 rpm, 200 °C), D50 150 μm , fluidez 28 s/50 g, resistencia a la flexión 2,5 GPa , vida útil 120.000 veces.

7. Conclusión

El proceso de secado por pulverización y granulación de polvo mixto de carburo cementado incluye la preparación de la suspensión mixta, el secado por pulverización, la granulación y recolección, el posprocesamiento y cribado, y el control de calidad. El objetivo es generar polvo granulado con buena fluidez (<30 s/50 g) y tamaño de partícula uniforme (D50 50-200 μm) . La selección del equipo incluye el tipo de presión (escala pequeña y mediana, D50 100-150 μm) , el tipo centrífugo (escala grande, D50 50-100 μm) y el tipo de fluido dual (investigación y desarrollo, D50 <80 μm) , que se seleccionan en función de la escala de producción, los requisitos de partículas, las características de la suspensión y el costo. La optimización de la fórmula de la suspensión, los parámetros, el equipo y el entorno puede mejorar la fluidez en un 20%, la dureza en un 5% y la resistencia a la flexión en un 10%.

Estándar :

GB/T 3849: Prueba magnética de cobalto.

ISO 4499: Análisis microestructural.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 1482: Prueba de fluidez.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

Polvo de níquel para carburo cementado a base de níquel

El carburo cementado a base de níquel (NickelBonded Cemented Carbide) utiliza níquel (Ni) como fase de enlace para reemplazar el cobalto (Co) en el carburo cementado a base de cobalto tradicional. Se usa ampliamente en escenarios que requieren alta resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas y resistencia al desgaste, como equipos químicos, herramientas de perforación petrolera y moldes de alta temperatura. El polvo de níquel es una materia prima clave para el carburo cementado a base de níquel, y su calidad afecta directamente la microestructura, las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión de la aleación. A continuación, se detallan las características, requisitos, métodos de preparación y aplicaciones del polvo de níquel utilizado en el carburo cementado a base de níquel, combinado con los estándares de la industria (como GB/T 5243, ISO 4499) y las últimas investigaciones (como Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020), todo en chino para garantizar que el contenido sea preciso, completo y fascinante.

1. Descripción general

El carburo cementado a base de níquel utiliza carburo de tungsteno (WC) como fase dura y níquel como fase aglutinante. Los grados típicos incluyen YN6 (6 % Ni) e YN10 (10 % Ni). En comparación con las aleaciones a base de cobalto (como YG6 e YG15), las aleaciones a base de níquel presentan:

Mayor resistencia a la corrosión : en entornos ácidos (HCl, H₂SO₄) y de alta temperatura, la tasa de corrosión se reduce en un 2050% (GB/T 43342020).

Excelente rendimiento a altas temperaturas : la temperatura de resistencia a la oxidación aumenta

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

entre 100 y 150 °C, adecuada para moldes de alta temperatura.

tenacidad ligeramente inferiores : la resistencia a la flexión (1,82,2 GPa) es un 1015 % inferior a la de la aleación a base de cobalto , y la tenacidad a la fractura (KIC 710 MPa·m^{1/2}) es un 510 % inferior.

del polvo de níquel (pureza, tamaño de partícula, morfología, contenido de oxígeno) afecta directamente:

Microestructura : homogeneidad > 95%, tamaño de grano 0,52 μm , fase η/carbono libre < 1% (GB/T 183762014).

Propiedades mecánicas : dureza 1400-1800 HV, desviación de resistencia a la flexión <5% (GB/T 38512015).

Resistencia a la corrosión : Tasa de corrosión <0,005 mm/año (GB/T 43342020).

A continuación se ofrece una explicación detallada del polvo de níquel desde cuatro aspectos: características, requisitos, preparación y aplicaciones prácticas.

2. Características y requisitos del polvo de níquel.

El carburo cementado a base de níquel tiene requisitos estrictos sobre el polvo de níquel, que debe cumplir con los estándares de composición química, propiedades físicas y micromorfología para garantizar la consistencia del rendimiento de la aleación.

2.1 Composición química

Pureza :

Requisitos: >99,9 % (fracción de masa), contenido total de impurezas <0,1 % (GB/T 53142011).

Principales impurezas:

Oxígeno (O): <0,05%, un alto nivel de oxígeno conduce a la descarburación (fase η, Co₃W₃C o Ni₃W₃C) y la dureza disminuye en un 510%.

Carbono (C): <0,01%, evitar el carbono libre (>1% reduce la resistencia en un 10%).

Hierro (Fe): <0,01%, el riesgo de microfisuras causadas por impurezas de Fe aumenta en un 15%.

Azufre (S), fósforo (P): <0,005% cada uno, evitar la fase de bajo punto de fusión (la fragilización aumenta en un 20%).

Método de prueba:

ICPMS: Detección de metales como Ni y Fe (precisión ±0,001%).

de carbono y azufre : detecta C y S (precisión ±0,001%).

Analizador de oxígeno y nitrógeno: detecta O (precisión ±0,01%).

Ejemplos :

YN10: Pureza del polvo de níquel 99,95%, O <0,03%, Fe <0,005% (Sandvik, 2023).

2.2 Propiedades físicas

Granularidad :

Rango: 0,52 μm (convencional), 0,20,8 μm (aleación de grano ultrafino).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Uniformidad: desviación D50 $<\pm 10\%$, D90/D10 <3 , lo que garantiza una uniformidad de mezcla $>95\%$.

significado:

El tamaño de partícula fino ($<1 \mu\text{m}$) mejora la uniformidad de la distribución de la fase de unión y aumenta la resistencia en un 10% .

Un grano demasiado fino ($<0,2 \mu\text{m}$) se aglomera fácilmente y la uniformidad se reduce entre un 5 y un 10% .

de prueba: Analizador de tamaño de partículas láser (precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$, GB/T 19077).

Superficie específica :

Rango: $13 \text{ m}^2/\text{g}$ (convencional), $35 \text{ m}^2/\text{g}$ (nanopolvo).

Importancia: La alta superficie específica mejora la actividad de sinterización y reduce la temperatura de sinterización en fase líquida en $2030 \text{ }^\circ\text{C}$.

Método de prueba: método BET (precisión $\pm 0,1 \text{ m}^2/\text{g}$).

Liquidez :

Requisitos: $<25 \text{ s}/50 \text{ g}$ (caudalímetro Hall, GB/T 1482-2010).

Importancia: Una buena fluidez garantiza la uniformidad del tocho prensado ($>95\%$) y reduce la porosidad en un $0,01\%$.

Ejemplos :

YN6: tamaño de partícula $11,5 \mu\text{m}$, D50 $\sim 1,2 \mu\text{m}$, fluidez $\sim 20 \text{ s}/50 \text{ g}$ (ScienceDirect, 2020).

2.3 Morfología microscópica

Apariencia :

Requisitos: Casi esférico o poliédrico, esfericidad $> 0,9$ (observación SEM, $1000\times$).

Evitar: palitos, escamas o partículas irregulares, que reducen la fluidez entre un $10-15\%$.

Estado de la superficie :

Liso, sin grietas, poros ni adherencias (inspección SEM, defecto $<0,1 \mu\text{m}$).

Capa de óxido superficial: $<10 \text{ nm}$ (análisis XPS), evitar la descarburación por sinterización.

Reunión :

Tasa de aglomeración: $<1\%$. Un valor demasiado alto provocará una microestructura irregular y aumentará la porosidad en un $0,02\%$.

Método de prueba: SEM (análisis estadístico de la relación de partículas aglomeradas), verificación de dispersión ultrasónica.

Ejemplos :

YN10: Polvo de níquel casi esférico, tasa de aglomeración $<0,5\%$, capa de óxido superficial $<5 \text{ nm}$ (Sandvik, 2023).

2.4 Otros requisitos

Propiedades magnéticas :

El polvo de níquel es débilmente magnético, con una magnetización de saturación de $\sim 55 \text{ emu/g}$ (Ni puro) y una desviación de $<\pm 5 \text{ emu/g}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método de prueba: Magnetómetro de muestra vibratoria (VSM, precisión ±0,1 emu/g).

Importancia: Evaluación indirecta de impurezas (magnetización de Fe) y grado de oxidación.

Condiciones de almacenamiento :

Humedad: <40%, Temperatura: 2025°C, Atmósfera inerte (Ar o N2), Evitar la oxidación (O aumenta un 0,02%).

Envasado al vacío, periodo de conservación < 6 meses.

Estándar :

GB/T 53142011: Composición química (pureza > 99,9%).

GB/T 183762014: Microestructura (aglomeración <1%).

GB/T 1482-2010: Fluidez (<25 s/50 g).

Características y requisitos del polvo de níquel

característica	Requerir	Método de prueba	Ejemplo (YN10)
pureza	>99,9%, impurezas <0,1%	ICPMS, análisis de carbono y azufre	99,95%, Fe <0,005%
Contenido de oxígeno	<0,05%	Analizador de oxígeno y nitrógeno	<0,03%
Contenido de carbono	<0,01%	Analizador de carbono y azufre	<0,005%
granularidad	0,52 μm (convencional), 0,20,8 μm (grano ultrafino), desviación D50 <±10 %	Análisis del tamaño de partículas láser	0,81,2 μm, D50 ~1,0 μm
Área de superficie específica	15 m²/g	APUESTA	34 m²/g
Liquidez	<25 s/50 g	Medidor de flujo Hall	~18 s/50 g
Morfología	Casi esférico, esfericidad > 0,9, aglomeración < 1 %	Microscopía electrónica de barrido (SEM), XPS	Esfericidad > 0,95, aglomeración < 0,5 %
Propiedades magnéticas	~55 emu/g, desviación <±5 emu/g	VSM	54 ± 2 emú/g
Condiciones de almacenamiento	Humedad <40%, protección Ar /N2, < 6 meses		Sellado al vacío, protegido contra Ar

3. Método de preparación del polvo de níquel.

El polvo de níquel debe garantizar una alta pureza, un tamaño de partícula fino y una morfología uniforme para cumplir con los requisitos del carburo cementado. Los métodos comunes incluyen:

3.1 Proceso carbonílico

principio :

El níquel reacciona con el monóxido de carbono (CO) para formar carbonilo de níquel [Ni(CO)4], que se descompone en polvo de níquel de alta pureza y CO al calentarse.

Reacción: Ni + 4CO → Ni(CO)4 (gaseoso, 5060°C), Ni(CO)4 → Ni + 4CO (descomposición,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

200250°C).

Proceso :

Materias primas: níquel de alta pureza (>99,9%), gas CO (pureza>99,99%).

Equipo: reactor de carbonilo (presión 0,1-0,5 MPa), horno de descomposición (vacío o atmósfera inerte).

Parámetros: temperatura de descomposición 200300°C, caudal de aire 0,51 L/min.

Clasificación: Clasificación por cribado o flujo de aire, tamaño de partícula controlado 0,52 μm .

Características :

Pureza: >99,95%, O <0,03%, C <0,01%.

Morfología: Casi esférica, esfericidad>0,95, tasa de aglomeración<0,5%.

de partícula: 0,52 μm , desviación D50 <±5%.

Ventajas :

Alta pureza, impurezas (Fe, S) <0,005%.

La morfología es regular y la fluidez es buena (~18 s/50 g).

insuficiente :

El equipo es complejo, el CO es altamente tóxico y el coste es entre un 20 y un 30 % más alto.

solicitud :

Barra de prueba YN10: polvo de carbonil níquel, tamaño de partícula ~1 μm , dureza 1500 HV (Sandvik, 2023).

3.2 Reducción química (Reducción hidrometalúrgica)

principio :

La solución de sal de níquel (como NiSO₄, NiCl₂) se reduce a polvo de níquel mediante un agente reductor (como H₂, NaBH₄).

Reacción: Ni²⁺ + H₂ → Ni + 2H⁺ (H₂ a alta presión, 150-200 °C).

Proceso :

Materias primas: NiSO₄ (>99,9%), agente reductor (pureza H₂ >99,99%).

Equipo: Reactor de alta presión (510 MPa), sistema de filtración/secado.

Parámetros: pH 8-10, temperatura 150-200°C, presión de H₂ 25 MPa.

Post-tratamiento: lavado (agua desionizada), secado al vacío (80°C, <10⁻² Pa) .

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,05%, Fe <0,01%.

Morfología: poliedro o casi esférico, esfericidad 0,80-9.

de partícula: 0,53 μm , desviación D50 <±10%.

Ventajas :

Menor costo (15-20% menor que el proceso carbonílico).

Adecuado para producción en masa, con tamaño de partícula ajustable.

insuficiente :

La morfología es ligeramente irregular y la tasa de aglomeración es del 12%.

El contenido de oxígeno es ligeramente alto (0,050,1%) y necesita un control estricto.

solicitud :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Barra de prueba YN6: polvo de níquel reducido, tamaño de partícula 1,5 μm , resistencia a la flexión 1,8 GPa (ScienceDirect, 2020).

3.3 Atomización

principio :

El níquel fundido (>99,9%) se atomiza en partículas finas mediante gas a alta presión (N₂, Ar) o agua.

Proceso :

Materia prima: lingote de níquel de alta pureza (>99,9%).

Equipamiento: horno de inducción al vacío (1450-1500°C), torre de atomización (presión de gas 510 MPa).

Parámetros: apertura de la boquilla 0,51 mm, velocidad de enfriamiento $10^3 \cdot 10^4$ °C/s.

Clasificación: clasificación de flujo de aire, tamaño de partícula 15 μm .

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,08%, C <0,02%.

Morfología: esférica, esfericidad >0,9.

de partícula: 15 μm , desviación D50 $\leq \pm 15\%$.

Ventajas :

Morfología regular y excelente fluidez (~20 s/50 g).

Adecuado para polvo de níquel de partículas grandes (> 2 μm).

insuficiente :

de partícula es demasiado grande (>1 μm), lo que no es adecuado para aleaciones de grano ultrafino.

El contenido de oxígeno es alto (0,050,1%).

solicitud :

Barra de prueba YN15 de gran tamaño: polvo de níquel atomizado, tamaño de partícula 23 μm , KIC 10 MPa·m^{1/2}.

3.4 Electrodeposición

principio :

La solución de sal de níquel (como NiSO₄) se produce mediante deposición electrolítica de polvo de níquel.

Reacción: $\text{Ni}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Ni}$ (cátodo, densidad de corriente 100500 A/m²).

Proceso :

Materias primas: NiSO₄ (>99,9%), electrolito (pH 35).

Equipamiento: celda electrolítica (cátodo de acero inoxidable), fuente de alimentación de corriente constante.

Parámetros: temperatura 5060°C, densidad de corriente 200400 A/m², tiempo 24 horas.

Post-tratamiento: lavado, secado (80°C, <10⁻² Pa), molienda (<2 μm).

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,1%, Fe <0,02%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Morfología: dendrítica o irregular, necesita trituración.

Tamaño de partícula: 110 μm (0,52 μm después de la molienda) .

Ventajas :

30% más bajo que el proceso carbonílico) .

Adecuado para producción a gran escala.

insuficiente :

La morfología es irregular y la molienda aumenta la aglomeración (23%).

El contenido de oxígeno es alto (0,10,2%) y necesita ser optimizado.

solicitud :

Varilla de prueba YN6 de bajo costo: polvo de níquel electrolítico, tamaño de partícula 12 μm , dureza 1400 HV.

3.5 Medidas de optimización

Reducir los niveles de oxígeno :

atmósfera inerte (Ar , O₂ <0,005%), el oxígeno se reduce a <0,03%.

vacío (<10⁻² Pa) para evitar la oxidación.

Granularidad del control :

Después de la dispersión ultrasónica (500 W, 10 min), la tasa de aglomeración se redujo a <0,5%.

de aire (precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$) , desviación D50 < $\pm 5\%$.

Mejorar la apariencia :

Método de carbonilo + esferoidización de plasma, la esfericidad aumentó a >0,95.

Método de reducción química más modificación de la superficie (ácido esteárico 0,1%), fluidez aumentada en un 10%.

Ejemplos :

YN10: Polvo de carbonil níquel + dispersión ultrasónica, tamaño de partícula 0,8 μm , aglomeración <0,3% (Sandvik, 2023).

Métodos de preparación de polvo de níquel

Método	Pureza	Tamaño de partícula (μm)	Morfología	Contenido de oxígeno	Fluidez (s/50 g)	Costo	Grados aplicables
Método del carbonilo	>99,95%	0,52	Casi esférico, >0,95	<0,03%	~18	Alto	Yn10, yn8n
Método de reducción química	>99,9%	0,53	Poliedro, 0.80.9	<0,05%	~20	Medio	Yn6
Atomización	>99,9%	15	Esférico, >0,9	<0,08%	~20	Medio a alto	Yn15
Electrólisis	>99,9%	0,52 (molienda)	Irregular, 0.60.8	<0,1%	~25	Bajo	Yn6

4. Aplicación de polvo de níquel en carburo cementado a base de níquel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

El polvo de níquel afecta directamente la preparación y el rendimiento de las barras de prueba de carburo cementado a base de níquel. A continuación, se describen los grados y procesos específicos.

4.1 YN6 (6 % Ni, herramienta resistente a la corrosión general)

Requisitos del polvo de níquel :

Pureza: >99,95%, O <0,03%, Fe <0,005%.

de partícula: 11,5 μm , D50 ~1,2 μm , esfericidad >0,9.

Preparación: Método carbonílico, fluidez ~20 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (94 % en peso , 12 μm) , Ni (6 % en peso), Cr3C2 (0,3 % en peso) .

Composición : molienda húmeda (12-14 h, PEG 1,5%), D50 80-150 μm .

Prensado : CIP (200-250 MPa), tocho 6,2×6,2×43 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1400°C, <10⁻³ Pa) + HIP (1400°C, 100 MPa).

Mecanizado : rectificado (Ra < 0,4 μm) , entallado por chispa (0,25 ± 0,02 mm).

actuación :

Dureza: 1400 ± 50 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 1,8 ± 0,1 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 7 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Resistencia a la corrosión: 0,01 mm/año (5% HCl, GB/T 43342020).

Ejemplos :

Varilla de prueba YN6: polvo de carbonil níquel, tamaño de grano ~1,2 μm , vida útil de corte 2,5 horas (Sandvik, 2023).

4.2 YN10 (10 % Ni, molde químico)

Requisitos del polvo de níquel :

Pureza: >99,95%, O <0,03%, C <0,01%.

de partícula: 0,81,2 μm , D50 ~ 1,0 μm , aglomeración <0,5%.

Preparación: método carbonilo + dispersión ultrasónica, fluidez ~18 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (90 % en peso , 0,51,5 μm) , Ni (10 % en peso), VC (0,2 % en peso) .

Mezcla : Molienda de bolas de alta energía (16 h, PEG 1%), D50 50100 μm .

Prensado : CIP (250300 MPa), tocho 5,0×10,0×40 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1380 °C, <5×10⁻⁴ Pa) + HIP (1380 °C, 120 MPa).

Procesamiento : rectificado de ultraprecisión (Ra < 0,2 μm) , entalla láser de femtosegundos (0,25 ± 0,01 mm).

actuación :

Dureza: 1500 ± 50 HV.

Resistencia a la flexión: 2,0 ± 0,1 GPa .

Tenacidad a la fractura: 9 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Resistencia a la corrosión: <0,005 mm/año (5% HCl).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ejemplos :

Varilla de prueba YN10: polvo de carbonil níquel, resistencia a la corrosión 100.000 veces (ScienceDirect, 2020).

4.3 Grano ultrafino YN8N (8 % Ni, herramientas de aviación)

Requisitos del polvo de níquel :

Pureza: >99,95%, O <0,02%, Fe <0,005%.

de partícula : 0,20,8 μm , D50 ~0,5 μm , esfericidad>0,95.

Preparación: método del carbonilo + esferoidización de plasma, fluidez ~15 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (91,5 % en peso , 0,20,4 μm) , Ni (8 % en peso), Cr3C2 (0,4 % en peso), VC (0,1 % en peso).

Mezcla : molienda de bolas de alta energía (1820 h, PEG modificado 1%), D50 30100 μm .

Prensado : CIP (300350 MPa), tocho 6,3×6,3×44 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1350 °C, <5×10⁻⁴ Pa) + HIP (1350 °C, 150 MPa).

Procesamiento : rectificado de ultraprecisión (Ra < 0,2 μm) , entalla láser de femtosegundos (0,25 ± 0,005 mm).

actuación :

Dureza: 1800 ± 50 HV.

Resistencia a la flexión: 2,2 ± 0,1 GPa .

Tenacidad a la fractura: 8 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Resistencia a la corrosión: <0,003 mm/año.

Ejemplos :

Varilla de prueba YN8N: polvo de carbonil níquel, tamaño de grano <0,5 μm , vida útil de la herramienta de aviación 4 horas (Sandvik, 2023).

Grados de carburo cementado a base de níquel y aplicaciones de polvo de níquel

Marca	Contenido de níquel	Tipo de polvo de níquel	Tamaño de partícula (μm)	Puntos clave de la tecnología	actuación	solicitud
YN6	6%	Método del carbonilo	11.5	1400 °C sinterizado, molido Ra <0,4 μm	Dureza 1400 HV, resistencia 1,8 GPa , corrosión 0,01 mm/año	Vida útil de la herramienta resistente a la corrosión: 2,5 horas
YN10	10%	Método del carbonilo	0.81.2	HIP de 1380 °C, entallado láser de femtosegundos	Dureza 1500 HV, KIC 9 MPa·m ^{1/2} , corrosión <0,005 mm/año	Moho químico, vida útil 100.000 veces
YN8	8%	Carbonilo + Esferoidización	0.20.8	Sinterizado a 1350°C, tamaño de grano <0,5 μm	Dureza 1800 HV, resistencia 2,2 GPa , corrosión <0,003 mm/año	Herramienta de aviación, vida útil de 4 horas.

5. Factores clave para la selección del polvo de níquel

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

La selección del polvo de níquel requiere una consideración exhaustiva de las propiedades de la aleación, las condiciones del proceso y los costos:

Alta resistencia a la corrosión (como YN10):

La opción preferida es el polvo de carbonilo níquel, con una pureza de >99,95%, un tamaño de partícula de 0,81,2 μm y O <0,03%.

Razón: La morfología regular y el bajo nivel de oxígeno garantizan que la fase η sea <0,5 % y la tasa de corrosión sea <0,005 mm/año.

Aleaciones de grano ultrafino (como YN8N):

Se utilizó el método de carbonilo + esferoidización de plasma, el tamaño de partícula fue de 0,20,8 μm y la esfericidad fue >0,95.

Motivo: Control de tamaño de grano fino <0,5 μm , dureza aumentada en un 510% .

Sensible a los costes (como YN6):

Utilice el método de reducción química o electrólisis, tamaño de partícula 12 μm , O < 0,05%.

Motivo: coste 2030% menor y cumple requisitos generales de herramientas (resistencia 1,8 GPa) .

Varilla de prueba de gran tamaño (como YN15):

Se seleccionó el método de atomización, con un tamaño de partícula de 23 μm y una fluidez de ~20 s/50 g.

Motivo: Adecuado para partículas grandes, uniformidad de compresión >95%.

Selección de polvo de níquel y escenarios de aplicación

Escenario de aplicación	de Polvo de níquel recomendado	Tamaño de partícula (μm)	Características principales	Mejoras de rendimiento
Alta resistencia a la corrosión (YN10)	Método del carbonilo	0.81.2	Pureza > 99,95%, O < 0,03%	Tasa de corrosión <0,005 mm/año, fase η <0,5%
Grano ultrafino (YN8N)	Carbonilo + Esferoidización	0.20.8	Esfericidad > 0,95, aglomeración < 0,5 %	Dureza aumentada en un 510%, tamaño de grano <0,5 μm
Sensible al coste (YN6)	Reducción química/electrólisis	12	Pureza >99,9%, coste entre un 20 y un 30% inferior	Resistencia 1,8 GPa , cumple requisitos generales
Tamaño grande (YN15)	Atomización	veintitrés	Fluidez ~20 s/50 g	Homogeneidad > 95%, KIC 10 MPa·m ^{1/2}

6. Conclusión

El polvo de níquel utilizado en el carburo cementado a base de níquel debe cumplir los siguientes requisitos:

Composición química : pureza > 99,9%, O < 0,05%, Fe < 0,01%, C < 0,01% (GB/T 53142011).

Propiedades físicas : tamaño de partícula 0,52 μm (convencional) o 0,20,8 μm (grano ultrafino) , fluidez <25 s/50 g (GB/T 1482-2010).

Micromorfología : Casi esférico, esfericidad>0,9, aglomeración<1% (GB/T 183762014).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método de preparación :

Método carbonilo : alta pureza (>99,95%), tamaño de partícula 0,52 μm , adecuado para YN10 y YN8N.

Método de reducción química : bajo costo, tamaño de partícula 0,53 μm , adecuado para YN6.

Método de atomización : partículas grandes (15 μm) , adecuadas para varillas de prueba de gran tamaño.

Método electrolítico : bajo costo, requiere molienda, adecuado para grados generales.

Ejemplos de aplicación :

de carbonil níquel (11,5 μm) , dureza 1400 HV, resistencia 1,8 GPa .

YN10: Polvo de carbonil níquel (0,81,2 μm) , KIC 9 $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, resistencia a la corrosión <0,005 mm/año.

YN8N: Polvo de níquel carbonilo + esferoidizado (0,20,8 μm) , dureza 1800 HV, tamaño de grano <0,5 μm .

El uso de polvo de níquel (como la dispersión ultrasónica y la protección inerte) puede mejorar la uniformidad en un 20 % , reducir la fase η en un 50 % y mejorar la consistencia del rendimiento de la aleación (desviación <3 %). En el futuro, el nanopolvo de níquel (<0,2 μm) y las tecnologías de preparación ecológicas (como la reducción a baja temperatura) mejorarán aún más el rendimiento del carburo cementado a base de níquel.

estándar :

GB/T 5314 2011: Composición química.

GB/T 18376 2014: Microestructura.

GB/T 1482 2010: Liquidez.

GB/T 3851 2015: Resistencia a la flexión.

GB/T 7997 2017: Dureza.

GB/T 4334 2020: Resistencia a la corrosión.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

Polvo de cobalto utilizado en carburo cementado a base de cobalto

El carburo cementado a base de cobalto (carburo cementado aglomerado con cobalto) utiliza cobalto (Co) como fase aglutinante y combina fases duras como el carburo de tungsteno (WC). Se utiliza ampliamente en herramientas de corte, moldes, herramientas de minería y otros campos gracias a su excelente resistencia a la flexión (1,5-2,5 GPa), tenacidad a la fractura ($812 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) y dureza (1400-2200 HV). Como materia prima clave para el carburo cementado a base de cobalto, la calidad del polvo de cobalto afecta directamente la microestructura, las propiedades mecánicas y las propiedades de procesamiento de la aleación. A continuación, se detallan las características, los requisitos, los métodos de preparación y las aplicaciones del polvo de cobalto utilizado en el carburo cementado a base de cobalto, combinado con los estándares nacionales chinos (como GB/T 5243, GB/T 5314), los estándares internacionales (como ISO 4499) y las últimas investigaciones (como Sandvik, 2023; ScienceDirect, 2020), todo en chino para garantizar que el contenido sea preciso, detallado y fascinante.

1. Descripción general

El carburo cementado a base de cobalto utiliza cobalto como fase aglutinante. Los grados típicos incluyen YG6 (6 % Co, herramientas de corte), YG15 (15 % Co, moldes) y YG8N (8 % Co, herramientas de corte de aviación de grano ultrafino). Las funciones del polvo de cobalto en la aleación incluyen:

Fase dura de unión : Refuerza la unión de las partículas de WC y aumenta la resistencia a la flexión en un 2030%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tenacidad mejorada : La ductilidad de la fase de cobalto permite que el KIC alcance $812 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$.

Actividad de sinterización : El bajo punto de fusión del cobalto ($1495 \text{ }^\circ\text{C}$) promueve la sinterización en fase líquida, reduciendo la porosidad a $<0,01 \%$.

del polvo de cobalto (pureza, tamaño de partícula, morfología, contenido de oxígeno) afecta directamente:

Microestructura : tamaño de grano $0,52 \text{ } \mu\text{m}$ (convencional) o $<0,5 \text{ } \mu\text{m}$ (grano ultrafino) , fase η /carbono libre $<1 \%$ (GB/T 183762014).

Propiedades mecánicas : dureza 14002200 HV , desviación de resistencia a la flexión $<5\%$ (GB/T 38512015).

Estabilidad del proceso : uniformidad de mezcla $> 95\%$, resistencia en verde del blanco $> 6 \text{ MPa}$.
A continuación se ofrece una explicación en profundidad del polvo de cobalto desde cuatro aspectos: características, requisitos, métodos de preparación y aplicaciones prácticas.

2. Características y requisitos del polvo de cobalto

El carburo cementado a base de cobalto tiene requisitos estrictos sobre el polvo de cobalto, que debe cumplir con los estándares de composición química, propiedades físicas y micromorfología para garantizar la consistencia del rendimiento de la aleación.

2.1 Composición química

Pureza :

Requisitos: $>99,9 \%$ (fracción de masa), contenido total de impurezas $<0,1 \%$ (GB/T 53142011).

Principales impurezas:

Oxígeno (O): $<0,05\%$, un alto contenido de oxígeno conduce a la descarburación (fase η , $\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$) y la dureza disminuye en un 510% .

Carbono (C): $<0,01\%$, evitar el carbono libre ($>1\%$ reduce la resistencia en un 10%).

Hierro (Fe): $<0,01\%$. El riesgo de microfisuras causadas por impurezas de Fe aumenta entre un 10 y un 15% .

Azufre (S), fósforo (P): $<0,005\%$ cada uno, evitar la fase de bajo punto de fusión (la fragilidad aumenta entre un 15 y un 20%).

Níquel (Ni): $<0,05 \%$. Un contenido demasiado alto de Ni cambiará las propiedades magnéticas y afectará la prueba magnética de cobalto (GB/T 3849-2015).

Método de prueba:

ICPMS: Detección de metales como Co, Fe, Ni (precisión $\pm 0,001\%$).

de carbono y azufre : detecta C y S (precisión $\pm 0,001\%$).

Analizador de oxígeno y nitrógeno: detecta O (precisión $\pm 0,01\%$).

Ejemplos :

YG8N: Pureza del polvo de cobalto $99,95\%$, O $<0,03\%$, Fe $<0,005\%$ (Sandvik, 2023).

2.2 Propiedades físicas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Granularidad:

Rango: 0,52 μm (convencional), 0,20,8 μm (aleación de grano ultrafino).

Uniformidad: desviación D50 $<\pm 10\%$, D90/D10 <3 , lo que garantiza una uniformidad de mezcla $>95\%$.

significado:

El tamaño de partícula fino ($<1 \mu\text{m}$) mejora la uniformidad de la distribución de la fase de unión y aumenta la resistencia en un 1015%.

Un grano demasiado fino ($<0,2 \mu\text{m}$) se aglomera fácilmente y la uniformidad se reduce entre un 5 y un 10 % .

de prueba: Analizador de tamaño de partículas láser (precisión $\pm 0,01 \mu\text{m}$, GB/T 19077).

Superficie específica :

Rango: 13 m^2/g (convencional), 36 m^2/g (nanopolvo).

Importancia: La alta superficie específica mejora la actividad de sinterización y reduce la temperatura de sinterización en fase líquida en 2030 $^{\circ}\text{C}$.

Método de prueba: método BET (precisión $\pm 0,1 \text{m}^2/\text{g}$).

Liquidez :

Requisitos: $<25 \text{s}/50 \text{g}$ (caudalímetro Hall, GB/T 1482-2010).

Importancia: Una buena fluidez garantiza la uniformidad del tocho prensado ($>95\%$) y reduce la porosidad en un 0,01%.

Densidad aparente :

Rango: 1,5-2,5 g/cm^3 (convencional), 1,0-2,0 g/cm^3 (grano ultrafino).

Importancia: Una alta densidad aparente mejora la resistencia en verde del tocho ($>6 \text{MPa}$).

Método de prueba: Método de embudo (precisión $\pm 0,01 \text{g}/\text{cm}^3$) .

Ejemplos :

YG6: tamaño de partícula 11,5 μm , D50 $\sim 1,2 \mu\text{m}$, fluidez $\sim 20 \text{s}/50 \text{g}$, BET $\sim 2 \text{m}^2/\text{g}$ (ScienceDirect, 2020).

2.3 Morfología microscópica

Apariencia :

Requisitos: Casi esférico o poliédrico, esfericidad $> 0,9$ (observación SEM, 1000 \times).

Evitar: palitos, escamas o partículas irregulares, que reducen la fluidez entre un 10-15%.

Estado de la superficie :

Liso, sin grietas, poros ni adherencias (inspección SEM, defecto $<0,1 \mu\text{m}$).

Capa de óxido superficial: $<10 \text{nm}$ (análisis XPS), evitar la descarburación por sinterización.

Reunión :

Tasa de aglomeración: $<1 \%$. Un valor demasiado alto provocará una microestructura irregular y aumentará la porosidad en un 0,02 %.

Método de prueba: SEM (análisis estadístico de la relación de partículas aglomeradas), verificación de dispersión ultrasónica.

Ejemplos :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

YG8N: Polvo de cobalto casi esférico, tasa de aglomeración <0,5%, capa de óxido superficial <5 nm (Sandvik, 2023).

2.4 Otros requisitos

Propiedades magnéticas :

El polvo de cobalto es ferromagnético, con una magnetización de saturación de ~160 emu/g (Co puro) y una desviación de $\leq \pm 5$ emu/g.

Método de prueba: Magnetómetro de muestra vibratoria (VSM, precisión $\pm 0,1$ emu/g).

Importancia: Evaluación indirecta de impurezas (Fe aumenta la magnetización, Ni la disminuye) y del grado de oxidación.

Condiciones de almacenamiento :

Humedad: <40%, Temperatura: 2025°C, Atmósfera inerte (Ar o N2), Evitar la oxidación (O aumenta un 0,02%).

Envasado al vacío, periodo de conservación < 6 meses.

Estándar :

GB/T 53142011: Composición química (pureza > 99,9%).

GB/T 183762014: Microestructura (aglomeración <1%).

GB/T 1482-2010: Fluidez (<25 s/50 g).

GB/T 3849-2015: Propiedades magnéticas (evaluación indirecta del contenido de carbono).

2.5 Parámetros clave del polvo de cobalto

Parámetro	Requisitos generales	Requisitos de grano ultrafino	Método de prueba	Ejemplo (yg8n)
Pureza	>99,9%	>99,95%	Análisis de carbono y azufre, ICPM	99,95%
Contenido de oxígeno	<0,05%	<0,03%	Analizador de oxígeno y nitrógeno	<0,03%
Contenido de hierro	<0,01%	<0,005%	Icpms	<0,005%
Tamaño de partícula (d50)	0,52 micras	0,20,8 μm	Análisis del tamaño de partículas láser	~0,5 micras
Área de superficie específica	13 m ² /g	36 m ² /g	Apuesta	~4 m ² /g
Liquidez	<25 s/50 g	<20 s/50 g	Medidor de flujo Hall	~15 s/50 g
Morfología	Casi esférico, esfericidad > 0,9	Casi esférico, esfericidad > 0,95	Sin	Esfericidad>0,95
Tasa de reunión	<1%	<0,5%	Sem, dispersión ultrasónica	<0,3%
Magnetización	~160 emu/g, desviación $\leq \pm 5$ emu/g	~160 emu/g, desviación $\leq \pm 3$ emu/g	Vsm	~158 emu/g

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3. Método de preparación del polvo de cobalto

El polvo de cobalto debe garantizar una alta pureza, un tamaño de partícula fino y una morfología uniforme para cumplir con los requisitos del carburo cementado. Los métodos comunes incluyen:

3.1 Reducción química (Reducción hidrometalúrgica)

Principio :

La solución de sal de cobalto (como CoSO_4 , CoCl_2) se reduce a polvo de cobalto mediante un agente reductor (como H_2 , NaBH_4).

Reacción: $\text{Co}^{2+} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Co} + 2\text{H}^+$ (H_2 a alta presión, 150-200 °C).

Proceso :

Materias primas: CoSO_4 (>99,9%), agente reductor (pureza H_2 >99,99%).

Equipo: Reactor de alta presión (510 MPa), sistema de filtración/secado.

Parámetros: pH 8-10, temperatura 150-200°C, presión de H_2 25 MPa.

Post-tratamiento: lavado (agua desionizada), secado al vacío (80°C, $<10^{-2}$ Pa).

Clasificación: clasificación por flujo de aire, tamaño de partícula controlado 0,52 μm .

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,05%, Fe <0,01%.

Morfología: poliedro o casi esférico, esfericidad 0,80-9.

de partícula: 0,53 μm , desviación D50 $\leq \pm 10\%$.

Ventajas :

Menor costo (15-20% menor que el proceso carbonílico).

Adecuado para producción en masa, con tamaño de partícula ajustable.

insuficiente :

La morfología es ligeramente irregular y la tasa de aglomeración es del 12%.

El contenido de oxígeno es ligeramente alto (0,050,1%) y necesita un control estricto.

solicitud :

Barra de prueba YG6: polvo de cobalto reducido, tamaño de partícula 1,5 μm , resistencia a la flexión 2,0 GPa (ScienceDirect, 2020).

3.2 Proceso carbonílico

Principio :

El cobalto reacciona con el monóxido de carbono (CO) para formar carbonilo de cobalto [$\text{Co}_2(\text{CO})_8$], que se descompone en polvo de cobalto de alta pureza y CO al calentarse.

Reacción: $2\text{Co} + 8\text{CO} \rightarrow \text{Co}_2(\text{CO})_8$ (gaseoso, 100-150°C), $\text{Co}_2(\text{CO})_8 \rightarrow 2\text{Co} + 8\text{CO}$ (descomposición, 250-300°C).

Proceso :

Materias primas: cobalto de alta pureza (> 99,9%), gas CO (pureza > 99,99%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Equipo: reactor de carbonilo (presión 0,51 MPa), horno de descomposición (vacío o atmósfera inerte).

Parámetros: temperatura de descomposición 250350°C, caudal de aire 0,51 L/min.

Clasificación: Clasificación por cribado o flujo de aire, tamaño de partícula controlado 0,52 μm .

Características :

Pureza: >99,95%, O <0,03%, C <0,01%.

Morfología: Casi esférica, esfericidad>0,95, tasa de aglomeración<0,5%.

de partícula: 0,52 μm , desviación D50 $\leq\pm 5\%$.

Ventajas :

Alta pureza, impurezas (Fe, S) <0,005%.

La morfología es regular y la fluidez es buena (~18 s/50 g).

Insuficiente :

El equipo es complejo, el CO es altamente tóxico y el coste es entre un 20 y un 30 % más alto.

Solicitud :

Barra de prueba YG8N: polvo de carbonil cobalto, tamaño de partícula ~0,8 μm , dureza 2000 HV (Sandvik, 2023).

3.3 Atomización

Principio :

El cobalto fundido (>99,9%) se atomiza en partículas finas mediante gas a alta presión (N₂, Ar) o agua.

Proceso :

Materia prima: lingote de cobalto de alta pureza (>99,9%).

Equipamiento: horno de inducción al vacío (1500-1550°C), torre de atomización (presión de gas 510 MPa).

Parámetros: apertura de la boquilla 0,51 mm, velocidad de enfriamiento $10^3 10^4$ °C/s.

Clasificación: clasificación de flujo de aire, tamaño de partícula 15 μm .

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,08%, C <0,02%.

Morfología: esférica, esfericidad>0,9.

de partícula: 15 μm , desviación D50 $\leq\pm 15\%$.

Ventajas :

Morfología regular y excelente fluidez (~20 s/50 g).

Adecuado para polvo de cobalto de partículas grandes (> 2 μm) .

Insuficiente :

de partícula es demasiado grande (>1 μm) , lo que no es adecuado para aleaciones de grano ultrafino.

El contenido de oxígeno es alto (0,050,1%).

Solicitud :

Varilla de prueba YG15: polvo de cobalto atomizado, tamaño de partícula 23 μm , KIC 12 MPa·m^{1/2} .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.4 Electrodeposición

Principio :

El polvo de cobalto se produce mediante deposición electrolítica de una solución de sal de cobalto (como CoSO_4).

Reacción: $\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Co}$ (cátodo, densidad de corriente 100500 A/m^2).

Proceso :

Materias primas: CoSO_4 (>99,9%), electrolito (pH 35).

Equipamiento: celda electrolítica (cátodo de acero inoxidable), fuente de alimentación de corriente constante.

Parámetros: temperatura 5060°C , densidad de corriente 200400 A/m^2 , tiempo 24 horas.

Post-tratamiento: lavado, secado (80°C , $<10^{-2} \text{ Pa}$), molienda ($<2 \mu\text{m}$).

Características :

Pureza: >99,9%, O <0,1%, Fe <0,02%.

Morfología: dendrítica o irregular, necesita trituración.

Tamaño de partícula: $110 \mu\text{m}$ ($0,52 \mu\text{m}$ después de la molienda).

Ventajas :

Bajo costo (30% más bajo que el proceso carbonílico).

Adecuado para producción a gran escala.

insuficiente :

La morfología es irregular y la molienda aumenta la aglomeración (23%).

El contenido de oxígeno es alto (0,10,2%) y necesita ser optimizado.

solicitud :

Barra de prueba YG6: polvo de cobalto electrolítico, tamaño de partícula $12 \mu\text{m}$, dureza 1500 HV.

3.5 Medidas de optimización

Reducir los niveles de oxígeno :

Atmósfera inerte (Ar, O_2 <0,005%) de protección, oxígeno reducido a <0,03%.

vacío ($<10^{-2} \text{ Pa}$) para evitar la oxidación.

Granularidad del control :

La dispersión ultrasónica (500 W, 10 min) redujo la tasa de aglomeración a <0,5%.

de aire (precisión $\pm 0,1 \mu\text{m}$), desviación D50 $<\pm 5\%$.

Mejorar la apariencia :

Método de carbonilo + esferoidización de plasma, la esfericidad aumentó a >0,95.

Método de reducción química más modificación de la superficie (ácido esteárico 0,1%), fluidez aumentada en un 10%.

Ejemplos :

YG8N: Polvo de carbonil cobalto + dispersión ultrasónica, tamaño de partícula $0,5 \mu\text{m}$, aglomeración <0,3% (Sandvik, 2023).

Tabla comparativa de métodos de preparación de polvo de cobalto

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Método	Pureza	Tamaño de partícula (μm)	Morfología	Contenido de oxígeno	Fluidez (s/50 g)	costo	Grados aplicables
Método de reducción química	>99,9%	0,53	Poliedro, 0.80.9	<0,05%	~22	medio	YG6, YG15
Método del carbonilo	>99,95%	0,52	Casi esférico, >0,95	<0,03%	~18	alto	Y8N
Atomización	>99,9%	15	Esférico, >0,9	<0,08%	~20	medio	YG15 (tamaño grande)
Electrólisis	>99,9%	0,52 (molienda)	Irregular, 0,70,8	<0,1%	~25	Bajo	YG6 (bajo costo)

Medidas de optimización :

Reducir el contenido de oxígeno : Protección Ar ($\text{O}_2 < 0,005\%$), secado al vacío ($< 10^{-2}$ Pa).

Control del tamaño de partícula : dispersión ultrasónica (500 W, 10 min), tasa de aglomeración <0,5%.

Optimización de la morfología : método del carbonilo + esferoidización de plasma, esfericidad > 0,95.

4. Aplicación de polvo de cobalto en carburo cementado a base de cobalto

La selección y optimización del polvo de cobalto influye directamente en la preparación y el rendimiento de las barras de prueba de carburo cementado a base de cobalto. A continuación, se describen los grados y procesos específicos.

4.1 YG6 (6% Co, herramienta de uso general)

Requisitos de polvo de cobalto :

Pureza: >99,95%, O <0,03%, Fe <0,005%.

de partícula: 11,5 μm , D50 ~1,2 μm , esfericidad >0,9.

Preparación: Método del carbonilo o método de reducción química, fluidez ~20 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (94 % en peso , 12 μm) , Co (6 % en peso) , Cr₃C₂ (0,3 % en peso).

Composición : molienda húmeda (12-14 h, PEG 1,5%), D50 80-150 μm .

Prensado : CIP (200-250 MPa), tocho 6,2×6,2×43 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1400°C, $< 10^{-3}$ Pa) + HIP (1400°C, 100 MPa).

Mecanizado : rectificado ($R_a < 0,4 \mu\text{m}$) , entallado por chispa ($0,25 \pm 0,02$ mm).

actuación :

Dureza: 1500 \pm 50 HV (GB/T 79972017).

Resistencia a la flexión: 2,0 \pm 0,1 GPa (GB/T 38512015).

Tenacidad a la fractura: 8 \pm 0,5 MPa·m^{1/2} .

Ejemplos :

Barra de prueba YG6: polvo de cobalto carbonílico, tamaño de grano ~1,2 μm , vida útil de corte 2 horas (Sandvik, 2023).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.2 YG15 (15 % Co, molde de alta tenacidad)

Requisitos de polvo de cobalto :

Pureza: >99,9%, O <0,05%, Fe <0,01%.

de partícula: 1,52 μm , D50 ~ 1,8 μm , aglomeración <1%.

Preparación: Reducción química o atomización, fluidez ~22 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (85 % en peso, 1,52,5 μm) , Co (15 % en peso), Cr₃C₂ (0,5 % en peso) .

Composición : molienda húmeda (14-16 h, PVA 1%), D50 100-200 μm .

Prensado : CIP (250300 MPa), tocho 5,0×10,0×40 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1450°C, <10⁻³ Pa) + HIP (1450°C, 120 MPa).

Mecanizado : rectificado (Ra < 0,2 μm) , entallado por chispa (0,25 ± 0,01 mm).

actuación :

Dureza: 1400 ± 50 HV.

Resistencia a la flexión: 2,5 ± 0,1 GPa .

Tenacidad a la fractura: 12 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Ejemplos :

Varilla de prueba YG15: polvo de cobalto reducido, tamaño de grano ~1,8 μm , vida útil de perforación 120.000 veces (ScienceDirect, 2020).

4.3 YG8N (herramienta de aviación de grano ultrafino, 8 % Co)

Requisitos de polvo de cobalto :

Pureza: >99,95%, O <0,02%, Fe <0,005%.

de partícula : 0,20,8 μm , D50 ~0,5 μm , esfericidad>0,95.

Preparación: Método del carbonilo + esferoidización de plasma, fluidez ~15 s/50 g.

Proceso de preparación :

Ingredientes : WC (91,5 % en peso , 0,20,4 μm) , Co (8 % en peso) , Cr₃C₂ (0,4 % en peso), VC (0,1 % en peso).

Mezcla : molienda de bolas de alta energía (1820 h, PEG modificado 1%), D50 30100 μm .

Prensado : CIP (300350 MPa), tocho 6,3×6,3×44 mm.

Sinterización : sinterización al vacío (1350 °C, <5×10⁻⁴ Pa) + HIP (1350 °C, 150 MPa).

Procesamiento : rectificado de ultraprecisión (Ra < 0,2 μm) , entalla láser de femtosegundos (0,25 ± 0,005 mm).

actuación :

Dureza: 2000 ± 50 HV.

Resistencia a la flexión: 2,2 ± 0,1 GPa .

Tenacidad a la fractura: 9 ± 0,5 MPa·m^{1/2} .

Ejemplos :

Varilla de prueba YG8N: polvo de carbonil cobalto, tamaño de grano <0,5 μm , vida útil de la herramienta de aviación 4 horas (Sandvik, 2023).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Factores clave para la selección del polvo de cobalto

La selección del polvo de cobalto requiere una consideración exhaustiva de las propiedades de la aleación, las condiciones del proceso y los costos:

Aleaciones de alto rendimiento (como YG8N):

La opción preferida es el polvo de carbonilo cobalto, con una pureza de >99,95%, un tamaño de partícula de 0,20,8 μm y O <0,02%.

de grano <0,5 μm y una dureza aumentada entre un 5 y un 10 %.

Aleación de alta tenacidad (como YG15):

Utilice el método de reducción química o atomización, tamaño de partícula 1,52 μm , O < 0,05%.

Razón: Un tamaño de partícula ligeramente mayor es adecuado para un alto contenido de cobalto, el KIC aumentó en un 10%.

Sensible a los costes (como YG6):

Utilizar reducción química o electrólisis, tamaño de partícula 12 μm , O < 0,05%.

Motivo: coste entre 20 y 30 % menor, cumple requisitos generales de herramientas (resistencia 2,0 GPa) .

Varilla de prueba de gran tamaño (como YG15):

Se utilizó el método de atomización, tamaño de partícula 23 μm , fluidez ~20 s/50 g.

Motivo: Adecuado para partículas grandes, uniformidad de compresión > 95%.

6. Conclusión

El carburo cementado a base de cobalto utilizado debe cumplir los siguientes requisitos:

Composición química : pureza > 99,9%, O < 0,05%, Fe < 0,01%, C < 0,01% (GB/T 53142011).

Propiedades físicas : tamaño de partícula 0,52 μm (convencional) o 0,20,8 μm (grano ultrafino) , fluidez <25 s/50 g (GB/T 1482-2010).

Micromorfología : Casi esférico, esfericidad>0,9, aglomeración<1% (GB/T 183762014).

Método de preparación :

Método carbonilo : alta pureza (>99,95%), tamaño de partícula 0,52 μm , adecuado para YG8N.

Método de reducción química : bajo costo, tamaño de partícula 0,53 μm , adecuado para YG6 y YG15.

Método de atomización : partículas grandes (15 μm) , adecuadas para varillas de prueba de gran tamaño.

Método electrolítico : bajo costo, requiere molienda, adecuado para grados generales.

Ejemplos de aplicación :

YG6: Polvo de carbonilo o cobalto reducido (11,5 μm) , dureza 1500 HV, resistencia 2,0 GPa . de cobalto reducido o atomizado (1,52 μm) , KIC 12 MPa·m^{1/2}.

YG8N: Carbonilo + polvo de cobalto esferoidizado (0,20,8 μm) , dureza 2000 HV, tamaño de grano < 0,5 μm .

El uso de polvo de cobalto (como la dispersión ultrasónica y la protección inerte) puede mejorar la uniformidad en un 20 % , reducir la fase η en un 50 % y mejorar la consistencia del rendimiento de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

la aleación (desviación <3 %). En el futuro, el nanopolvo de cobalto (<0,2 μm) y las tecnologías de preparación ecológicas (como la reducción a baja temperatura) mejorarán aún más el rendimiento del carburo cementado a base de cobalto.

estándar :

GB/T 5314 2011: Composición química. GB/T 18376 2014: Microestructura.

GB/T 1482 2010: Liquidez. GB/T 3851 2015: Resistencia a la flexión.

GB/T 7997 2017: Dureza. GB/T 3849 2015: Propiedades magnéticas.

Tabla comparativa de polvo de cobalto y polvo de níquel

Característica	polvo de cobalto	polvo de níquel
Pureza	>99,9%, >99,95% (grano ultrafino)	>99,9%, >99,95% (alta resistencia a la corrosión)
Granularidad	0,52 μm , 0,20,8 μm (grano ultrafino)	0,52 μm , 0,20,8 μm (grano ultrafino)
Contenido de oxígeno	<0,05%, <0,03% (grano ultrafino)	<0,05%, <0,03% (alta resistencia a la corrosión)
Morfología	Casi esférico, esfericidad > 0,9	Casi esférico, esfericidad > 0,9
Magnetización	~160 emú/g	~55 emú/g
Método principal de preparación	Carbonilación, reducción química, atomización, electrólisis.	Carbonilación, reducción química, atomización, electrólisis.
Costo	Superior (20 % más alto que el polvo de níquel)	Más bajo
Propiedades de la aleación	Resistencia 1,52,5 GPa , KIC 812 MPa·m ^{1/2}	Resistencia 1,82,2 GPa , KIC 710 MPa·m ^{1/2}
Resistencia a la corrosión	0,01 mm/año (5% HCl)	<0,005 mm/año (5% HCl)
Escenario de aplicación	Herramientas de corte, matrices, herramientas de minería	Equipos químicos, herramientas petroleras, moldes de alta temperatura.

Norma : GB/T 43342020 (resistencia a la corrosión), GB/T 38512015 (resistencia a la flexión).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Un apéndice:

GB/T 7997-2017 Método de prueba para dureza Vickers y microdureza de carburo cementado

La norma GB/T 7997-2017, «Métodos de ensayo para la dureza Vickers y la microdureza del carburo cementado», es una norma nacional china que especifica los métodos de ensayo para la dureza Vickers (HV) y la microdureza (microdureza Vickers, HVM) del carburo cementado. Es aplicable a los ensayos de dureza de materiales de carburo cementado (como WC-Co, WC-Ni, etc.).

1 Alcance

Esta norma especifica los métodos de prueba para dureza Vickers y microdureza de carburo cementado, incluyendo principios de prueba, equipos, requisitos de muestra, procedimientos de prueba, cálculo de resultados, informe de prueba, etc.

Esta norma es aplicable a la determinación de dureza de productos de carburo cementado sinterizado (tales como herramientas de corte, herramientas de minería, piezas resistentes al desgaste) y piezas en bruto de carburo cementado no sinterizado, y es aplicable al rango de dureza de HV 500 a HV 3000.

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Para los documentos de referencia con fecha, solo se aplica la versión vigente; para los documentos de referencia sin fecha, se aplica la versión más reciente (incluidas todas las modificaciones).

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(escala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

GB/T 4340.1 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 4340.2 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

GB/T 4340.3 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

GB/T 4505 Métodos de muestreo y preparación de muestras para carburo cementado

GB/T 5124 Métodos de análisis químico para carburo cementado

GB/T 16594 Reglas generales para la inspección de microestructura de materiales metálicos

3 Términos y definiciones

Dureza Vickers (HV): Con un durómetro Vickers, se presiona un indentador de diamante tetraédrico regular sobre la superficie de la muestra bajo una carga específica. El valor de dureza se calcula tras medir la longitud diagonal de la indentación. La unidad es HV.

Microdureza (HVM): dureza Vickers medida bajo un microscopio, adecuada para pruebas de dureza de muestras de tamaño pequeño o microáreas locales, con una carga generalmente menor a 1 kgf .

Diagonal de sangría: La longitud de las dos diagonales de la sangría Vickers, en mm.

Valor de dureza: Dureza calculada en función de la longitud diagonal de la sangría y la carga, en kgf /mm² (convertido a HV).

4 Principio de prueba

Las pruebas de dureza y microdureza Vickers utilizan un penetrador de diamante de pirámide cuadrangular regular (ángulo del vértice de 136° ± 0,5°) para presionar la superficie de la muestra bajo una carga específica, mantenerla durante un tiempo determinado , luego descargarla, medir la longitud diagonal de la indentación y calcular el valor de dureza mediante la fórmula.

La fórmula es la siguiente:

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

en:

- HV: 维氏硬度值 (kgf/mm², 单位为 HV) ;
- F: 试验载荷 (kgf) ;
- d: 压痕对角线的平均长度 (mm) .

5 Equipos y materiales

Probador de dureza:

Probador de dureza Vickers: de acuerdo con GB/T 4340.2, rango de carga 1-50 kgf±0,1 kgf .

Probador de microdureza: rango de carga 0,01-1 kgf ± 0,001 kgf , equipado con microscopio (aumento ≥400 veces) .

Penetrador: Penetrador de diamante tetraédrico regular, ángulo de vértice 136° ± 0,5°, superficie libre de defectos.

Bloque de dureza estándar: según GB/T 4340.3, rango de dureza HV 500 a HV 3000.

Tratamiento de superficie de la muestra: Pulido hasta una rugosidad superficial Ra ≤ 0,2 μm ± 0,02 μm , sin capa de óxido ni grietas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones ambientales: temperatura $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, humedad $40\%-60\% \pm 5\%$ HR, sin interferencias de vibración.

6. Muestras

Requisitos de muestra:

El muestreo se realizará de acuerdo con GB/T 4505, con una superficie plana y un espesor $\geq 1,5$ veces la profundidad de la sangría (aproximadamente $0,1-0,5$ mm).

Tamaño de la muestra: área mínima $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \pm 0,1$ mm, tamaño máximo $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \pm 0,1$ mm.

Tratamiento de superficie:

Pulido: Utilice papel de lija metalográfico (tamaño de grano de malla 800-2000) y pasta de pulido (tamaño de partícula $\leq 1\text{ }\mu\text{m} \pm 0,01\text{ }\mu\text{m}$).

Limpieza: Utilice etanol (pureza $\geq 99,5\% \pm 0,1\%$) para eliminar las manchas de aceite.

Número de especímenes: 3-5 especímenes por lote, con al menos 5 hendiduras en el mismo espécimen.

7 pasos de prueba

7.1 Prueba de dureza Vickers

Calibración de equipos:

El probador de dureza se calibra utilizando un bloque de dureza estándar con una desviación de $< \pm 2\% \pm 0,5\%$.

Calibre la geometría del penetrador con una desviación del ángulo superior de $< \pm 0,5^{\circ}$.

Selección de carga:

Cargas comunes: 5 kgf, 10 kgf, 30 kgf $\pm 0,1$ kgf (seleccionar según el rango de dureza).

Tiempo de mantenimiento de carga: $10-15\text{ s} \pm 1\text{ s}$.

Medida de sangría:

Coloque la muestra sobre el banco de trabajo del probador de dureza y asegúrese de que la superficie de la muestra esté nivelada.

Aplicar la carga, mantenerla durante un tiempo determinado y luego descargarla.

Mida las longitudes de las dos diagonales de la sangría (d_1 y d_2) con una precisión de $0,001\text{ mm} \pm 0,0001\text{ mm}$.

Espaciado de sangría: ≥ 3 veces la longitud diagonal (aproximadamente $0,3-1,5$ mm).

Cálculo de dureza:

Calcula el valor HV según la fórmula y toma el valor promedio de 5 sangrías.

Desviación $< \pm 3\% \pm 0,5\%$, en caso contrario volver a realizar la prueba.

7.2 Prueba de microdureza

Calibración de equipos:

Utilice un comprobador de microdureza, una carga calibrada y un aumento de microscopio (≥ 400 x).

Desviación $< \pm 2\% \pm 0,5\%$.

Selección de carga:

Cargas comunes: 0,05 kgf, 0,1 kgf, 0,5 kgf $\pm 0,001$ kgf.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tiempo de mantenimiento de carga: $10-15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Medida de sangría:

Observe la sangría bajo un microscopio y mida las longitudes diagonales (d_1 y d_2) con una precisión de $0,0005 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$.

Espaciado de sangría: ≥ 5 veces la longitud diagonal (aproximadamente $0,05-0,2 \text{ mm}$).

Cálculo de dureza:

Calcule el valor HVM según la fórmula y tome el valor promedio de 5 sangrías.

Desviación $< \pm 4\% \pm 0,5\%$, en caso contrario volver a realizar la prueba.

8 Resultados Expresión

Valor de dureza: expresado como HV o HVM, conserva el número entero, como HV 1800 o HVM 2000.

Contenido del informe:

Número de muestra, valor de carga, longitud diagonal de la sangría, valor de dureza promedio y desviación.

Condiciones ambientales (temperatura, humedad).

Fecha de prueba y operador.

Ejemplo: muestra WC-10%Co, carga 30 kgf, diagonal promedio $0,042 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$, HV 1800 ± 50 .

9 Factores influyentes

Superficie de la muestra: Una rugosidad superficial $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ da como resultado una sangría borrosa y una dureza baja (desviación $> 5\% \pm 1\%$).

Desviación de carga: La desviación de carga $> \pm 0,1 \text{ kgf}$ afecta la profundidad de sangría y la desviación de dureza $> 3\% \pm 0,5\%$.

Vibración ambiental: Una frecuencia de vibración $> 1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ provocará una desviación de la indentación y se requiere prevención de vibraciones.

Estado del penetrador: Los defectos del penetrador (rayaduras $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$) dan lugar a una baja dureza y requieren una inspección periódica.

10 reglas de inspección

Muestreo: De acuerdo con GB/T 4505, se toman de 3 a 5 muestras de cada lote ($\leq 100 \text{ kg}$) y se miden 5 hendiduras para cada muestra.

Frecuencia de inspección: inspección de fábrica (cada lote), inspección de tipo (una vez al año o cuando cambia el proceso).

Juicio: Todas las muestras son calificadas si sus valores de dureza cumplen con los requisitos; si alguna falla, se permite una nueva inspección y, si la nueva inspección aún falla, el lote no queda calificado.

11 Informe de prueba

El informe de prueba debe incluir:

Descripción de la muestra (composición, proceso de preparación).

Método de ensayo (Vickers o microdureza).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Valor de carga, longitud diagonal de sangría, valor de dureza y desviación.

Condiciones ambientales (temperatura $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, humedad $40\%-60\% \pm 5\% \text{ HR}$).

Número estándar (GB/T 7997-2017).

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores típicos de dureza del carburo cementado

WC-6%Co: HV 1800-2000 \pm 50, adecuado para herramientas de corte.

WC-10%Co: HV 1500-1700 \pm 50, adecuado para herramientas de minería.

WC-12%Ni: HV 1400-1600 \pm 50, adecuado para piezas resistentes al desgaste.

Apéndice B (Apéndice normativo) Notas suplementarias sobre métodos de prueba

Medición de sangría: al medir la microdureza, el aumento del microscopio debe ser ≥ 400 veces y el campo de visión debe estar despejado.

Control ambiental: El entorno de prueba no presenta perturbaciones del flujo de aire y la fluctuación de temperatura es $< \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Mantenimiento del penetrador: Inspeccione el penetrador después de cada 500 pruebas y reemplácelo si el rayado es $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Resumir

La norma GB/T 7997-2017 especifica el método de ensayo para la dureza Vickers y la microdureza del carburo cementado. Utiliza un indentador de diamante tetraédrico regular (ángulo de vértice de $136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$) para calcular la dureza (HV 500-3000) midiendo la longitud diagonal de la indentación. La norma especifica la calibración del equipo (desviación $< \pm 2\%$), la preparación de la muestra ($R_a \leq 0,2 \mu\text{m}$), los pasos del ensayo y la expresión de los resultados para garantizar la precisión del ensayo de dureza (desviación $< \pm 3\%$). Este método es adecuado para el control de calidad de productos de carburo cementado, como herramientas de aviación (HV 1800-2000) y herramientas de minería (HV 1500-1700).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Un apéndice:

GB/T 4340.1-2017 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos

Parte 1: Métodos de prueba

1 Alcance

Esta parte especifica el método de ensayo para la dureza Vickers de materiales metálicos, incluyendo el principio de ensayo, el equipo de ensayo, los requisitos de la muestra, el procedimiento de ensayo, el cálculo de la dureza, la expresión de los resultados y el contenido del informe de ensayo.

Esta norma es aplicable a la determinación de la dureza Vickers de materiales metálicos y algunos materiales no metálicos (como el carburo cementado y la cerámica), con un rango de dureza de HV 5 a HV 3000 y un rango de carga de 0,01 kgf a 50 kgf .

Esta norma no es aplicable a probetas con rugosidad superficial excesivamente alta ($R_a > 0,4 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$) o espesor insuficiente para soportar la profundidad de indentación .

2 Referencias normativas

Los siguientes documentos son documentos de referencia esenciales para la implementación de esta norma. Solo son aplicables las versiones especificadas de los documentos referenciados.

GB/T 230.1 Ensayo de dureza Rockwell para materiales metálicos Parte 1: Método de ensayo (escala A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T)

GB/T 4340.2 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

GB/T 4340.3 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

GB/T 4505 Métodos de muestreo y preparación de muestras para carburo cementado

GB/T 16594 Reglas generales para la inspección de microestructura de materiales metálicos

GB/T 8170 Reglas para el redondeo de valores

3 Términos y definiciones

Dureza Vickers (HV): Bajo una carga específica, se presiona un indentador de diamante de pirámide cuadrangular regular con un ángulo de vértice de 136° sobre la superficie de la muestra. El valor de dureza se calcula tras medir la longitud diagonal de la indentación. La unidad es HV.

Dureza micro Vickers (HVM): dureza Vickers medida bajo un microscopio cuando la carga es inferior a 1 kgf .

Diagonal de sangría: La longitud de las dos diagonales de la sangría Vickers, en mm.

Carga de prueba: La fuerza aplicada al penetrador, en kgf o N ($1 \text{ kgf} = 9,80665 \text{ N}$).

Tiempo de retención: el tiempo que se mantiene la carga después de aplicarse, en segundos.

4 Principio de prueba

La prueba de dureza Vickers utiliza un penetrador de diamante piramidal cuadrangular regular con un ángulo de vértice de $136^\circ \pm 0,5^\circ$. Se presiona contra la superficie de la muestra bajo una carga específica, se mantiene durante un tiempo determinado y luego se descarga. Se miden las longitudes de las dos diagonales de la indentación (d_1 y d_2) y se calcula el valor promedio d . El valor de dureza se calcula sustituyéndolo en la fórmula:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

其中:

- HV: 维氏硬度值 (kgf/mm², 换算为 HV) ;
- F: 试验载荷 (kgf) ;
- d: 压痕对角线的算术平均值 (mm) , $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$.

若以 N 为单位, 则公式为:

$$HV = 0.1891 \cdot \frac{F}{d^2}$$

其中 F 单位为 N.

5 Equipo de prueba

Probador de dureza Vickers:

Rango de carga: 0,01 kgf a 50 kgf ± 0,1 kgf .

Precisión de carga: de acuerdo con GB/T 4340.2, desviación <±1%±0,1%.

Sistema de medición: microscopio o sistema óptico incorporado, precisión 0,001 mm ± 0,0001 mm.

Cabezal de presión:

Penetrador de diamante tetraédrico regular, ángulo de vértice 136°±0,5°, rectitud del borde <0,002 mm±0,0002 mm.

No hay arañazos ni defectos en la superficie (arañazos < 0,01 mm ± 0,001 mm).

Bloque de dureza estándar:

Cumple con GB/T 4340.3, rango de dureza HV 100 a HV 3000.

Condiciones ambientales:

Temperatura: 20-25°C ± 1°C.

Humedad: 40%-60%±5% HR.

Sin perturbaciones por vibraciones (frecuencia <1 Hz ± 0,1 Hz).

6. Muestras

Requisitos de tamaño:

Espesor mínimo: ≥ 1,5 veces la profundidad de sangría (aproximadamente 0,1-0,5 mm).

Área mínima: 10 mm × 10 mm ± 0,1 mm, tamaño máximo 50 mm × 50 mm ± 0,1 mm.

Preparación de la superficie:

Pulido: papel de lija metalográfico (malla 800-2000) y pasta de pulido (tamaño de partícula ≤ 1 μm±0,01 μm) , rugosidad superficial Ra ≤ 0,2 μm± 0,02 μm .

Limpieza: Utilice etanol (pureza ≥ 99,5% ± 0,1%) para eliminar las manchas de aceite.

cantidad:

Tome de 3 a 5 muestras de cada lote, y cada muestra debe tener al menos 5 hendiduras.

7 Procedimientos de prueba

Calibración de equipos:

El probador de dureza se calibra utilizando un bloque de dureza estándar con una desviación de <±2%±0,5%.

Verifique la geometría del penetrador, la desviación del ángulo superior es <±0,5°.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Selección de carga:

Cargas comunes: 0,1 kgf , 0,3 kgf , 0,5 kgf , 1 kgf , 5 kgf , 10 kgf , 30 kgf±0,1 kgf .

Aleación dura recomendada: 10 kgf o 30 kgf ± 0,1 kgf .

Microdureza: 0,01-1 kgf ± 0,001 kgf .

Condiciones de prueba:

Tiempo de mantenimiento: 10-15 s±1 s (se recomienda 15 s±1 s para carburo cementado).

Espaciado de sangría: ≥ 3 veces la longitud diagonal (aproximadamente 0,3-1,5 mm).

Distancia entre la sangría y el borde de la muestra: ≥ 2,5 veces la longitud diagonal.

Medida de sangría:

Aumento del microscopio: ≥ 400 veces (microdureza), ≥ 100 veces (dureza convencional).

Mida las diagonales d_1 y d_2 con una precisión de 0,001 mm ± 0,0001 mm.

Cálculo de dureza:

Calcule HV según la fórmula, tome el valor promedio de 5 sangrías y la desviación es $\leq \pm 3\% \pm 0.5\%$.

8 Factores influyentes

Calidad de la superficie: $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ da como resultado una sangría borrosa y una dureza baja (desviación $> 5\% \pm 1\%$).

Desviación de carga: $> \pm 1\% \pm 0,1\%$ afecta la profundidad de sangría, desviación de dureza $> 3\% \pm 0,5\%$.

Vibración ambiental: Frecuencia $> 1 \text{ Hz} \pm 0,1 \text{ Hz}$ provoca desplazamiento de la sangría.

Inclinación de la muestra: un ángulo de inclinación $> 2^\circ \pm 0,1^\circ$ provocará una sangría asimétrica y será necesario reajustarlo.

9 Resultados Expresión

Valor de dureza: expresado en HV, conservar el número entero, por ejemplo HV 1800±50.

Símbolo: HV se agrega después de la carga, por ejemplo, una carga de 30 kgf es HV30.

Contenido del informe:

Número de muestra, valor de carga, longitud diagonal de la sangría, valor de dureza y desviación.

Condiciones ambientales (temperatura, humedad).

Fecha de prueba y operador.

10 Informe de prueba

Descripción de la muestra (material, proceso de preparación).

Condiciones de prueba (carga, tiempo de retención, espaciado de sangría).

Media y desviación de los valores de dureza.

Condiciones ambientales (temperatura $20-25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, humedad $40\%-60\% \pm 5\% \text{ HR}$).

Número estándar (GB/T 4340.1-2017).

Fecha de prueba y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores de dureza Vickers de materiales metálicos comunes

Carburo cementado (WC-10%Co): HV 1500-1800±50.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Acero endurecido (HRC 60): HV 700-800±30.

Aluminio puro: HV 20-50±5.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

GB/T 4340.2-2017 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de durómetros

1 Alcance

Esta parte especifica los métodos de inspección y calibración de los durómetros Vickers, incluyendo la verificación de la precisión de la carga, la geometría del indentador, la precisión del sistema de medición y la repetibilidad.

Es aplicable a la inspección de fábrica, la calibración regular y la inspección previa al uso de los durómetros Vickers (convencionales y microscópicos).

2 Referencias normativas

GB/T 4340.1 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 4340.3 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

Procedimiento de verificación JJG 112-2005 para el probador de dureza Vickers

GB/T 8170 Reglas para el redondeo de valores

3 Términos y definiciones

Error de carga: La desviación entre la carga real y la carga marcada, expresada en % de medición diagonal y el valor real, en μm .

Repetibilidad: La consistencia de los valores de dureza medidos varias veces bajo las mismas condiciones, en HV.

Ciclo de calibración: El intervalo de tiempo entre la calibración del probador de dureza, generalmente de 6 meses a 1 año.

4 elementos de inspección

Precisión de carga: desviación $<\pm 1\% \pm 0,1\%$.

Geometría del penetrador:

Ángulo del vértice: $136^\circ \pm 0,5^\circ$.

del borde : $<0,002 \text{ mm} \pm 0,0002 \text{ mm}$.

Desviación del vértice: $<0,001 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$.

Sistema de medición:

Error de medición diagonal: $<\pm 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ (probador de microdureza).

Error de aumento del microscopio: $<\pm 1\% \pm 0,1\%$.

Tiempo de retención: Desviación $<\pm 0,5 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$.

Repetibilidad: Desviación estándar de 5 mediciones $<\pm 1\% \pm 0,1\%$.

5. Equipo de calibración

Bloque de dureza estándar:

Cumple con GB/T 4340.3, rango de dureza HV 100-3000.

Uniformidad: $<\pm 3\% \pm 0,5\%$.

Micrómetro: precisión $0,001 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$.

Dispositivo de calibración de carga: precisión $0,01 \text{ kgf} \pm 0,001 \text{ kgf}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Microscopio óptico: aumento ≥ 1000 veces, precisión $0,0001 \text{ mm} \pm 0,00001 \text{ mm}$.

Condiciones ambientales:

Temperatura: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Humedad: $40\%-60\% \pm 5\% \text{ HR}$.

6 Procedimiento de calibración

Calibración de carga:

Calibre cada punto de carga (0,1 kgf , 1 kgf , 5 kgf , 10 kgf , 30 kgf $\pm 0,1 \text{ kgf}$) utilizando un sensor de fuerza o peso estándar.

Registre la desviación, si es $< \pm 1\% \pm 0,1\%$, de lo contrario ajuste el sistema de carga.

Inspección del penetrador:

Se utilizó un microscopio óptico para medir el ángulo superior del penetrador ($136^{\circ} \pm 0,5^{\circ}$) y la rectitud del borde.

Verifique la superficie del penetrador y reemplácelo si hay rayones $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$.

Calibración del sistema de medición:

Utilizando un bloque de dureza estándar (por ejemplo, HV 1800 ± 10), mida la diagonal de la sangría.

Calibre el microscopio con una precisión de $< \pm 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$.

Mantener la calibración del tiempo:

Calibrado con cronómetro, $10-15 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$, desviación $< \pm 0,5 \text{ s} \pm 0,1 \text{ s}$.

Prueba de repetibilidad:

Mida 5 veces continuamente en el bloque de dureza estándar y calcule la desviación estándar, $< \pm 1\% \pm 0,1\%$.

Ajuste y grabación:

Si no es satisfactorio, ajuste el probador de dureza (carga, penetrador o sistema de medición).

Registre los datos de calibración y consérvelos en archivo durante $2 \text{ años} \pm 0,1 \text{ años}$.

7 Factores influyentes

Variación de temperatura: $> \pm 1^{\circ}\text{C}$ afecta la estabilidad del sistema de carga, desviación de dureza $> 2\% \pm 0,5\%$.

Desgaste del penetrador: rayones $> 0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$ resultando en baja dureza ($> 3\% \pm 0,5\%$).

Fluctuación de carga: una fuente de alimentación inestable ($> \pm 1 \text{ V} \pm 0,1 \text{ V}$) provoca un error de carga.

8 Resultados Expresión

Error de carga: expresado en %, conservando dos decimales, por ejemplo $\pm 0,50\% \pm 0,01\%$.

Error de medida: expresado en μm , por ejemplo $\pm 0,10 \mu\text{m} \pm 0,01 \mu\text{m}$.

Repetibilidad: Expresada en HV, por ejemplo $\pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$.

9 Informe de calibración

Modelo y número del probador de dureza.

Elementos de calibración (carga, penetrador, sistema de medición, repetibilidad).

Resultados de calibración y desviaciones.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones ambientales (temperatura 20-25°C ± 1°C, humedad 40%-60% ± 5% HR).

Número estándar (GB/T 4340.2-2017).

Fecha de calibración y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Recomendaciones del ciclo de calibración

Uso normal: calibrar cada 6 meses.

Uso de alta frecuencia (>100 veces/día): calibrar cada 3 meses.

GB/T 4340.3-2017 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 3: Calibración de bloques de dureza estándar

1 Alcance

Esta sección especifica el método de calibración de los bloques de dureza estándar Vickers, incluyendo la determinación del valor de dureza, la inspección de uniformidad, la evaluación de la incertidumbre y el contenido del certificado de calibración.

Aplicable a los bloques de dureza estándar para la calibración de durómetros Vickers con un rango de dureza de HV 100 a HV 3000.

2 Referencias normativas

GB/T 4340.1 Prueba de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 1: Método de prueba

GB/T 4340.2 Ensayo de dureza Vickers para materiales metálicos Parte 2: Verificación y calibración de probadores de dureza

JJF 1071-2010 Especificación nacional de medición y calibración

GB/T 8170 Reglas para el redondeo de valores

GB/T 16594 Reglas generales para la inspección de microestructura de materiales metálicos

3 Términos y definiciones

Bloque de dureza estándar: un bloque de metal con un valor de dureza conocido que se utiliza para calibrar un probador de dureza.

Uniformidad de dureza: La consistencia de los valores de dureza en la superficie de un bloque de dureza, medida en HV.

Incertidumbre: El intervalo de confianza del resultado de la medición del valor de dureza, en HV.

Ciclo de calibración: El intervalo de tiempo para recalibrar el bloque de dureza estándar, generalmente de 1 a 2 años.

4 Requisitos de calibración

Valor de dureza: HV 100-3000, desviación $<\pm 2\% \pm 0,5\%$.

Uniformidad: La desviación del valor de dureza de 10 puntos en la misma superficie es $<\pm 3\% \pm 0,5\%$.

Incertidumbre: $\leq \pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$ (nivel de confianza del 95%).

Calidad de la superficie: $R_a \leq 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$, sin rayones ni capa de óxido.

5. Equipo de calibración

Probador de dureza Vickers:

Cumple con la norma GB/T 4340.2 y está calibrado para aprobar.

Precisión de carga: $<\pm 1\% \pm 0,1\%$.

Cabezal de presión:

Ángulo de vértice $136^\circ \pm 0,5^\circ$, certificado.

No hay ningún defecto superficial (rayado $<0,01 \text{ mm} \pm 0,001 \text{ mm}$).

Sistema de medición:

Precisión del microscopio: $0,001 \text{ mm} \pm 0,0001 \text{ mm}$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Condiciones ambientales:

Temperatura: $20-25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Humedad: $40\%-60\% \pm 5\%$ HR.

6 Procedimiento de calibración

Preparación de la muestra:

La superficie del bloque de dureza se pulió a $R_a \leq 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$, se limpió con etanol y se secó.

Medición de dureza:

Seleccionar carga: 5 kgf, 10 kgf, 30 kgf $\pm 0,1$ kgf (según rango de dureza).

Mida 10 puntos, con un espaciado de sangría ≥ 3 veces la longitud diagonal y un tiempo de retención de 10 a 15 s ± 1 s.

Comprobación de uniformidad:

Calcular la media y la desviación estándar de los valores de dureza en 10 puntos, con una desviación de $< \pm 3\% \pm 0,5\%$.

Evaluación de la incertidumbre:

Incluyendo error del probador de dureza, error del sistema de medición e influencia ambiental.

Incertidumbre $\leq \pm 10 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$.

verificar:

En comparación con los resultados de las instituciones nacionales de metrología o laboratorios de referencia, la desviación es $< \pm 2\% \pm 0,5\%$.

7 Factores influyentes

Calidad de la superficie: $R_a > 0,2 \mu\text{m} \pm 0,02 \mu\text{m}$ resultando en baja dureza ($> 3\% \pm 0,5\%$).

Temperatura ambiente: $> \pm 1^{\circ}\text{C}$ afecta la precisión de la medición de sangría.

Estado del probador de dureza: error de carga $> \pm 1\% \pm 0,1\%$ o defecto del penetrador afecta el resultado.

8 Resultados Expresión

Valor de dureza: expresado en HV, conservar el número entero, por ejemplo HV 1800 ± 10 .

Uniformidad: expresada como desviación máxima, p. ej. $\pm 20 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$.

Incertidumbre: Expresada en HV, por ejemplo $\pm 8 \text{ HV} \pm 1 \text{ HV}$.

9 Certificado de calibración

Número de bloque de dureza, valor de dureza e incertidumbre.

Datos de uniformidad y distribución de puntos de medición.

Condiciones de calibración (carga, entorno).

Número estándar (GB/T 4340.3-2017).

Fecha de calibración, fecha de vencimiento y firma del operador.

Apéndice A (Apéndice informativo) Valores típicos de bloques de dureza estándar

HV 200 ± 5 : Acero dulce.

HV 800 ± 10 : Acero endurecido.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV 1800±20: Aleación dura.

Apéndice B (Apéndice normativo) Ciclo de calibración y mantenimiento

Ciclo de calibración: Una vez al año o después de 500 usos.

Mantenimiento: Evite rayar la superficie del bloque de dureza y guárdelo en un ambiente seco (humedad <math><50\% \pm 5\% \text{ HR}</math>).

Un apéndice:

Sellos y válvulas para aguas profundas de carburo a base de níquel

El carburo cementado a base de níquel (WC + Ni) se ha convertido en el material fundamental para sellos, juntas y válvulas de aguas profundas gracias a su excelente resistencia a la corrosión y al desgaste, alta resistencia mecánica (2,0-2,8 GPa) y alta estabilidad térmica (>1000 °C). Se utiliza ampliamente en la producción de petróleo y gas en aguas profundas, sistemas de válvulas de aguas profundas y equipos de alta presión (como 15 000-20 000 psi). Estos componentes deben soportar entornos extremos (50 °C a 200 °C, H₂S, CO₂, corrosión del agua de mar), cumplir con los estándares NACE MR0175 y cumplir con los requisitos de porosidad (<0,01 %), dureza (1400-2200 HV) y rendimiento de sellado (tasa de fuga <10⁻⁶). Este artículo combina estándares nacionales (como GB/T 183762014, GB/T 38502015) y prácticas de la industria para presentar en detalle el proceso de sinterización, el rendimiento, la aplicación y las recomendaciones de selección de sellos y válvulas para aguas profundas de carburo cementado a base de níquel.

1. Proceso de horno de sinterización de carburo cementado a base de níquel

Los sellos y válvulas de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas deben prepararse mediante sinterización a alta temperatura. Los tipos de hornos de sinterización incluyen el horno de sinterización al vacío, el horno de sinterización por prensado isostático en caliente (HIP) y el horno de sinterización atmosférica. Los parámetros del proceso están optimizados para entornos de aguas profundas.

1.1 Tipos de hornos de sinterización y parámetros del proceso

Horno de sinterización al vacío:

Aplicación: Producción de anillos de sellado con formas complejas (por ejemplo, Ø 5200 mm) y componentes de válvulas (por ejemplo, asientos de válvulas Ø 50500 mm).

Parámetros del proceso:

200600 °C, velocidad de calentamiento 25 °C/min, grado de vacío 10⁻² Pa, caudal de H₂ 515 L/min, 24 horas, tasa de desparafinado >99,5 %.

Sinterización: 1350-1450 °C, velocidad de calentamiento 510 °C/min, grado de vacío 10⁻⁴ 10⁻⁵ Pa, mantener caliente durante 24 horas.

Enfriamiento: 1015°C/min (enfriamiento forzado Ar), hasta 100°C.

Propiedades: densidad 14,514,9 g/ cm³, dureza 14002000 HV, porosidad <0,01%.

Horno de prensado isostático en caliente (HIP):

Aplicación: Para producir sellos y válvulas de alto rendimiento (como núcleos de válvulas de alta presión) y eliminar microporos.

Parámetros del proceso:

Sinterización: 1350-1450 °C, velocidad de calentamiento 58 °C/min, presión 100-150 MPa (Ar), mantener caliente durante 13 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Post-tratamiento: 1300-1350°C, 80-100 MPa, 12 horas, porosidad reducida a <0,001%.

Enfriamiento: 1520°C/min (alta presión Ar) a 200°C.

Propiedades: densidad>99,9% (14,815,0 g/cm³), dureza 18002200 HV, resistencia 2,22,8 GPa .

Horno de sinterización de atmósfera:

Aplicación: Producción en masa de sellos (como juntas tóricas) y componentes de válvulas (como cuerpos de válvulas).

Parámetros del proceso:

Desparafinado: 200500°C, velocidad de calentamiento 35°C/min, flujo de H₂ 2050 L/min, O₂ <10 ppm, 35 horas.

Sinterización: 1300-1400 °C, velocidad de calentamiento 510 °C/min, atmósfera de H₂/ Ar , mantener caliente durante 35 horas.

Refrigeración: 510°C/min (protección N₂), hasta 100°C.

Propiedades: densidad>99% (14,514,8 g/cm³) , dureza 14001800 HV, desviación dimensional ±0,10,5 mm.

1.2 Optimización de procesos

Control de temperatura: algoritmo PID+AI, precisión ±3°C, uniformidad ±5°C, reduciendo el estrés térmico en un 30%.

Desparafinado: combinación de vacío + H₂, carbono residual <0,05%, para evitar la oxidación de la fase Ni.

HIP: 1350°C, 120 MPa, 2 horas de mantenimiento, aumento de densidad de 0,5%, ciclo acortado en 20%.

Atmósfera: Pureza de H₂ >99,999%, O₂ <5 ppm, tasa de oxidación reducida al 50%.

2. Rendimiento de los sellos de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas

En comparación con el carburo cementado a base de cobalto (WC + Co) , el carburo cementado a base de níquel (WC + Ni, contenido de Ni 615%) tiene una mayor resistencia a la corrosión del agua de mar y al H₂S/CO₂, y satisface las necesidades de entornos extremos de aguas profundas.

2.1 Propiedades del material

Composición: WC (8594%), Ni (615%), trazas de Cr/Mo (resistencia a la corrosión mejorada).

Densidad: 14,515,0 g/cm³ (GB /T 38502015), desviación ±0,05 g/cm³ .

Dureza: 14002200 HV (GB/T 79972017), desviación ±3050 HV.

Resistencia: resistencia a la flexión 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Porosidad: <0,01% (vacío/atmósfera), <0,001% (HIP, GB/T 51692013).

Resistencia a la corrosión: Resistente a H₂S (>1000 ppm), CO₂, agua de mar (pH 39), de conformidad con NACE MR0175.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Rendimiento de sellado

Tasa de fuga: $<10^{-6}$ mbar·L/s (prueba de helio, 15 000 psi).

Rango de presión: Vacío hasta 20.000 psi (138 MPa).

Rango de temperatura: 50°C a 200°C (condiciones típicas de aguas profundas).

Tratamiento de superficie: galvanoplastia de Ni/Cr o revestimiento de PTFE, coeficiente de fricción reducido en un 20%, resistencia al desgaste aumentada en un 30%.

Sello dinámico: admite ligeros movimientos dinámicos (conexión/desconexión), vida útil >1000 conexiones.

2.3 Típico

Junta tórica: Ø 5200 mm, índice de compresión 1520%, junta autoreforzante.

Sello tipo C: alto rebote de resorte, adecuado para sellado dinámico de alta presión.

Superficie de sellado de la válvula: asiento de válvula/núcleo de válvula, rugosidad de superficie Ra 0,20,4 μm , resistente a la erosión.

Recomendación: Los sellos y anillos de sellado de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas producidos por CTIA GROUP LTD adoptan tecnología de sinterización HIP avanzada para garantizar una alta densidad (>99,9%) y una excelente resistencia a la corrosión para satisfacer las necesidades de la explotación de petróleo y gas en aguas profundas.

3. Rendimiento de la válvula de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas

Las válvulas para aguas profundas (como válvulas de compuerta y válvulas de bola) utilizan carburo cementado a base de níquel para fabricar asientos de válvulas, núcleos de válvulas y superficies de sellado para soportar alta presión (15 000-20 000 psi), fluidos corrosivos (agua de mar, H₂S) y cambios frecuentes (>10 000 veces).

3.1 Características de los componentes de la válvula

Material: WC+Ni (Ni 812%), sinterización HIP, densidad>99,9%.

Dureza: 1800-2200 HV, la resistencia al desgaste es mejor que la aleación Stellite .

Resistencia: 2,22,8 GPa , fuerte resistencia al impacto, tenacidad a la fractura KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Resistencia a la corrosión: Resistente al agua de mar, H₂S (>1000 ppm) y CO₂, mejor que Inconel 625.

Superficie: pulida a espejo (Ra <0,2 μm), revestimiento de PTFE/Ni, coeficiente de fricción <0,1.

3.2 Rendimiento de la válvula

Presión: 15.000-20.000 psi, de acuerdo con las normas API 6A.

Temperatura: 50°C a 200°C, resistente a la fragilización por baja temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Tasa de fuga: $<10^{-6}$ mbar·L /s (sello de asiento/núcleo).

Vida útil: Conmutación >10.000 veces, período de mantenimiento >5 años.

típico:

Asiento de válvula: Revestimiento de aleación dura a base de níquel, espesor 25 mm, resistente a la erosión.

Núcleo de válvula: sinterización HIP integral, precisión dimensional $\pm 0,01$ mm.

Superficie de sellado: Sello metálico tipo C o tipo E, deformación elástica 1520%.

Recomendación: Los componentes de válvulas de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas producidos por CTIA GROUP LTD adoptan sinterización al vacío y proceso HIP, cumplen con los estándares API 6A y NACE MR0175, y son adecuados para sistemas de válvulas de alta presión para aguas profundas.

4. Escenarios de aplicación

Focas de aguas profundas:

Aplicación: Acopladores hidráulicos y conectores de tuberías para la producción de petróleo y gas en aguas profundas (15 000 psi, 50 °C a 150 °C).

Rendimiento: Densidad 14,815,0 g/cm³, dureza 18002200 HV, tasa de fuga $<10^{-6}$ mbar·L /s.

Ejemplo: Junta tórica (Ø 50 mm), sinterización HIP, 1400°C, 120 MPa, 4 horas, porosidad $<0,001\%$, resistencia a H₂S 1000 ppm, vida útil >1000 conexiones.

Válvulas de aguas profundas:

Escenario: Árboles de Navidad en aguas profundas, válvulas de estrangulamiento, válvulas de compuerta (20 000 psi, entorno H₂S/CO₂).

Rendimiento: Dureza del asiento 2000 HV, resistencia 2,5 GPa, vida útil de conmutación $>10 000$ veces.

Caja: Asiento de válvula de bola (Ø 100 mm), sinterización HIP, 1350°C, 150 MPa, 3 horas, densidad 14,9 g/cm³, resistencia a la corrosión del agua de mar, período de mantenimiento 5 años.

5. Recomendaciones para la selección de componentes de válvulas de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas

Según el entorno de aplicación:

Acoplador hidráulico para aguas profundas (sello dinámico alto):

Recomendado: Anillo C sinterizado HIP, contenido de Ni 1012%, recubrimiento de PTFE.

Motivo: Alto rebote del resorte, tasa de fuga $<10^{-6}$ mbar·L /s, vida útil >1000 veces.

Válvulas para aguas profundas (alta presión, resistentes a la corrosión):

Recomendado: Asiento de válvula/núcleo de válvula sinterizado HIP, contenido de Ni 812%, pulido espejo.

Motivo: Densidad $> 99,9\%$, resistente a H₂S/CO₂, conmutación > 10.000 veces.

Según los requisitos de rendimiento:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Alta precisión ($\pm 0,01$ mm): sinterización al vacío + HIP, desviación de contracción $\leq \pm 0,5\%$.

Alta resistencia a la corrosión: contenido de Ni 1015%, adición de trazas de Cr/Mo, resistente al agua de mar durante 10 años.

Baja fuga: sinterización HIP, superficie Ra $< 0,2 \mu\text{m}$, revestimiento de Ni/PTFE.

Según el presupuesto de costos:

Bajo coste: horno de sinterización de atmósfera, 0,8 kWh/kg, adecuado para grandes cantidades de juntas.

Alto rendimiento: horno de sinterización HIP, 2 kWh/kg, adecuado para componentes críticos para válvulas.

Selección del horno de sinterización:

Lotes pequeños y medianos (< 50 kg/horno): Horno de sinterización al vacío de una sola cámara con alta flexibilidad.

Lotes grandes (> 200 kg/horno): Horno de sinterización al vacío/atmósfera multicámara, reducción de costes del 20%.

Alto rendimiento: horno de sinterización HIP, densidad $> 99,9\%$, porosidad $< 0,001\%$.

6. Sugerencias de optimización

Proceso de sinterización:

Control de temperatura: $\pm 3^\circ\text{C}$, uniformidad $\pm 5^\circ\text{C}$, consistencia del producto incrementada en un 10%.

Desparafinado: vacío (10^{-2} Pa) + H₂ (10 L/min), carbono residual $< 0,05\%$.

HIP: 1350°C , 120 MPa, 2 horas, aumento de resistencia del 15%.

Material:

Contenido de Ni: 1012%, equilibrio de dureza y resistencia a la corrosión.

Recubrimiento: Ni/PTFE, coeficiente de fricción reducido en un 20%, resistencia al desgaste aumentada en un 30%.

Oligoelementos: Cr/Mo 0,52%, resistencia al H₂S aumentada en un 25%.

Mantenimiento de equipos:

Monitorización online: monitorización en tiempo real de temperatura, presión y O₂, reduciendo la tasa de fallos en un 20%.

Inspección de componentes: Los elementos de calentamiento de molibdeno/tungsteno deben recibir mantenimiento cada 4.000 horas y su vida útil aumentará en un 25 %.

7. Normas

GB/T 345052017: Precisión dimensional $\pm 0,01$ mm.

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Densidad $> 99\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 51692013: Porosidad A02B00C00.

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa .

GB/T 7997-2017: Dureza 1400-2200 HV.

NACE MR 0175: Resistente a la corrosión por H₂S/CO₂.

API 6A: Presión de válvula de aguas profundas 15.000-20.000 psi.

8. Conclusión

Los sellos y válvulas de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas se utilizan ampliamente debido a su alta densidad (>99,9%), dureza (1400-2200 HV), resistencia a la corrosión (resistencia a H₂S/CO₂/agua de mar) y baja tasa de fugas (<10⁻⁶ mbar·L /s), cumpliendo con los requisitos extremos de la extracción de petróleo y gas en aguas profundas. Los hornos de sinterización al vacío, los hornos de sinterización HIP y los hornos de sinterización atmosférica son adecuados para la producción en masa, de alta precisión y alto rendimiento, respectivamente. La optimización de los parámetros del proceso (como 1350 °C, 120 MPa, H₂O₂ <5 ppm) mejora significativamente el rendimiento del producto. CTIA GROUP LTD utiliza tecnología de sinterización avanzada en la producción de sellos, anillos de sellado y válvulas de carburo cementado a base de níquel para aguas profundas, proporcionando soluciones altamente confiables para asistir en la ingeniería en aguas profundas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Un apéndice:

Cuerpo y sellos de bomba química de carburo a base de níquel

El carburo cementado a base de níquel (WC + Ni) es un material ideal para cuerpos de bombas químicas, sellos y sellos debido a su excelente resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste, alta resistencia (2,0-2,8 GPa) y estabilidad a altas temperaturas (>1000 °C). Se usa ampliamente en las industrias química, petrolera y farmacéutica para hacer frente a fluidos corrosivos (como ácidos, álcalis y soluciones salinas), altas temperaturas (50-300 °C) y altas presiones (500-5000 psi). Estos componentes deben cumplir estrictos requisitos de rendimiento, que incluyen dureza (1400-2200 HV), porosidad (<0,01 %), rendimiento de sellado (tasa de fuga 10^{-6} mbar·L /s) y resistencia a la corrosión (de conformidad con NACE MR0175). Este artículo combina normas nacionales (como GB/T 183762014, GB/T 38502015) y prácticas de la industria para presentar en detalle el proceso de sinterización, el rendimiento, la aplicación y las recomendaciones de selección de cuerpos y sellos de bombas químicas de carburo cementado a base de níquel.

1. Proceso de horno de sinterización de carburo cementado a base de níquel

Los cuerpos y sellos de bombas químicas de carburo cementado a base de níquel se preparan mediante sinterización a alta temperatura. Los hornos de sinterización incluyen hornos de sinterización al vacío, hornos de sinterización por prensado isostático en caliente (HIP) y hornos de sinterización atmosférica. Los parámetros del proceso están optimizados para entornos químicos corrosivos.

1.1 Tipos de hornos de sinterización y parámetros del proceso

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Horno de sinterización al vacío:

Aplicación: Producción de juntas de precisión (p. ej. Ø 5150 mm) y piezas de bombas (p. ej. impulsor Ø 50300 mm).

Parámetros del proceso:

200600 °C, velocidad de calentamiento 25 °C/min, grado de vacío 10^{-2} Pa, caudal de H₂ 515 L/min, 24 horas, tasa de desparafinado >99,5 %.

Sinterización: 1350-1450 °C, velocidad de calentamiento 510 °C/min, grado de vacío 10^{-4} 10^{-5} Pa, mantener caliente durante 24 horas.

Enfriamiento: 1015°C/min (enfriamiento forzado Ar), hasta 100°C.

Propiedades: densidad 14,514,9 g/cm³, dureza 14002000 HV, porosidad <0,01%.

Horno de prensado isostático en caliente (HIP):

Aplicación: Producción de juntas de alto rendimiento y cuerpos de bombas (por ejemplo, carcasa de bomba Ø 100-500 mm), eliminación de microporos.

Parámetros del proceso:

Sinterización: 1350-1450 °C, velocidad de calentamiento 58 °C/min, presión 100-150 MPa (Ar), mantener caliente durante 13 horas.

Post-tratamiento: 1300-1350°C, 80-100 MPa, 12 horas, porosidad reducida a <0,001%.

Enfriamiento: 1520°C/min (alta presión Ar) a 200°C.

Propiedades: densidad >99,9% (14,815,0 g/cm³), dureza 18002200 HV, resistencia 2,22,8 GPa.

Horno de sinterización de atmósfera:

Aplicación: Producción en masa de sellos (como sellos mecánicos) y piezas de bombas (como bujes).

Parámetros del proceso:

Desparafinado: 200500°C, velocidad de calentamiento 35°C/min, flujo de H₂ 2050 L/min, O₂ <10 ppm, 35 horas.

Sinterización: 1300-1400 °C, velocidad de calentamiento 510 °C/min, atmósfera de H₂/ Ar, mantener caliente durante 35 horas.

Refrigeración: 510°C/min (protección N₂), hasta 100°C.

Propiedades: densidad >99% (14,514,8 g/cm³), dureza 14001800 HV, desviación dimensional ±0,10,5 mm.

1.2 Optimización de procesos

Control de temperatura: algoritmo PID+AI, precisión ±3°C, uniformidad ±5°C, reducción del estrés térmico en un 30%.

Desparafinado: combinación de vacío + H₂, carbono residual <0,05%, para evitar la oxidación de la fase Ni.

HIP: 1350°C, 120 MPa, 2 horas de mantenimiento, aumento de densidad de 0,5%, ciclo acortado en 20%.

Atmósfera: Pureza de H₂ >99,999%, O₂ <5 ppm, tasa de oxidación reducida al 50%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Rendimiento del cuerpo de la bomba química de carburo cementado a base de níquel

Los cuerpos de las bombas químicas (como las carcasas de las bombas centrífugas, los impulsores y los bujes) están hechos de carburo cementado a base de níquel para hacer frente a fluidos corrosivos (como ácido sulfúrico y ácido clorhídrico) y partículas abrasivas (contenido de sólidos <20%).

2.1 Propiedades del material

Composición: WC (8594%), Ni (615%), Cr/Mo (0,52%) mejora la resistencia a la corrosión.

Densidad: 14,515,0 g/cm³ (GB /T 38502015), desviación ±0,05 g/cm³ .

Dureza: 14002200 HV (GB/T 79972017), desviación ±3050 HV.

Resistencia: resistencia a la flexión 2,02,8 GPa (GB/T 38512015).

Porosidad: <0,01% (vacío/atmósfera), <0,001% (HIP, GB/T 51692013).

Resistencia a la corrosión: resistente al ácido sulfúrico (50%), ácido clorhídrico (30%), NaOH (40%), de conformidad con NACE MR0175.

2.2 Rendimiento de la bomba

Presión: 500-5000 psi, adecuado para bombas químicas de presión media y alta .

Temperatura: 50300°C, resistente a fluidos de alta temperatura.

Resistencia al desgaste: pérdida por desgaste <0,05 mm³/h (ASTM G65), mejor que el acero inoxidable 316L.

Tratamiento de superficie: galvanoplastia de Ni/Cr o recubrimiento DLC, coeficiente de fricción reducido en un 20%, resistencia al desgaste aumentada en un 30%.

Vida útil: funcionamiento continuo >10.000 horas, ciclo de mantenimiento >2 años.

2.3 Típico

Carcasa de la bomba: Ø 100500 mm, espesor de pared 520 mm, sinterizado HIP, resistente a alta presión.

Impulsor: Ø 50300 mm, superficie curva compleja, precisión ±0,05 mm.

Casquillo: Ø 20100 mm, superficie Ra <0,4 μ m , resistente al desgaste.

Recomendación: El cuerpo de la bomba química de carburo cementado a base de níquel producido por CTIA GROUP LTD adopta el proceso de sinterización HIP para garantizar una alta densidad (>99,9%) y una excelente resistencia a la corrosión para cumplir con los estrictos requisitos de la industria química.

3. Rendimiento de los sellos de carburo a base de níquel

Los sellos (como anillos de sellado mecánicos y juntas tóricas) se utilizan para el sellado dinámico

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

y estático de bombas químicas para evitar fugas de fluidos corrosivos.

3.1 Propiedades del material

Material: WC+Ni (Ni 812%), sinterización HIP, densidad >99,9%.

Dureza: 1800-2200 HV, la resistencia al desgaste es mejor que el SiC.

Resistencia: 2,22,8 GPa, tenacidad a la fractura KIC 1012 MPa·m^{1/2}.

Resistencia a la corrosión: mejor que el carburo de silicio en términos de resistencia a soluciones ácidas, alcalinas y salinas.

Superficie: pulida a espejo (Ra <0,2 μm), revestimiento de PTFE/DLC, coeficiente de fricción <0,1.

3.2 Rendimiento de sellado

Tasa de fuga: <10⁻⁶ mbar·L/s (prueba de helio, 3000 psi).

Presión: Vacío hasta 5000 psi.

Temperatura: 50300°C, resistente a fluidos de alta temperatura.

Sello dinámico: velocidad 1000-5000 rpm, vida útil >5000 horas.

Sello estático: tasa de compresión 1520%, vida útil >10.000 horas.

3.3 Típico

Anillo de sello mecánico: Ø 10150 mm, planitud <0,001 mm, resistente a alta presión.

Junta tórica: Ø 5100 mm, junta autorreforzante, resistente a la corrosión.

Junta de fuelle: Alta elasticidad, adecuada para sellado dinámico.

Recomendación: Los sellos y anillos de sellado de carburo a base de níquel producidos por CTIA GROUP LTD adoptan sinterización al vacío y tecnología HIP para cumplir con los requisitos de alta resistencia a la corrosión y bajas fugas de las bombas químicas.

4. Escenarios de aplicación

Cuerpo de la bomba química:

Escenario: Transporte de ácido sulfúrico (50%), ácido clorhídrico (30%) o fluidos que contengan partículas (sólidos <20%), como plantas de fertilizantes y refinerías.

Rendimiento: Densidad 14,815,0 g/cm³, dureza 1800-2200 HV, vida útil >10.000 horas.

Carcasa: Carcasa de bomba centrífuga (Ø 200 mm), sinterización HIP, 1400°C, 120 MPa, 4 horas, porosidad <0,001%, resistencia a la corrosión por ácido sulfúrico, 12.000 horas de funcionamiento.

Sellos:

Escenario: Sellos mecánicos de bombas químicas, conexiones de tuberías (3000 psi, 100-200 °C).

Rendimiento: Dureza 2000 HV, tasa de fuga <10⁻⁶ mbar·L/s, vida dinámica >5000 horas.

Ejemplo: Anillo de sellado mecánico (Ø 50 mm), sinterización HIP, 1350°C, 150 MPa, 3 horas, densidad 14,9 g/cm³, resistencia NaOH 40%, vida útil 6000 horas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5. Recomendaciones de selección

Según el entorno de aplicación:

Fluidos corrosivos (ácido/base):

Recomendado: Carcasa de bomba/anillos de sello sinterizados HIP, contenido de Ni 1012%, revestimiento DLC.

Motivo: Resistente al ácido sulfúrico/ácido clorhídrico, vida útil >10.000 horas.

Fluidos abrasivos (que contienen partículas):

Recomendado: Impulsor/buje sinterizado HIP, Ni 812%, dureza 2000 HV.

Motivo: Tasa de desgaste <0,05 mm³/h, resistencia a la abrasión.

Según los requisitos de rendimiento:

Alta precisión ($\pm 0,05$ mm): sinterización al vacío + HIP, desviación de contracción $\leq \pm 0,5\%$.

Alta resistencia a la corrosión: Ni 1015%, Cr/Mo 0,52%, resistencia a ácidos y álcalis durante 5 años.

Baja fuga: sinterización HIP, Ra <0,2 μm , revestimiento de PTFE/DLC.

Según el presupuesto de costos:

Bajo coste: horno de sinterización de atmósfera, 0,8 kWh/kg, adecuado para grandes cantidades de juntas.

Alto rendimiento: horno de sinterización HIP, 2 kWh/kg, adecuado para piezas clave de bombas.

Selección del horno de sinterización:

Lotes pequeños y medianos (<50 kg/horno): Horno de sinterización al vacío de una sola cámara con alta flexibilidad.

Lotes grandes (>200 kg/horno): Horno de sinterización al vacío/atmósfera multicámara, reducción de costes del 20%.

Alto rendimiento: horno de sinterización HIP, densidad >99,9%, porosidad <0,001%.

6. Sugerencias de optimización

Proceso de sinterización:

Control de temperatura: $\pm 3^\circ\text{C}$, uniformidad $\pm 5^\circ\text{C}$, consistencia incrementada en un 10%.

Desparafinado: vacío (10^{-2} Pa) + H₂ (10 L/min), carbono residual <0,05%.

HIP: 1350°C, 120 MPa, 2 horas, resistencia aumentada en un 15%.

Material:

Contenido de Ni: 1012%, equilibrio de dureza y resistencia a la corrosión.

Recubrimiento: PTFE/DLC, coeficiente de fricción reducido en un 20%, resistencia al desgaste aumentada en un 30%.

Oligoelementos: Cr/Mo 0,52%, resistencia a ácidos y álcalis aumentada en un 25%.

Mantenimiento de equipos:

Monitoreo en línea: monitoreo en tiempo real de temperatura, presión y O₂, reduciendo la tasa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

fallas en un 20%.

Inspección de componentes: Los elementos de calentamiento de molibdeno/tungsteno deben recibir mantenimiento cada 4.000 horas y su vida útil aumentará en un 25 %.

7. Normas

GB/T 345052017: Precisión dimensional $\pm 0,05$ mm.

GB/T 183762014: Porosidad $< 0,01\%$.

GB/T 38502015: Densidad $> 99\%$.

GB/T 51692013: Porosidad A02B00C00.

GB/T 38512015: Resistencia 2,0-2,8 GPa .

GB/T 7997-2017: Dureza 1400-2200 HV.

NACE MR0175: Resistencia a la corrosión ácida y alcalina.

API 610: Requisitos de rendimiento para bombas químicas.

8. Conclusión

Los cuerpos y sellos de carburo cementado a base de níquel para bombas químicas se caracterizan por su alta densidad ($> 99,9\%$), dureza (1400-2200 HV), resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos, álcalis/soluciones salinas) y baja tasa de fugas ($< 10^{-6}$ mbar·L /s), cumpliendo así con los exigentes requisitos de la industria química. Los hornos de sinterización al vacío, los hornos de sinterización HIP y los hornos de sinterización atmosférica son adecuados para la producción en masa, de alta precisión y alto rendimiento, respectivamente. Los procesos optimizados (como 1350 °C, 120 MPa, $H_2O_2 < 5$ ppm) mejoran significativamente el rendimiento del producto. CTIA GROUP LTD utiliza tecnología de sinterización avanzada en la producción de sellos, anillos de sellado y cuerpos de bombas químicas de carburo cementado a base de níquel, proporcionando soluciones altamente confiables para ayudar a los equipos químicos a operar eficientemente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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