Polvo de carburo de tungsteno (TCP)

Propiedades físicas y químicas, preparación y aplicaciones

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

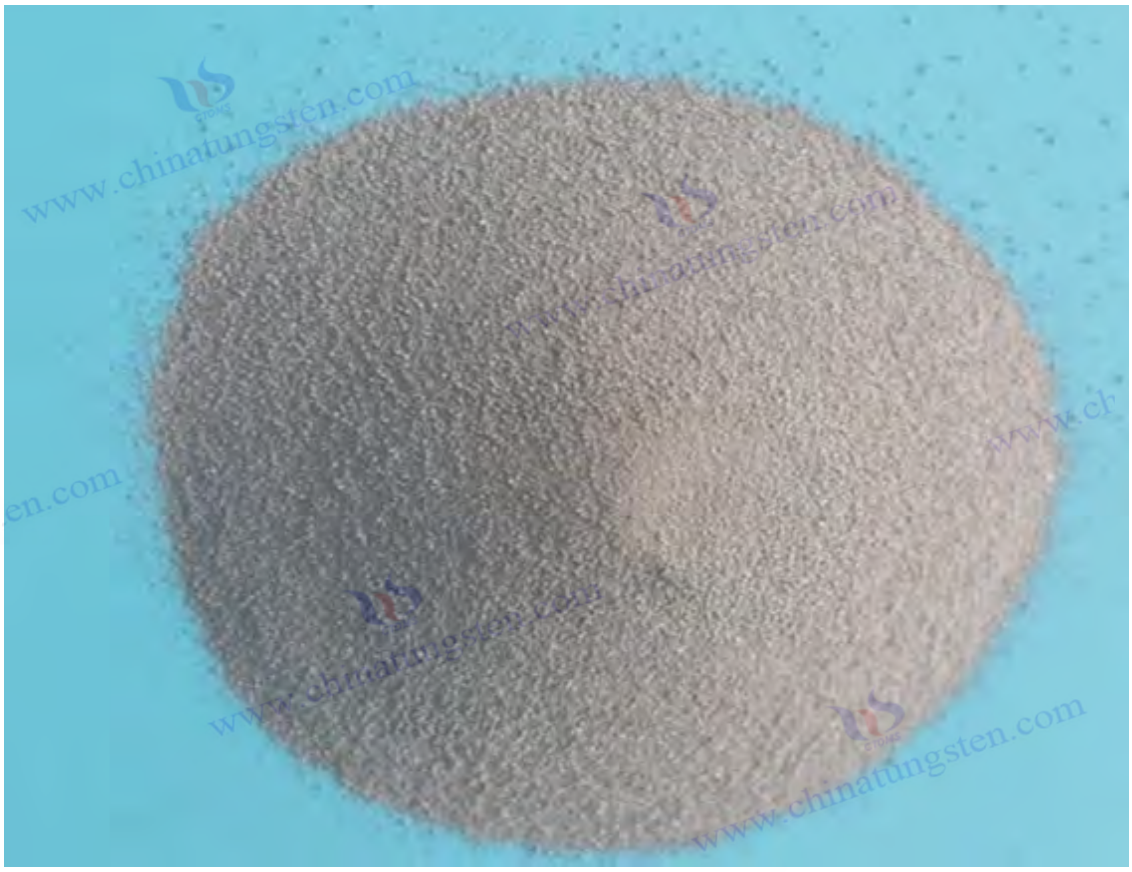


Tabla de contenido

Prefacio
Importancia y antecedentes de investigación del polvo de carburo de tungsteno
Objetivos y público de este libro
Descripción general del método de escritura y contenido

Capítulo 1: Introducción al polvo de carburo de tungsteno
1.1 Definición y composición química
1.2 Desarrollo histórico
1.3 Propiedades físicas y químicas básicas
1.4 Clasificación del polvo de carburo de tungsteno

Capítulo 2: Proceso de producción de polvo de carburo de tungsteno
2.1 Preparación de la materia prima
2.2 Método tradicional de carbonización
2.3 Método de deposición química de vapor (CVD)
2.4 Método de aleación mecánica
2.5 Otras tecnologías emergentes
2.6 Tecnología de posprocesamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Capítulo 3: Microestructura y tecnología de caracterización del polvo de carburo de tungsteno
3.1 Características de la microestructura
3.2 Métodos de caracterización
3.3 Análisis de la composición química
3.4 Prueba de propiedades físicas

Capítulo 4: Campos de aplicación del polvo de carburo de tungsteno (capítulos clave)
Descripción general
La versatilidad y el valor de aplicación del polvo de carburo de tungsteno
Estructura del capítulo y métodos de investigación
Análisis de fuentes de datos y casos

4.1 Fabricación de carburo cementado
4.1.1 Herramientas de corte
4.1.1.1 Herramientas de torneado y fresas
Fórmula WC-Co (contenido de cobalto 6%-12%) y rendimiento de corte Datos: Velocidad de corte aumentada en un 50% (en comparación con el acero de alta velocidad, >200 m/min) Caso: Procesamiento de bloques de cilindros de motores de automóviles (vida útil > 100.000 piezas)
4.1.1.2 Brocas y herramientas de perforación
Polvo WC de grado micrométrico (1-3 μm) en el procesamiento de agujeros profundos Rendimiento: Dureza HV 1600, resistencia al astillado >12 MPa·m² Tecnología: Broca con revestimiento WC- TiC multicapa (resistencia al desgaste aumentada 3 veces)
4.1.1.3 Herramientas de corte especiales
Microbroca para PCB (diámetro < 0,1 mm) y herramientas de procesamiento de materiales superduros Proceso de sinterización (1450 °C, HIP) de nanopolvo WC (<100 nm) Caso: Procesamiento de material compuesto de aviación (precisión ±0,005 mm)
4.1.2 Piezas resistentes al desgaste
4.1.2.1 Matrices de estampación
Aplicación de matrices basadas en WC en placas de acero de estampación en frío Datos: Vida útil > 500.000 veces (5 veces mayor que Cr12MoV) Tecnología: Sinterización WC-Co (1500 °C, 30 MPa)
4.1.2.2 Matriz de trefilado y matriz de extrusión
Polvo fino de WC (0,5-1 μm) en trefilado de cobre Rendimiento: Rugosidad superficial Ra <0,02 μm , tasa de desgaste <0,001 mm³/ N·m Caso: Matriz de trefilado en la industria del cable (funcionamiento continuo > 6 meses)
4.1.2.3 Cojinetes y sellos resistentes al desgaste
Aplicación de materiales compuestos WC-Ni en rodamientos de alta velocidad Datos: Coeficiente de fricción <0,1, resistencia a la temperatura >800 °C Tecnología: Optimización del proceso de prensado isostático en caliente (HIP)
4.1.3 Herramientas de mecanizado de precisión
4.1.3.1 Herramientas dentales y médicas
Micromecanizado de polvo de WC en brocas dentales (diámetro 0,3-1 mm) Propiedades: Dureza HV

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1800, biocompatibilidad (ISO 10993-5) Estuche: Fresa de cirugía dental (durabilidad > 1000 veces)

4.1.3.2 Molde óptico

Aplicación de polvo WC ultrafino en moldes de lentes de vidrio Datos: Precisión de superficie <10 nm, vida útil >100 000 veces de prensado Tecnología: Pulido de espejo combinado con revestimiento WC

4.2 Tecnología de recubrimiento de superficies

4.2.1 Recubrimiento por pulverización térmica

4.2.1.1 Pulverización HVOF

Aplicación de polvo de WC-Co (10%-12% Co) en recubrimiento resistente al desgaste Datos: dureza del recubrimiento HV 1200-1400, tasa de desgaste <0,01 mm^3/ N·m Caso: Álabes de motor de aeronave (vida útil > 3000 horas)

4.2.1.2 Proyección con llama

Aplicación de polvo WC-Ni en recubrimiento resistente al desgaste de bajo costo Rendimiento: Resistencia de unión >50 MPa, espesor 100-300 μm Caso: Cuchillas de maquinaria agrícola (resistencia al desgaste aumentada 4 veces)

4.2.2 Proyección de plasma y revestimiento láser

4.2.2.1 Pulverización de plasma

Recubrimiento compuesto WC-Cr3C2 resistente a la corrosión a alta temperatura Datos: Resistencia a la oxidación >1000 °C, porosidad <2 % Caso: Álabes de turbina de gas (funcionamiento > 5000 horas)

4.2.2.2 Revestimiento láser

Refuerzo de la superficie de las herramientas de perforación petrolera con polvo WC Rendimiento: espesor de recubrimiento 0,5-2 mm, dureza HV 1300 Caso: tubería de perforación de aguas profundas (vida útil de resistencia a la corrosión > 2 años)

4.2.3 Resistencia a altas temperaturas y recubrimiento especial

4.2.3.1 Recubrimiento resistente al choque térmico

Aplicación de recubrimientos a base de WC en moldes de alta temperatura Datos: Coeficiente de expansión térmica <5×10-6/°C, resistencia a la temperatura >1200°C Tecnología: Recubrimiento compuesto WC- TiC -Ni

4.2.3.2 Recubrimiento resistente a productos químicos

Resistencia a la corrosión del recubrimiento WC-CoCr en tuberías químicas Caso: Válvulas en entornos ácidos (vida útil > 3 años)

4.3 Herramientas de minería y construcción

4.3.1 Herramientas de perforación de rocas

4.3.1.1 Brocas para roca dura

Aplicación de brocas con incrustaciones de WC en la minería de granito Datos: Tenacidad al impacto >25 J/cm^2, velocidad de perforación >12 m/h Caso: Perforación de voladuras en minas (vida útil > 1000 m)

4.3.1.2 Herramientas de perforación de vetas de carbón

Cabezal de corte WC-Co en excavación de mina de carbón Rendimiento: Dureza HV 1500, resistencia al desgaste <0,002 mm^3/ N·m Tecnología: Refuerzo compuesto WC- TiC

4.3.2 Cortadores de escudos y equipos de tunelaje

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.3.2.1 Cabezal de corte con escudo Metro

Aplicación de herramientas de corte basadas en WC en formaciones de arenisca Datos: Vida útil de corte > 6000 m, resistencia al desgaste aumentada al doble Caso: Proyecto de túnel urbano (ciclo de reemplazo > 1 año)

4.3.2.2 Cortadora de túneles para terreno duro

WC- TiC en basalto Rendimiento: Tenacidad a la fractura >15 MPa·m² Tecnología: Optimización de la sinterización de polvo WC superduro

4.3.3 Revestimiento resistente al desgaste y equipo de trituración

4.3.3.1 Revestimiento del molino de bolas

Aplicación de revestimiento reforzado con WC en la molienda de minerales Datos: Tasa de desgaste <0,05 g/t, vida útil >2 años Caso: Procesamiento de mineral de hierro (mejora de la eficiencia del 30%)

4.3.3.2 Martillo triturador

Resistencia al desgaste del martillo WC-Co en la trituración de piedra caliza Rendimiento: Vida útil al impacto > 100.000 veces

4.4 Campo de la Electrónica y la Energía

4.4.1 Recubrimiento conductor y materiales de electrodos

4.4.1.1 Electrodos de pilas de combustible

Conductividad eléctrica del polvo de WC en celdas de combustible PEM Datos: Resistividad <10-5 Ω·cm , estabilidad del ciclo >10 000 veces Tecnología: Deposición PVD de película delgada de WC

4.4.1.2 Colector de corriente de batería de litio

Durabilidad del recubrimiento WC sobre papel de aluminio Rendimiento: Adhesión >20 N/cm, resistencia a la corrosión aumentada al doble Caso: Batería de vehículo eléctrico (tasa de retención de capacidad > 90 %)

4.4.2 Portador de catalizador

4.4.2.1 Catálisis de combustible de hidrógeno

Aplicación de polvo nano-WC (<50 nm) en electrólisis de agua Datos: Actividad catalítica >95% (en comparación con Pt/C) Tecnología: Catalizador compuesto WC-Pt

4.4.2.2 Catálisis química

Estabilidad de los soportes a base de WC en la síntesis de amoniaco Rendimiento: Resistencia a la temperatura >600°C, vida útil >5000 horas

4.4.3 Almacenamiento de energía y gestión térmica

4.4.3.1 Supercondensador

Capacidad específica de materiales de electrodos basados en WC (>250 F/g) Datos: Ciclo de vida > 8000 veces Caso: Nuevo sistema de almacenamiento de energía

4.4.3.2 Recubrimiento de gestión térmica

Aplicación de recubrimiento de disipación de calor WC en LED Rendimiento: Conductividad térmica >120 W/ m·K

4.5 Aplicaciones aeroespaciales y militares

4.5.1 Álabes y toberas de turbinas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.5.1.1 Álabes de motores de aeronaves

Aplicación del recubrimiento WC-Co en resistencia al desgaste a alta temperatura Datos: Resistencia a la temperatura >1300 °C, vida útil >4000 horas Caso: Motor de turbofán (eficiencia de empuje aumentada en un 5 %)

4.5.1.2 Boquilla de cohete

Aplicación de recubrimiento resistente al calor a base de WC en cohetes sólidos Rendimiento: Resistencia a la ablación <0,01 mm/s

4.5.2 Materiales de armadura

4.5.2.1 Blindaje del tanque

Rendimiento antibalístico del blindaje compuesto cerámico WC Datos: Dureza >2200 HV, resistencia a la penetración >1200 m/s Caso: Protección del tanque de batalla principal (espesor <50 mm)

4.5.2.2 Complemento del chaleco antibalas

Aplicación de sustrato WC ligero Rendimiento: Peso <2 kg/m², nivel de protección NIJ IV

4.5.3 Piezas resistentes al desgaste de la nave espacial

4.5.3.1 Maquinaria de a bordo

Resistencia al desgaste de recubrimientos de WC en juntas satélite Datos: Coeficiente de fricción <0,05, vida útil >10 años Tecnología: Proceso PVD al vacío

4.6 Otras aplicaciones emergentes

4.6.1 Impresión 3D y fabricación aditiva

4.6.1.1 Impresión de piezas metálicas

Aplicación de polvo de WC-Co en SLM (fusión selectiva por láser) Datos: Densidad >99%, precisión ±0,02 mm Caso: Prototipado rápido de piezas de aviación

4.6.1.2 Fabricación de moldes

Ventajas del polvo Nano WC en moldes de impresión 3D Rendimiento: Dureza superficial HV 2000

4.6.2 Materiales biomédicos

4.6.2.1 Implantes ortopédicos

Resistencia al desgaste del revestimiento de WC en la articulación de la cadera Datos: Tasa de desgaste <0,001 mm³/ N·m , tasa de supervivencia celular >98% Tecnología: Revestimiento compuesto WC-Ti

4.6.2.2 Restauraciones dentales

Materiales a base de WC en coronas dentales Rendimiento: Resistencia a la fractura >1000 MPa

4.6.3 Fabricación inteligente y sensores

4.6.3.1 Sensor de alta temperatura

Estabilidad del polvo de WC en sensores industriales Datos: Resistencia a la temperatura > 1000 °C, tiempo de respuesta < 1 ms Caso: Monitoreo de hornos de fabricación de acero

4.7 Casos de aplicación y análisis de datos

4.7.1 Tabla resumen de aplicaciones industriales

Comparación de datos en los campos de carburo cementado, recubrimiento, minería, electrónica, etc.

4.7.2 Análisis de comparación de rendimiento

Indicadores clave como dureza, resistencia al desgaste, vida útil, etc. (en comparación con los materiales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tradicionales)
4.7.3 Estudios de casos exitosos
Ejemplos de aplicaciones empresariales globales (como Sandvik, Kennametal)

4.8 Perspectivas de aplicación futuras
4.8.1 Potencial en campos emergentes
Componentes de refrigeración para computación cuántica Capa conductora electrónica flexible
4.8.2 Desafíos técnicos y soluciones
Mejora de la dispersión del polvo Nano-WC Mejora de la estabilidad de los recubrimientos de alta temperatura
4.8.3 Pronóstico del mercado
Tasa de crecimiento de la demanda en 2030 >6%, análisis de áreas clave

Capítulo 5: Control de calidad y estándares del polvo de carburo de tungsteno
5.1 Puntos clave del control de calidad
5.2 Normas internacionales
5.3 Normas nacionales
5.4 Comparación y aplicabilidad de normas

Capítulo 6: Optimización del rendimiento y modificación del polvo de carburo de tungsteno
6.1 Optimización del tamaño de partículas
6.2 Dopaje y modificación compuesta
6.3 Tecnología de modificación de superficies
6.4 Tratamiento térmico y recocido

Capítulo 7: Consideraciones ambientales y de seguridad del polvo de carburo de tungsteno
7.1 Impacto ambiental durante la producción
7.2 Especificaciones de operación de seguridad
7.3 Reciclaje y reciclaje

Capítulo 8: Tendencias del mercado y desarrollo del polvo de carburo de tungsteno
8.1 Panorama general del mercado global
8.2 Tendencias del desarrollo tecnológico
8.3 Perspectivas de aplicación futuras

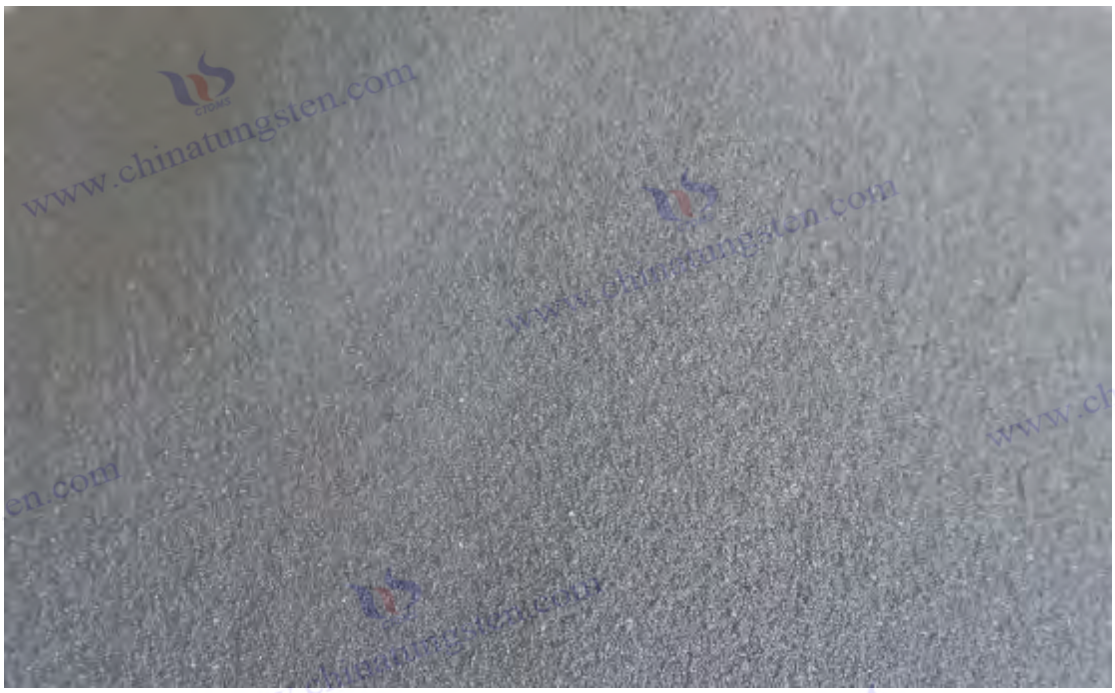
Capítulo 9: Terminología, estándares y recursos
9.1 Glosario de términos relacionados con el polvo de carburo de tungsteno
9.2 Referencias y normas
9.3 Recursos recomendados

Apéndice

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice A: Análisis de microestructura y rendimiento del polvo de carburo de tungsteno
Apéndice B: Estándares de tamaño de partícula y parámetros de preparación del polvo de carburo de tungsteno
Apéndice C: Comparación de normas internacionales y nacionales relacionadas con el polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Prefacio

Como material funcional con excelente rendimiento, el polvo de carburo de tungsteno (WC) se ha convertido en un material fundamental en la industria moderna y la tecnología de vanguardia, con una dureza de hasta HV 2000-2500, una resistencia al desgaste de 10 a 20 veces superior a la del acero tradicional y un punto de fusión de hasta 2870 °C. Su estructura cristalina hexagonal (constante de red a = 2,906 Å, c = 2,837 Å) y su alta densidad (15,63 g/cm³) le confieren una resistencia mecánica y una estabilidad química inigualables, lo que le confiere un valor de aplicación irremplazable en la fabricación de carburo cementado, la tecnología de recubrimiento de superficies, las herramientas de minería, la energía electrónica, la industria aeroespacial e incluso los campos biomédicos.

Desde los bordes afilados de los cuchillos industriales hasta los recubrimientos resistentes a altas temperaturas de los motores de aeronaves, desde los catalizadores eficientes de las celdas de combustible hasta los moldes de precisión de la impresión 3D, el polvo de carburo de tungsteno está continuamente ampliando los límites de la ciencia de los materiales y la innovación de la tecnología industrial con su versatilidad y alto rendimiento.

El descubrimiento y la aplicación del polvo de carburo de tungsteno se remontan a la investigación química del tungsteno a finales del siglo XIX. En 1893, el químico francés Henri Moissan sintetizó por primera vez el carburo de tungsteno mediante una reacción de carburación a alta temperatura, pero en aquel entonces era solo un producto de laboratorio y no tenía aplicación industrial.

El verdadero avance se produjo en la década de 1920, cuando el metalúrgico alemán Karl Schröter descubrió que la sinterización de polvo de carburo de tungsteno con polvo de cobalto (Co) (1450-1600 °C, 10-20 MPa) podía producir carburo cementado con una dureza cercana a la del diamante (HV 1500-1800)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mientras estudiaba materiales duros a base de tungsteno. Esta invención fue patentada por Osram en Alemania en 1923 e industrializada en 1926 por Rheinmetall en Alemania para la fabricación de herramientas de corte. Posteriormente, el carburo cementado de carburo de tungsteno entró en el mercado bajo la marca "Widia" (en alemán, "Wie Diamant", que significa "como el diamante"), reemplazando rápidamente al acero rápido tradicional y marcando el comienzo de la era del carburo cementado. La investigación en China sobre el polvo de carburo de tungsteno comenzó en la década de 1950. En 1958, la Fábrica de Carburo Cementado de Zhuzhou produjo con éxito a modo de prueba el primer lote de carburo cementado WC-Co, cubriendo así la escasez nacional. Desde entonces, gracias a los abundantes recursos de tungsteno de China (que representan aproximadamente el 60 % de las reservas mundiales, según datos del USGS 2023), el uso del polvo de carburo de tungsteno se ha expandido rápidamente en la industria china, abarcando campos como la fabricación de maquinaria, la minería y la defensa nacional.

Con la llegada del siglo XXI, el auge de la nanotecnología, la ingeniería de superficies y la fabricación inteligente ha ampliado aún más el campo de aplicación del polvo de carburo de tungsteno. Según datos de CTIA GROUP, en 2023 la demanda anual mundial de polvo de carburo de tungsteno superó las 60.000 toneladas, y se prevé que el tamaño del mercado supere los 5.000 millones de dólares estadounidenses para 2030, con una tasa de crecimiento anual promedio de aproximadamente el 6,5 %. Su proceso de producción ha evolucionado desde el método tradicional de carbonización a alta temperatura (1800-2000 °C, tiempo de carbonización de 2 a 4 horas) hasta la deposición química en fase de vapor (CVD, velocidad de deposición de 0,1-1 μm /min), la aleación mecánica (tiempo de molienda de bolas de 20 a 50 horas, tamaño de grano <50 nm) y otras tecnologías avanzadas. El tamaño de partícula se ha reducido del nivel micrométrico (1-5 μm) al nivel nanométrico (<100 nm), y el área superficial específica se ha incrementado a 20-50 m^2/g, lo que ha mejorado significativamente el rendimiento y el potencial de aplicación del material.

Como autor de este libro, CTIA GROUP LTD (CTIA GROUP) y CTIA GROUP (China Tungsten Online) se fundaron en 1997 y tienen su sede en Xiamen, China. Son empresas de alta tecnología enfocadas en la investigación y desarrollo, producción y ventas de productos de tungsteno. Con un profundo conocimiento de la industria del tungsteno de China y más de 20 años de acumulación técnica, estamos comprometidos a promover la innovación y aplicación del polvo de carburo de tungsteno. Creemos profundamente que la combinación sistemática del polvo de carburo de tungsteno en la literatura técnica actual aún es insuficiente, especialmente la falta de integración integral de la ciencia básica a las aplicaciones de vanguardia. Con este fin, este libro tiene como objetivo proporcionar a investigadores académicos, profesionales industriales y desarrolladores técnicos un material de referencia autorizado, detallado y práctico para ayudar a los lectores a comprender profundamente las características, el proceso de producción, la tecnología de análisis y las aplicaciones diversificadas del polvo de carburo de tungsteno, y al mismo tiempo proporcionar una base científica y una guía práctica para futuros avances tecnológicos. Este libro no es sólo un resumen de los conocimientos teóricos, sino también la cristalización de nuestros muchos años de experiencia práctica en el campo del polvo de carburo de tungsteno.

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

Los lectores objetivos de este libro incluyen: investigadores en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales, que estén interesados en la microestructura (tamaño de grano 10-50 nm) y la optimización del rendimiento (como la tenacidad a la fractura > 15 MPa·m $^{1/2}$) del polvo de carburo de tungsteno; ingenieros en las industrias metalúrgica, de fabricación mecánica y minera, que estén buscando soluciones para mejorar la vida útil de las herramientas (resistencia al desgaste aumentada de 5 a 10 veces) y la eficiencia; profesionales en los campos de la electrónica, la energía y la biomedicina, que estén explorando la aplicación del polvo de carburo de tungsteno en recubrimientos conductores (resistividad <10 $^{-5}$ Ω·cm), portadores de catalizadores (área superficial específica >50 m² / g), y estudiantes y técnicos interesados en la tecnología de materiales que quieran dominar sistemáticamente los conocimientos básicos en este campo. Además, este libro también proporciona información sobre las tendencias de la industria para los tomadores de decisiones corporativas y los analistas de mercado, como los pronósticos de la demanda global y las direcciones de desarrollo tecnológico.

En términos de métodos de escritura, este libro adopta una perspectiva multidisciplinaria, integrando los últimos logros de la ciencia de los materiales, la ingeniería química, la fabricación mecánica y la física aplicada. En términos de estructura de contenido, los Capítulos 1 a 3 introducen las características básicas, el proceso de producción y el análisis de la microestructura del polvo de carburo de tungsteno (como la posición del pico XRD 2θ = 35,6° corresponde al plano cristalino WC (100)); el Capítulo 4, como foco del libro, discute su aplicación en carburo cementado (dureza HV 1500-2000), recubrimiento de superficies (resistencia de unión > 70 MPa), herramientas de minería (tenacidad de impacto > 25 J / cm²) y otros campos en detalle, hasta escenarios específicos y datos técnicos; los Capítulos 5 a 6 se centran en el control de calidad (como la distribución del tamaño de partícula RSD < 5%), estándares y optimización del rendimiento (como el dopaje de Co para mejorar la tenacidad); Los capítulos 7 y 8 se centran en el impacto ambiental (como la emisión de polvo <10 mg/m³), las consideraciones de seguridad y las tendencias del mercado. El capítulo 9 proporciona un glosario y recursos de apoyo. El apéndice complementa el microanálisis (resolución SEM/TEM <1 nm), los estándares de tamaño de partícula y las comparaciones de especificaciones. El libro cita extensamente estándares internacionales (como ISO 4499-2:2020, ASTM B430-19), especificaciones nacionales (como GB/T 4295-2008) y la literatura más reciente (como el artículo de 2023 en Journal of Materials Science), y se complementa con datos experimentales, imágenes microscópicas y análisis de casos para garantizar la cientificidad y la practicidad del contenido.

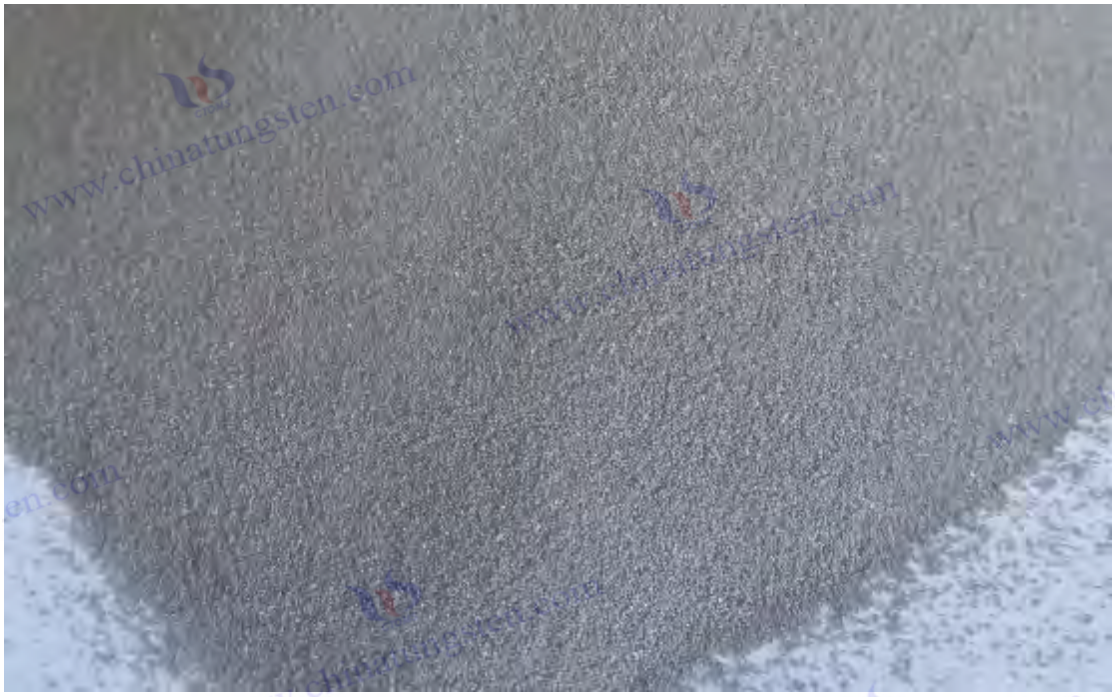
En el contexto del desarrollo verde global, las posibilidades de aplicación del polvo de carburo de tungsteno son cada vez mayores. CTIA GROUP espera ofrecer a los lectores referencias técnicas completas e inspiración innovadora a través de este libro. Agradecemos a la Asociación de la Industria del Tungsteno de China, al Instituto de Materiales de la Academia China de Ciencias y a la Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA) su apoyo, y esperamos recibir sus valiosos comentarios para seguir mejorando este libro.

CTIA GROUP LTD
Abril de 2025

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

Xiamen, China

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 1: Introducción al polvo de carburo de tungsteno

Como material funcional de alto rendimiento, el polvo de carburo de tungsteno (WC) ocupa un lugar central en la fabricación industrial, la investigación científica y la tecnología de vanguardia gracias a su dureza, resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas. Sus propiedades físicas y químicas únicas lo convierten en un material indispensable en el carburo cementado, recubrimientos de superficies, herramientas de minería e incluso en el campo de la energía electrónica. Partiendo de la definición y composición química del polvo de carburo de tungsteno, este capítulo explica exhaustivamente sus propiedades físicas y químicas, lo clasifica según normas nacionales y especificaciones internacionales, y explora en profundidad su relación con el polvo de tungsteno, así como la influencia clave del contenido de carbono en el rendimiento. A través de abundantes datos experimentales y antecedentes de aplicación, este capítulo proporciona a los lectores un marco de conocimiento completo sobre el polvo de carburo de tungsteno, sentando una base sólida para los capítulos posteriores.

1.1 Definición y composición química del polvo de carburo de tungsteno

met á lico compuesto de tungsteno (W) y carbono (C) en una proporción atómica de 1:1. Su fórmula química es WC y su peso molecular es de 195,85 g/mol. Su estructura cristalina es un sistema hexagonal simple (grupo espacial P6m2), con constantes de red a=2,906 Å, c=2,837 Å y una relación c/a de 0,976 (JCPDS 51-0939). En esta estructura, los átomos de tungsteno forman un esqueleto hexagonal compacto, y los átomos de carbono rellenan los huecos octaédricos y están unidos por fuertes enlaces covalentes metálicos. Esta estructura confiere al polvo de carburo de tungsteno una dureza y una resistencia a la deformación extremadamente altas, lo que lo convierte en un representante de los materiales duros.

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

El contenido teórico de carbono del polvo de carburo de tungsteno es del 6,13 % (fracción másica), lo que corresponde a los átomos de carbono presentes en su totalidad en un estado químicamente ligado. En la producción industrial, el contenido de carbono suele controlarse entre el 6,10 % y el 6,18 % para garantizar la pureza del WC monofásico y evitar la formación de W_2C o carbono libre. Por ejemplo, la norma GB/T 4295-2008 estipula que la desviación total del contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno de alta pureza no debe superar el ±0,05 %, el contenido de impurezas (como Fe, Ni, Cr) debe ser inferior al 0,01 % y el contenido de oxígeno se controla entre 50 y 200 ppm. En la práctica, el polvo de carburo de tungsteno se puede dividir en polvo de WC monofásico y polvo de fase compuesta (como WC-Co, WC- TiC). Este último está dopado con cobalto (5%-15%) o carburo de titanio para mejorar la tenacidad o la resistencia a la corrosión, y se utiliza ampliamente en la fabricación de herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

1.2 Propiedades físicas del polvo de carburo de tungsteno

1.2.1 Estructura cristalina y morfología del polvo de carburo de tungsteno

La estructura hexagonal del polvo de carburo de tungsteno es la base microscópica de su excelente rendimiento. El análisis de difracción de rayos X (DRX) muestra que sus picos característicos se ubican en 2θ=35,641° (plano cristalino 100, d=2,518 Å), 48,298° (plano cristalino 101, d=1,883 Å) y 31,514° (plano cristalino 001, d=2,837 Å), y la relación de intensidad de pico se ajusta al espectro estándar de WC monofásico (JCPDS 51-0939). El tamaño de grano varía dependiendo del proceso de preparación. El tamaño de grano del producto del método tradicional de carburación a alta temperatura es de 1-5 μm . La aleación mecánica o la deposición química en fase de vapor (CVD) pueden preparar polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica <100 nm. Las observaciones con microscopio electrónico de barrido (MEB) muestran que las partículas de polvo de carburo de tungsteno de tamaño micrométrico presentan una morfología poliédrica irregular, bordes afilados y una rugosidad superficial Ra de aproximadamente 0,1-0,5 μm ; mientras que el polvo de carburo de tungsteno de tamaño nanométrico tiende a ser casi esférico, con una superficie específica de 20-50 m^2/g (medida mediante el método BET). La microscopía electrónica de transmisión (MET) revela además la presencia de un pequeño número de defectos en los límites de grano dentro de las nanopartículas de WC, y la separación de las franjas reticulares concuerda con los resultados de XRD.

1.2.2 Densidad del polvo de carburo de tungsteno

La densidad teórica del polvo de carburo de tungsteno es de 15,63 g/cm^3 (25 °C), que se calcula a partir de su volumen de unidad hexagonal (V = 21,38 $Å^3$) y peso molecular. El polvo industrial real tiene una densidad ligeramente inferior debido a microporos o impurezas, normalmente de 15,5 a 15,6 g/cm^3 (determinada por el método de Arquímedes, precisión de ±0,01 g/cm^3). La densidad varía ligeramente con el tamaño del grano, pero puede alcanzar más del 99,5 % después de la sinterización. La alta densidad permite que el polvo de carburo de tungsteno proporcione una excelente resistencia a la compresión en el carburo cementado. Por ejemplo, la resistencia a la compresión del carburo cementado WC-Co puede

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

alcanzar los 4000-6000 MPa, superando ampliamente al acero tradicional (800-1500 MPa). En aplicaciones de recubrimiento, la alta densidad también mejora la resistencia al desgaste.

1.2.3 Dureza del polvo de carburo de tungsteno

La dureza Vickers (HV) del polvo de carburo de tungsteno oscila entre 2000 y 2500 (carga de 1 kg, norma ASTM E384), similar a la del diamante natural (HV 10 000) y muy superior a la del acero de alta velocidad (HV 600-800) o la alúmina (HV 1500-1800). La dureza aumenta al disminuir el tamaño de grano. Por ejemplo, la dureza del WC con granos de 1 μm es de aproximadamente HV 2200, mientras que la del nanoWC con <100 nm puede alcanzar HV 2600-2800, lo que se atribuye al efecto de fortalecimiento del límite de grano (relación Hall-Petch). Los experimentos muestran que, tras el dopaje con un 5-10 % de cobalto, la dureza disminuye ligeramente a HV 1500-1800, pero la tenacidad mejora significativamente (la tenacidad a la fractura K_IC aumenta de 8 MPa·m^{1} /^{2} a 12-15 MPa·m^{1} /^{2}). La estabilidad de la dureza lo hace excelente para herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste.

1.2.4 Punto de fusión y estabilidad térmica del polvo de carburo de tungsteno

El punto de fusión del polvo de carburo de tungsteno es de 2870 °C (valor bibliográfico: 2867-2875 °C, determinado mediante análisis térmico diferencial), uno de los más altos entre los carburos metálicos. Por encima de 2600 °C, el WC comienza a descomponerse, y la reacción es: $2WC \rightarrow W_2C + C$. La dureza del producto de descomposición, W_2C, disminuye (HV: 1600-2000), y el carbono libre afecta a la sinterización posterior. La conductividad térmica es de 84 W/ m·K (25 °C), que disminuye ligeramente a 70 W/ m·K (1000 °C) al aumentar la temperatura. El coeficiente de expansión térmica es de 4,5 × 10^{-6} /°C (25-1000 °C), inferior al del tungsteno (4,8 × 10^{-6} /°C) y el acero (12 × 10^{-6} /°C). Esta baja expansión térmica y su alta conductividad térmica le permiten mantener la integridad estructural en entornos de alta temperatura (como los recubrimientos de motores de aeronaves, >1200 °C). El análisis termogravimétrico (TGA) muestra que el polvo de carburo de tungsteno no presenta una pérdida de masa significativa hasta 2000 °C en atmósfera inerte (Ar).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

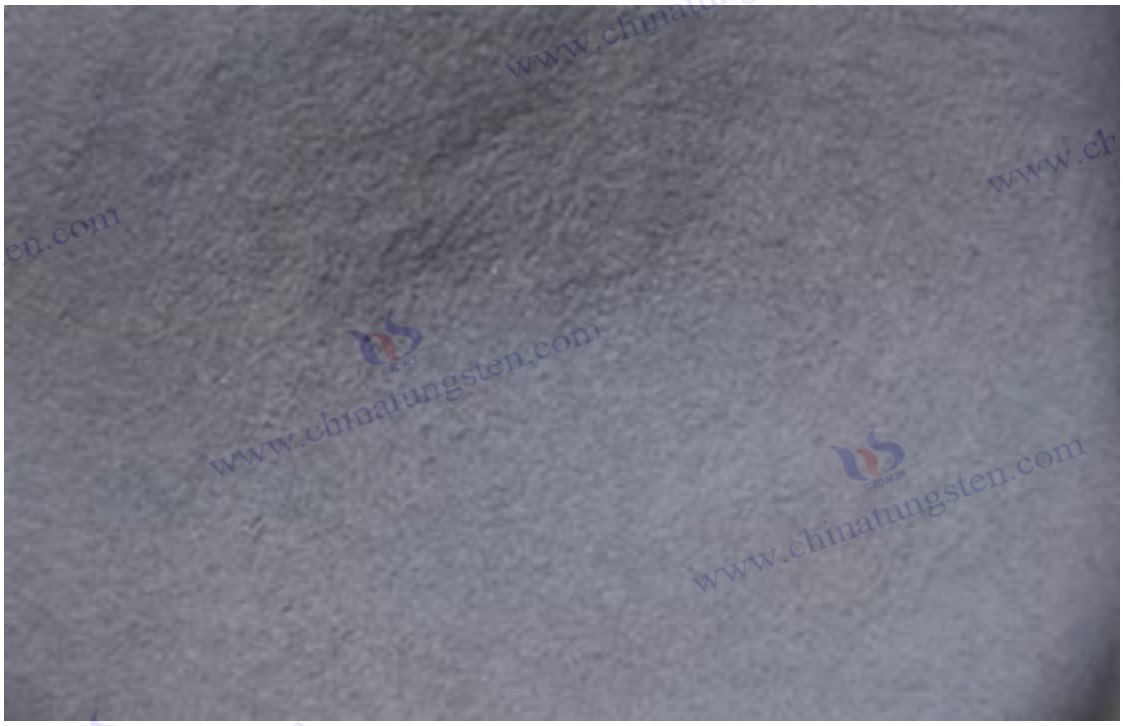
Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.
For more information or customized products, please contact:
Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595
Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.



1.2.5 Propiedades eléctricas y magnéticas del polvo de carburo de tungsteno

La resistividad del polvo de carburo de tungsteno es de 19,2 × 10^{-8} Ω·m (a 25 °C, medida mediante el método de cuatro sondas). Tiene cierta conductividad, pero es inferior a la del tungsteno puro (5,5 × 10^{-8} Ω·m) o el cobre (1,68 × 10^{-8} Ω·m). La resistividad aumenta con la temperatura y es de aproximadamente 25 × 10^{-8} Ω·m a 1000 °C , lo que indica que posee propiedades semiconductoras. La susceptibilidad magnética es de 1,2 × 10^{-6} cm^3/mol (a temperatura ambiente, medida con un magnetómetro de muestra vibratoria VSM), lo cual es débilmente paramagnético, ligeramente superior a la del tungsteno puro (0,3 × 10^{-6} cm^3/mol), pero mucho inferior a la de los materiales ferromagnéticos (como el Fe, 2,2 × 10^{-6} cm^3/mol). Su bajo magnetismo lo hace menos susceptible a la interferencia del campo magnético en dispositivos electrónicos (como los electrodos de las pilas de combustible).

1.3 Propiedades químicas del polvo de carburo de tungsteno

1.3.1 Estabilidad química del polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

El polvo de carburo de tungsteno exhibe una excelente estabilidad química a temperatura ambiente. Experimentos demuestran que no presenta pérdida de masa evidente (<0,01 %) tras sumergirse en soluciones de HCl al 37 %, H_2SO_4 al 98 % o NaOH al 10 % durante 1000 horas, lo que indica una alta resistencia a la corrosión ácida y alcalina. Sin embargo, en ácidos oxidantes fuertes a alta temperatura (como HNO_3 al 70 % y 60 °C), el polvo de carburo de tungsteno se disuelve lentamente, y la reacción es: $WC + 10HNO_3 \rightarrow WO_3 + CO_2 + 5H_2O + 10NO_2$, con una velocidad de disolución de aproximadamente 0,05 $g/m^2 \cdot h$. Esta estabilidad lo hace adecuado para recubrimientos de tuberías químicas y piezas resistentes al desgaste en entornos ácidos.

1.3.2 Comportamiento de oxidación del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno comienza a oxidarse a 600-800 °C en una atmósfera de oxígeno, y la reacción es: $2WC + 5O_2 \rightarrow 2WO_3 + 2CO_2$. El análisis termogravimétrico (TGA) muestra que la ganancia de peso de oxidación es del 5%-10% a 700 °C, y se convierte completamente en WO_3 (polvo amarillo, punto de fusión 1473 °C) a 1000 °C. La tasa de oxidación está relacionada con el tamaño de partícula. El WC a nanoescala (<100 nm) tiene una gran área superficial específica, y la temperatura de inicio de la oxidación se reduce a 550 °C, mientras que el WC a escala micrométrica (1-5 μm) es más estable. El producto de oxidación WO_3 tiene baja volatilidad, pero se volatiliza parcialmente a >1200 °C, lo que afecta la aplicación del recubrimiento.

1.3.3 Resistencia a la corrosión del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno presenta una excelente resistencia a la corrosión en soluciones acuosas ácidas o neutras. Por ejemplo, en fluido de simulación de agua de mar (NaCl al 3,5 %) con un pH de 2 a 7, la velocidad de corrosión es <0,001 mm/año en 500 horas. Sin embargo, en entornos alcalinos de alta temperatura (como NaOH fundido a 550 °C), el polvo de carburo de tungsteno se corroe rápidamente y reacciona para formar tungstato soluble (Na_2WO_4). Esta propiedad le confiere un buen rendimiento en ingeniería marina (como el recubrimiento de herramientas de perforación), pero debe utilizarse con precaución en entornos de fundición alcalinos.

1.3.4 Reacción del polvo de carburo de tungsteno con otros elementos

El polvo de carburo de tungsteno reacciona con el gas flúor (F_2) por encima de 500 °C para generar WF_6 (punto de ebullición 17,1 °C) y carbono libre. La reacción es: $WC + 3F_2 \rightarrow WF_6 + C$. A altas temperaturas (>1000 °C), el polvo de carburo de tungsteno forma una solución sólida o fase compuesta con metales (como Fe, Ni, Co). Por ejemplo, al sinterizar WC-Co, el Co se funde a 1400 °C y recubre las partículas de WC para formar una fase de unión. Esta reactividad es la base de la fabricación de carburo cementado, pero también limita su aplicación en entornos con alta concentración de halógenos.

1.4 Clasificación del polvo de carburo de tungsteno (según normas nacionales)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La clasificación del polvo de carburo de tungsteno se basa en la norma nacional china GB/T 4295-2008 y la norma internacional ISO 4499-2:2020, combinada con ASTM B430-19 para complementar la perspectiva internacional.

1.4.1 Clasificación del polvo de carburo de tungsteno por tamaño de partícula

Polvo de carburo de tungsteno de grano grueso (>5 μm)
Para piezas de desgaste y herramientas de minería, densidad aparente: 12-14 g/cm³, fluidez: 10-15 s/50 g (ISO 4499-2). Usos típicos: brocas para perforación de roca, resistencia al impacto >25 J/cm².

Polvo de carburo de tungsteno de partículas medianas (1-5 μm)
Grado industrial convencional, adecuado para herramientas de carburo, área superficial 0,5-2 m²/g (método BET), dureza HV 2000-2200. GB/T 4295-2008 requiere un contenido de oxígeno <200 ppm.

Polvo de carburo de tungsteno de grano fino (0,1-1 μm)
Para carburo cementado ultrafino (como microperforación de PCB), dureza HV 2200-2400, tenacidad a la fractura > 10 MPa·m^{1} /^{2}. La norma ASTM B430-19 recomienda una distribución del tamaño de partícula RSD < 3 %.

Polvo de carburo de tungsteno de tamaño nanométrico (<0,1 μm)
Para recubrimientos resistentes y materiales electrónicos, área superficial de 20-50 m²/g, tamaño de grano determinado por TEM (<50 nm). Se recomienda la norma ISO 4499-2 para aplicaciones de alta precisión.

1.4.2 Clasificación del polvo de carburo de tungsteno según su composición química

Polvo de carburo de tungsteno WC monofásico
Contenido de carbono: 6,10 %-6,18 %, pureza >99,9 %, contenido de oxígeno <50 ppm, impurezas de Fe y Ni <0,01 %. Apto para recubrimientos de aviación y soportes de catalizadores.

Polvo de carburo de tungsteno que contiene W_2C
Contenido de carbono 5,8%-6,10%, contenido de W_2C <5% (XRD cuantitativo), dureza HV 1600-2000, bajo costo, adecuado para revestimiento resistente al desgaste.

Polvo de carburo de tungsteno que contiene carbono libre
El contenido de carbono es del 6,18% al 6,30%, el carbono libre <0,5% (método de titulación química), la porosidad aumenta después de la sinterización (>1%) y se utiliza para recubrimientos por pulverización térmica.

1.4.3 Clasificación del polvo de carburo de tungsteno por aplicación

Polvo de carburo de tungsteno para carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Granos uniformes, contenido de oxígeno <200 ppm, desviación total de carbono ±0,05 % (GB/T 5314-2011). Aplicaciones típicas: herramientas de corte, dureza HV 1500-1800.

Polvo de carburo de tungsteno para recubrimiento
Las partículas son esféricas, con fluidez >20 s/50g, tamaño de partícula 1-10 μm , utilizadas para pulverización HVOF y dureza de recubrimiento HV 1200-1400.

Polvo de carburo de tungsteno para catalizador
Nanoescala, pureza > 99,95 %, área de superficie específica > 50 m^2/g, utilizado para electrodos de pilas de combustible, conductividad > 10^4 S/m.

1.5 La diferencia y la relación entre el polvo de carburo de tungsteno y el polvo de tungsteno

1.5.1 La diferencia entre el polvo de carburo de tungsteno y el polvo de tungsteno

Composición química
El polvo de tungsteno es tungsteno puro (W, pureza > 99,9 %, contenido de oxígeno < 100 ppm) y el polvo de carburo de tungsteno es WC (contenido de carbono 6,13 %).

Propiedades físicas
Densidad del polvo de tungsteno 19,25 g/cm^3, punto de fusión 3422 °C, dureza HV 300-500, resistividad $5,5 \times 10^{-8}$ Ω·m ; Densidad del polvo de carburo de tungsteno 15,63 g/cm^3, punto de fusión 2870 °C, dureza HV 2000-2500, resistividad $19,2 \times 10^{-8}$ Ω·m .

Usar
El polvo de tungsteno se utiliza para la preparación de alambre de tungsteno, varillas de tungsteno y acero inoxidable (WC); el polvo de carburo de tungsteno se utiliza para carburo cementado, recubrimientos y catalizadores. El polvo de tungsteno es resistente a altas temperaturas, pero tiene baja dureza, mientras que el polvo de carburo de tungsteno tiene alta dureza, pero una resistencia térmica ligeramente menor.

1.5.2 Relación entre el polvo de carburo de tungsteno y el polvo de tungsteno

El polvo de tungsteno es la materia prima directa del polvo de carburo de tungsteno y se prepara mediante una reacción de carbonización (W + C → WC). El proceso de carbonización industrial se lleva a cabo en una atmósfera de hidrógeno o argón a 1800-2000 °C. La fuente de carbono es negro de humo de alta pureza (pureza > 99,9 %) y el tiempo de reacción es de 2 a 4 horas. El tamaño de partícula del polvo de tungsteno (1-10 μm) determina la morfología inicial del polvo de carburo de tungsteno. Por ejemplo, se carboniza polvo de tungsteno de 5 μm para producir polvo de WC de 2-5 μm , mientras que se puede usar polvo de tungsteno de <1 μm para preparar WC submicrónico. El proceso de carbonización requiere

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

un control preciso de la cantidad de carbono. El exceso de carbono genera carbono libre (> 0,5 %) y el carbono insuficiente forma W_2C (reducción de la dureza). Los experimentos muestran que cuando la eficiencia de carbonización es > 98 %, la pureza del WC puede alcanzar el 99,9 %.

1.6 Regulación, importancia, determinación e impacto en el rendimiento del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno

1.6.1 Requisitos para el contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno

La norma GB/T 4295-2008 estipula que el contenido total de carbono del polvo de carburo de tungsteno es de 6,10 % a 6,18 %, y el carbono libre es <0,5 %; la norma ASTM B430-19 exige una desviación total de carbono de ±0,03 % y un contenido de oxígeno de <100 ppm. La norma ISO 4499-2:2020 recomienda además que el contenido de carbono en aplicaciones de alta gama (como la aviación) se mantenga entre 6,12 % y 6,15 % para optimizar el rendimiento. Superar este rango resultará en fases anormales, como W_2C (carbono <6,10 %) o carbono libre (carbono >6,18 %).

1.6.2 Importancia del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno es un parámetro clave que determina su microestructura y propiedades macroscópicas. El valor teórico del 6,13 % garantiza la red completa del WC monofásico, y el rendimiento es óptimo con una desviación de ±0,05 %. Un bajo contenido de carbono genera W_2C, lo que aumenta los defectos de red y reduce la dureza; un alto contenido de carbono provoca la precipitación de carbono libre, formando poros (porosidad >2 %) tras la sinterización, lo que reduce la resistencia. Estudios industriales muestran que la resistencia a la flexión del carburo cementado preparado a partir de polvo de WC con un 0,3 % de carbono libre disminuye de 2500 MPa a 2000 MPa.

1.6.3 Método de determinación del contenido de carbono en polvo de carburo de tungsteno

Método de combustión
Las muestras se quemaron en un horno de inducción de alta frecuencia (1800-2000 °C, caudal de oxígeno de 2 a 3 L/min) y el CO_2 se determinó mediante un detector infrarrojo con una precisión de carbono total de ±0,01 % (GB/T 223.5-2008).

Titulación química
El carbono libre se disuelve en ácido mixto H_2SO_4 - HNO_3 y luego se titula con una precisión de ±0,02 % (ASTM E1019-18).

Análisis XPS
La espectroscopia fotoelectrónica de rayos X distingue el carbono ligado (284,6 eV) del carbono libre (285,0 eV) con una resolución de superficie de <0,1 %, lo que es aplicable al nano-WC.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Análisis termogravimétrico (TGA)

Determinar la pérdida de carbono después de la oxidación y verificar el contenido de carbono libre con una precisión de ±0,05%.

1.6.4 Efecto del contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno en el rendimiento

Dureza

La dureza alcanza su máximo (HV 2500) con un contenido de carbono del 6,13 %, y desciende a HV 1800 con un contenido de carbono tan bajo como el 5,8 %. La dureza disminuye aproximadamente 50 HV por cada aumento del 1 % en la relación agua$_2$C.

Dureza

Cuando el carbono libre > 0,5%, la tenacidad a la fractura disminuye de 12 MPa·m ^{1} / ^{2} a 8-10 MPa·m ^{1} / ^{2} debido al debilitamiento de los límites de grano por los poros.

Resistencia al desgaste

El contenido de W_2C es >5%, la tasa de desgaste aumenta de 0,005 mm^3 / N · m a 0,015 mm^3 / N · m (prueba ASTM G65).

Sinterabilidad

Cuando el contenido de carbono libre es del 0,8 %, la densidad de sinterización disminuye del 99,5 % al 97 % y la resistencia a la compresión disminuye un 20 %. Caso: Una fábrica de herramientas utilizó polvo de WC con un 0,6 % de carbono libre, lo que redujo la vida útil de la herramienta del producto terminado en un 30 %.

Referencias

Referencias chinas

[1] GB/T 4295-2008 Administración Nacional de Normalización de Polvo de Carburo de Tungsteno de China 2008

[2] GB/T 223.5-2008 Acero y hierro: determinación del contenido de carbono y azufre. Administración Nacional de Normalización de China, 2008.

[3] GB/T 5314-2011 Polvos para carburo cementado Administración Nacional de Normalización de China 2011

[4] Distribución del tamaño de partículas - Método de difracción láser Administración Nacional de Normalización de China 2016

[5] Zhang Lide Nanomateriales y nanoestructuras Science Press 2002

Referencias en inglés

[6] ASTM B430-19 Métodos de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos refractarios y compuestos relacionados por turbidimetría ASTM International 2019

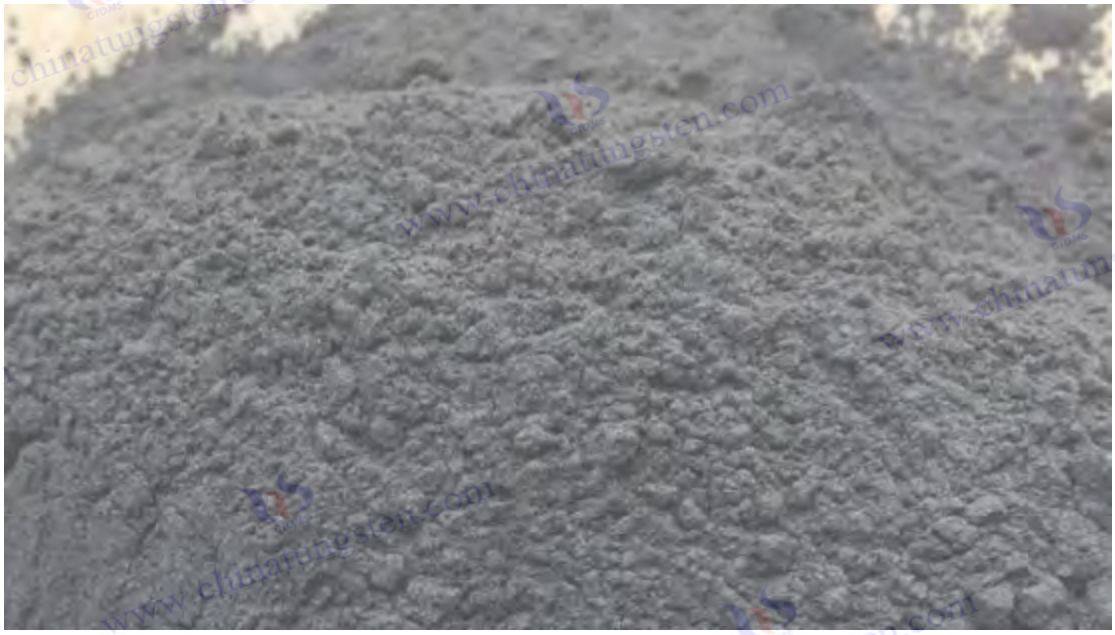
[7] ASTM E1019-18 Métodos de prueba estándar para la determinación de carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno en aleaciones de acero, hierro, níquel y cobalto mediante diversas técnicas de combustión y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

fusión ASTM International 2018
[8] ISO 4499-2:2020 Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura — Parte 2: Medición del tamaño del grano de acero inoxidable Organización Internacional de Normalización 2020
[9] Lassner, E., y Schubert, WD Tungsteno: propiedades, química, tecnología del elemento, aleaciones y compuestos químicos Springer 1999
[10] Upadhyaya, GS Carburos de tungsteno cementados: producción, propiedades y pruebas William Andrew Publishing 1998

Referencias en otros idiomas

[11] Asociación de Normas de Japón JIS H 7803:2005 Método de prueba para polvo de carburo de tungsteno Asociación de Normas de Japón 2005 Traducción al chino: 碳化钨粉末测试方法
[12] DIN EN ISO 4499-2:2020 Hartmetalle — Metallographische Bestimmung der Mikrostruktur — Parte 2: Messung der WC- Korngröße Alemán Institut für Normung 2020 Traducción al chino: 硬质合金 - 微观结构的金相测定 - 第 2 部分：WC 晶粒尺寸的测量 Traducción al inglés: Carburo cementado - Determinación metalúrgica de la microestructura - Parte 2: Medición del tamaño de grano del WC
[13] ГОСТ 25599.1-83 Порошки tres splavov . Método operación adaptación yuglera Государственный Comite SCSCRR por стандартам 1983 Traducción al chino: 硬质合金粉末 - 碳含量测定方法 Traducción al inglés: Polvos de aleaciones duras - Método para la determinación del contenido de carbono
[14] KS D 9502:2015 탄화텅스텐 100% 입도 분포 측정 Asociación de Normas Coreanas 2015 Traducción al chino: 碳化钨粉末粒度分布测定方法 Traducción al inglés: Método de determinación de la distribución del tamaño de las partículas de polvo de carburo de tungsteno



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ap é ndice :

Una breve historia del polvo de carburo de tungsteno

Como material industrial trascendental, el desarrollo del polvo de carburo de tungsteno (WC) abarca un largo camino desde su exploración química a finales del siglo XIX hasta su aplicación en múltiples campos en el siglo XXI. Gracias a su dureza (HV 2000-2500), resistencia al desgaste y estabilidad a altas temperaturas (punto de fusión 2870 °C), el polvo de carburo de tungsteno no solo ha transformado las industrias de procesamiento mecánico y minería, sino que también ha impulsado la innovación tecnológica en los campos de la electrónica, la energía, la industria aeroespacial y la biomedicina. Este apéndice describe exhaustivamente el descubrimiento, la industrialización, la globalización y las tendencias de desarrollo futuro del polvo de carburo de tungsteno, y ofrece a los lectores un panorama histórico completo a través de nodos históricos detallados, detalles técnicos, contribuciones humanas e impacto global, como referencia complementaria al Capítulo 1.

1 Primeros descubrimientos y exploración de laboratorio (finales del siglo XIX)

El origen del polvo de carburo de tungsteno se remonta a la investigación química del tungsteno a finales del siglo XIX, que fue la etapa embrionaria de la teoría a la práctica. En la década de 1860, el tungsteno como metal refractario (punto de fusión 3422 °C) comenzó a atraer la atención de la comunidad científica y fue ampliamente estudiado por su potencial en la iluminación (filamento de tungsteno) y la metalurgia (acero de tungsteno). Sin embargo, la primera síntesis de polvo de carburo de tungsteno apareció en 1893 por el químico francés Henri Moissan. Moissan era famoso por su investigación sobre compuestos refractarios. Utilizó un horno de arco eléctrico casero para hacer reaccionar óxido de tungsteno (WO_3, pureza de aproximadamente el 98 %) con polvo de grafito de alta pureza a una temperatura alta de aproximadamente 2000 °C para producir carburo de tungsteno (WC) en forma de cristales negros. Los registros experimentales muestran que la dureza de este cristal es extremadamente alta, cercana a la del diamante natural (HV 10,000), pero debido a la falta de métodos analíticos precisos en ese momento (como difracción de rayos X, XRD), Moissan solo lo describió como un "compuesto de tungsteno y carbono" y no pudo confirmar su estructura cristalina hexagonal (a = 2,906 Å, c = 2,837 Å).

El descubrimiento de Moissan no fue un incidente aislado, sino producto de los avances en la tecnología química y metalúrgica de finales del siglo XIX. En aquel entonces, la invención del horno de arco eléctrico (década de 1880) proporcionó las condiciones para experimentos a alta temperatura, y el desarrollo de minerales de tungsteno (como la scheelita $CaWO_4$ y la wolframita $FeMnWO_4$) sentó las bases para el suministro de materia prima. Sin embargo, debido a la falta de demanda industrial y a la insuficiente tecnología analítica, el polvo de carburo de tungsteno permaneció en el laboratorio en esta etapa y no se introdujo en la práctica. No obstante, el trabajo de Moissan inspiró a investigadores posteriores, y su artículo (publicado en Comptes)... El «Rendus de l'Académie des Sciences» se convirtió en el punto de partida para el estudio de las propiedades químicas del carburo de tungsteno.

Al mismo tiempo, otros científicos también intentaron explorar el carburo de tungsteno. En 1896, el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

químico estadounidense Charles L. Parsons intentó reducir el ácido túngstico (H_2WO_4) con carbono y obtuvo una sustancia similar al carburo de tungsteno, pero su pureza era baja (contenía W_2C y carbono libre), por lo que no se le dio mucha importancia. Estos primeros experimentos demostraron que, si bien se había logrado la síntesis del polvo de carburo de tungsteno, aún no se había reconocido su potencial de industrialización, y que las condiciones técnicas y la demanda del mercado aún debían seguir desarrollándose.

2. Avance industrial y nacimiento del carburo cementado (principios del siglo XX)

La industrialización del polvo de carburo de tungsteno comenzó en Alemania a principios del siglo XX, marcando su transformación de un producto de laboratorio a un material de ingeniería. A principios del siglo XX, el rápido desarrollo de la industria de la maquinaria generó una demanda urgente de herramientas de corte de alto rendimiento. El acero tradicional de alta velocidad (como el acero con un 18 % de W y una dureza HV de 600 a 800) se desgasta fácilmente durante el procesamiento a alta velocidad, y aunque el diamante tiene una dureza extremadamente alta (HV de 10 000), no se popularizó debido a su alto coste y la dificultad de su procesamiento. En este contexto, Alemania se convirtió en pionera en la industrialización del polvo de carburo de tungsteno.

En 1922, el metalúrgico alemán Karl Schröter descubrió accidentalmente el potencial del polvo de carburo de tungsteno mientras estudiaba materiales resistentes al desgaste a base de tungsteno en Osram (una empresa de iluminación famosa por sus lámparas de filamento de tungsteno). Intentó mezclar polvo de carburo de tungsteno (tamaño de partícula de aproximadamente 5-10 μm , pureza >99%) con polvo de cobalto (Co, contenido 5%-15%) y lo sinterizó a una temperatura elevada de 1450-1600 °C mediante pulvimetalurgia (presión 10-20 MPa, atmósfera de hidrógeno) para producir una aleación dura con una dureza cercana a la del diamante (HV 1500-1800). Los experimentos demuestran que la dureza de este material compuesto de WC-Co supera con creces la del acero de alta velocidad (2-3 veces mayor), y su tenacidad es superior a la del WC puro (la tenacidad a la fractura K_IC es de aproximadamente 10-12 MPa·m¹ /²). El avance de Schröter reside en el uso de cobalto como fase aglutinante, lo que soluciona el problema de la alta fragilidad y la dificultad para la formación de polvo de carburo de tungsteno puro.

En 1923, Osram solicitó una patente para este proceso (patente alemana número DE 420689) y autorizó a Rheinmetall a llevar a cabo la producción industrial. En 1926, Rheinmetall lanzó una marca de herramientas de carburo llamada "Widia" ("Wie Diamant", que significa "como el diamante"), que causó sensación en la industria alemana del mecanizado. Las herramientas de Widia ofrecen un excelente rendimiento en torneado, fresado y taladrado. Por ejemplo, al procesar acero, la velocidad de corte aumenta de 20 m/min a 100 m/min, y la vida útil de la herramienta se prolonga de 5 a 10 veces. Este éxito atrajo rápidamente la atención mundial. En 1927, los productos de Widia se exportaron al Reino Unido, Francia y Estados Unidos, convirtiéndose en un hito en la industrialización del polvo de carburo de tungsteno.

Durante este período, la tecnología de producción de polvo de carburo de tungsteno se mejoró

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

gradualmente. Las empresas alemanas utilizaron la carburación a alta temperatura para hacer reaccionar polvo de tungsteno (W, tamaño de partícula de 5-10 μm) con negro de humo (C, pureza >99%) en un horno tubular a 1800-2000 °C durante 2-4 horas para producir polvo de WC de tamaño micrométrico (contenido de carbono 6,10%-6,18%). La calidad del producto se controló mediante análisis químico (método de combustión para medir el carbono) y observación microscópica (tamaño de grano de 1-5 μm), sentando las bases para la posterior aplicación a gran escala del carburo cementado.

3 Difusión global y expansión de aplicaciones (mediados del siglo XX)

A mediados del siglo XX, la tecnología del polvo de carburo de tungsteno se extendió desde Alemania al mundo, y sus áreas de aplicación se expandieron desde herramientas de corte hasta minería, piezas resistentes al desgaste e industria militar. Esta etapa fue testigo de la madurez completa de su industrialización. En la década de 1930, los países europeos y americanos comenzaron a introducir la tecnología de polvo de carburo de tungsteno. En 1931, General Electric (GE) de los Estados Unidos produjo carburo cementado WC-Co en su fábrica de Nueva York a través de un acuerdo de licencia de tecnología con Osram. El primer lote de productos se utilizó para brocas de minería (dureza HV 1600, tenacidad al impacto >20 J/cm²). En el mismo año, la empresa metalúrgica británica Metallurgist Ltd. desarrolló revestimientos resistentes al desgaste de polvo de carburo de tungsteno para molinos de bolas y equipos de trituración, con una vida útil de 3 a 5 veces más larga que el acero al manganeso.

La Segunda Guerra Mundial (1939-1945) marcó el punto culminante de la aplicación del polvo de carburo de tungsteno. Tanto los Aliados como las potencias del Eje reconocieron su valor en la industria militar. Alemania utilizó polvo de carburo de tungsteno en el núcleo perforante del cañón antitanque de 88 mm (dureza HV 2000, penetración >150 mm en la placa de acero), lo que mejoró la capacidad de alcanzar objetivos blindados. Estados Unidos lo aplicó a los bloques de desgaste de las orugas del tanque M4 Sherman, prolongando su vida útil en el campo de batalla (más de 1000 horas). La demanda en tiempos de guerra impulsó un aumento repentino en la producción de polvo de carburo de tungsteno. Según las estadísticas, a principios de la década de 1940, la producción anual de Alemania aumentó de cientos de toneladas a 2000 toneladas, seguida de cerca por Estados Unidos, que alcanzó las 1000 toneladas anuales.

La investigación de China sobre el polvo de carburo de tungsteno comenzó en la década de 1950, impulsada por la asistencia técnica soviética. En 1952, el Primer Ministerio de Industria de Maquinaria de China cooperó con expertos soviéticos para establecer una planta piloto de carburo cementado en Zhuzhou (posteriormente renombrada Planta de Carburo Cementado de Zhuzhou). En 1958, la planta produjo con éxito una prueba del primer lote de carburo cementado WC-Co (contenido de cobalto 8%, dureza HV 1400, tamaño de grano 2-5 μm), que se utilizó para herramientas de máquina herramienta y herramientas de perforación de roca, llenando la brecha tecnológica nacional. Al mismo tiempo, emergieron las ventajas de los recursos de tungsteno de China, y las minas de tungsteno en Hunan, Jiangxi y otros lugares (las reservas representan aproximadamente el 60% del mundo, USGS 2023) proporcionaron una garantía para el suministro de materias primas. A finales de la década de 1960, la

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

producción anual de polvo de carburo de tungsteno de China superó las 500 toneladas, destinadas principalmente a las industrias de fabricación de maquinaria y minería.

Durante este período, la expansión de las aplicaciones del polvo de carburo de tungsteno también se reflejó en la tecnología de recubrimiento de superficies. En la década de 1940, Estados Unidos desarrolló el método de pulverización por llama (Flame Spraying), que pulverizaba polvo de carburo de tungsteno (tamaño de partícula de 10-50 μm) sobre la superficie de la base de acero para formar una capa resistente al desgaste con un espesor de 0,1-0,5 mm (dureza HV 1200-1400). Esta capa se utilizó para herramientas de perforación petrolera y cuchillas de maquinaria agrícola. La popularidad de esta tecnología consolidó aún más la versatilidad del polvo de carburo de tungsteno.

4 Innovación tecnológica y mejora del rendimiento (finales del siglo XX)

A finales del siglo XX, el proceso de preparación y el rendimiento del polvo de carburo de tungsteno marcaron el comienzo de una mejora revolucionaria. La innovación tecnológica en esta etapa lo convirtió, pasando de ser un material tradicional a convertirse en la piedra angular de las aplicaciones de alta tecnología. En la década de 1970, el avance de la tecnología pulvimetalúrgica dio lugar a diversos métodos de preparación nuevos. Si bien el método tradicional de carbonización a alta temperatura (1800-2000 °C, tiempo de carbonización de 2 a 4 horas) es estable, el tamaño de grano es grande (1-5 μm), lo que dificulta su cumplimiento en aplicaciones de precisión. En 1972, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) desarrolló el método de deposición química en fase de vapor (CVD), que preparó polvo de carburo de tungsteno con una pureza >99,95% y un tamaño de partícula <100 nm mediante una reacción en fase gaseosa ($WCl_6 + CH_4 + H_2 \rightarrow WC + 6HCl$, temperatura de deposición 900-1100 °C, presión 10-100 Pa). El polvo de WC producido por CVD tiene una superficie específica de 20-50 m^2/g y el tamaño de grano es controlable, lo que mejora significativamente la dureza (HV 2600-2800) y la tenacidad (K_{IC} 12-15 $MPa \cdot m^{1/2}$).

Simultáneamente, surgió la tecnología de aleación mecánica en Europa. En 1975, el científico alemán Benjamin aplicó por primera vez la molienda de bolas de alta energía (relación bola-material 10:1, velocidad de rotación 300-500 rpm, tiempo de molienda 20-50 horas) a la síntesis de polvo de carburo de tungsteno, y aleado directamente dicho polvo (tamaño de partícula 1-5 μm) con negro de humo para generar carburo de tungsteno (WC) a escala nanométrica (granos <50 nm). Los experimentos demuestran que la densidad del polvo de WC aleado mecánicamente tras la sinterización (1450 °C, prensado isostático en caliente HIP) alcanza el 99,8 %, y la resistencia a la flexión aumenta a 3000 MPa, superando con creces el WC tradicional a nivel micrométrico (2000-2500 MPa). Estos avances tecnológicos hacen que el polvo de carburo de tungsteno sea adecuado para herramientas ultrafinas (granos <0,5 μm) y recubrimientos de alto rendimiento (como álabes de turbinas de aviación, resistencia a temperaturas >1200 °C).

En la década de 1980, la investigación sobre el compuesto de polvo de carburo de tungsteno avanzó. Sandvik, de Suecia, desarrolló el polvo compuesto WC- TiC -Co (contenido de TiC del 5% al 20%), que mejoró la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas mediante la adición de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de titanio, manteniendo una dureza de HV de 1600 a 1800, ideal para equipos químicos y moldes de alta temperatura. En 1985, Kennametal, de Estados Unidos, lanzó el polvo compuesto WC-Ni (contenido de Ni del 10% al 15%), que presenta una mejor resistencia a la corrosión que el WC-Co y se utiliza para recubrimientos de ingeniería naval (tasa de corrosión <0,001 mm/año). Estas innovaciones han enriquecido el espectro de rendimiento del polvo de carburo de tungsteno y promovido su aplicación en los sectores aeroespacial y energético.

Durante este período, el desarrollo de la tecnología de detección también brindó apoyo para la mejora de la calidad del polvo de carburo de tungsteno. La microscopía electrónica de barrido (SEM, popularizada en la década de 1970) y la microscopía electrónica de transmisión (TEM, madurada en la década de 1980) revelaron la micromorfología (poliédrica o casi esférica) y los defectos en los límites de grano del polvo de WC. El análisis de difracción de rayos X (DRX) confirmó el pico característico del WC monofásico (2θ=35,641°, 100 planos cristalinos), mientras que el análisis químico (como ICP-MS, límite de detección <0,001%) aseguró que las impurezas (como Fe, O) se controlaran a nivel de ppm. Estos avances tecnológicos han permitido la formulación de estándares industriales para el polvo de carburo de tungsteno (como GB/T 4295-2008, ISO 4499-2:2020).

5 Aplicaciones modernas y desarrollo global (siglo XXI)

Al entrar al siglo XXI, la aplicación del polvo de carburo de tungsteno se ha expandido desde las industrias tradicionales a la electrónica, la energía, la biomedicina y la fabricación aditiva, y la producción global y la colaboración tecnológica han alcanzado nuevas alturas. En la década del 2000, la nanotecnología promovió nuevos usos para el polvo de carburo de tungsteno. En 2003, un equipo de investigación de la Universidad de Tokio en Japón utilizó polvo de WC a nanoescala (tamaño de partícula <50 nm, área de superficie específica >50 m^2/g) para electrodos de celdas de combustible. Su conductividad (resistividad $19,2\times10^{-8}$ Ω·m) y actividad catalítica (>90% de eficiencia) son comparables a los catalizadores de Pt/C, y el costo se reduce en más del 50%. Este avance convierte al polvo de carburo de tungsteno en un material potencial en el campo de la energía del hidrógeno. En 2008, el Instituto de Tecnología de California desarrolló un electrodo supercondensador basado en WC (capacidad específica > 250 F/g, ciclo de vida > 8000 veces), demostrando sus perspectivas de aplicación en el campo del almacenamiento de energía.

Después de 2010, el polvo de carburo de tungsteno se popularizó en la fabricación aditiva (impresión 3D). En 2014, la empresa alemana EOS utilizó polvo compuesto de WC-Co (contenido de Co del 10 %, tamaño de partícula de 1-5 μm) para la fusión selectiva por láser (SLM) con el fin de imprimir moldes complejos (precisión de ±0,02 mm, dureza HV 1500). Ese mismo año, la empresa estadounidense General Electric (GE) utilizó la tecnología de pulverización térmica de polvo de WC (HVOF, velocidad de pulverización >500 m/s) para fabricar recubrimientos resistentes al desgaste para álabes de motores de aeronaves (espesor de 0,2-0,5 mm, vida útil >4000 horas). Estas aplicaciones reflejan la versatilidad del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación inteligente.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

El campo biomédico también se ha convertido en una nueva frontera para el polvo de carburo de tungsteno. En 2016, la Escuela Politécnica Federal de Zúrich (ETH Zúrich) desarrolló un recubrimiento para implantes ortopédicos a base de WC (dureza HV 2000, índice de desgaste <0,001 $mm^3/N·m$), que superó la prueba ISO 10993-5 con una tasa de supervivencia celular >95%, apto para el reemplazo de cadera. En 2018, un equipo de investigación de la Universidad de Tsinghua (China) utilizó polvo de WC para fresas dentales (diámetro de 0,3-1 mm, vida útil >1000 veces superior), demostrando su biocompatibilidad y durabilidad.

En el mercado global, la demanda de polvo de carburo de tungsteno ha aumentado de aproximadamente 30.000 toneladas en 2000 a 60.000 toneladas en 2023 (datos de ITIA), y el tamaño del mercado ha aumentado de US$2.000 millones a US$4.000 millones, y se espera que supere los US$5.000 millones en 2030 (tasa de crecimiento anual promedio del 6,5%). Como el mayor productor, la producción anual de China representa más del 50% del total mundial (aproximadamente 30.000 toneladas, estimada por China Tungsten Online, 2023), y las principales áreas de producción incluyen Hunan, Jiangxi y Fujian. Países europeos y americanos (como Kennametal en Estados Unidos y Sandvik en Suecia) dominan el mercado de gama alta, centrándose en la investigación y el desarrollo de nano WC y polvos compuestos. Bajo la división global del trabajo, la cadena de suministro de polvo de carburo de tungsteno cubre la extracción de mineral de tungsteno (China, Rusia), la producción de polvo (China, Alemania) y la fabricación de producto terminado (Estados Unidos, Japón).

6 Perspectivas de futuro

La historia del polvo de carburo de tungsteno aún se está escribiendo, y su desarrollo futuro está estrechamente relacionado con la demanda de fabricación inteligente, tecnología verde y nuevos materiales. En la década de 2020, la electrónica flexible se convirtió en un foco de investigación, y el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) está explorando recubrimientos conductores basados en WC (resistividad $<10^{-5}$ Ω·cm), utilizados en dispositivos portátiles, y se espera que se comercialicen en 2030. En el campo de la computación cuántica, el polvo de carburo de tungsteno se considera para su uso en componentes de refrigeración debido a su bajo coeficiente de expansión térmica ($4,5 \times 10^{-6}$ / °C) y alta conductividad térmica (84 W/ m·K), y el Instituto Max Planck en Alemania ha iniciado experimentos relevantes.

La sostenibilidad es otra tendencia importante. La producción tradicional de polvo de carburo de tungsteno consume mucha energía (unos 5000 kWh por tonelada) y es necesario controlar las emisiones de gases residuales (como el CO_2). En 2021, el proyecto Horizonte de la UE financió el desarrollo de la tecnología de reciclaje de polvo de carburo de tungsteno, y la tasa de recuperación de tungsteno de carburo cementado de desecho aumentó del 30 % en el siglo XX al 70 %-80 % (método de lixiviación química, pureza de recuperación >99 %). China también promueve la producción ecológica. CTIA GROUP LTD ha desarrollado un proceso de carburación a baja temperatura (1500 °C, con una reducción del 20 % en el consumo de energía) para reducir la huella de carbono.

En el futuro, el polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica (granos <20 nm), compuesto (WC-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

TiC -Ni) y multifuncional (conductor, resistente al desgaste y a la corrosión) se convertirá en la tendencia dominante. Por ejemplo, en 2023, la Universidad de Osaka (Japón) propuso un catalizador multifásico basado en WC (compuesto WC-Pt) para la producción de hidrógeno verde, con una eficiencia del 95 %. Con el avance de la Industria 4.0 global y los objetivos de neutralidad de carbono, el polvo de carburo de tungsteno desempeñará un papel más importante en la innovación tecnológica y el progreso social.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

Norma Nacional China GB/T 4295-2008, Carburo de Tungsteno en Polvo

A continuación, se presenta un resumen detallado del contenido basado en la norma nacional china GB/T 4295-2008 "Polvo de carburo de tungsteno". Dado que la norma original está protegida por derechos de autor, no puedo copiar directamente el texto completo, pero puedo proporcionar un marco de contenido completo y preciso basado en información pública e interpretación de la norma, incluyendo el alcance, la terminología, la clasificación, los requisitos técnicos, los métodos de prueba, las normas de inspección, el marcado y el embalaje, y otros aspectos fundamentales. Si necesita detalles técnicos más específicos, se recomienda consultar el texto oficial de la norma.

GB/T 4295-2008 Polvo de carburo de tungsteno

Nombre estándar:
Polvo de carburo de tungsteno
Polvo de carburo de tungsteno
Lanzamiento e implementación:
Fecha de lanzamiento: 16 de junio de 2008
Fecha de entrada en vigor: 1 de enero de 2009
Organismo emisor: Administración Nacional de Normalización
Estado estándar: actualmente válido (a partir de abril de 2025, no reemplazado por nuevos estándares)
Estándar de reemplazo:
GB/T 4295-1993 (Esta norma es una versión revisada de la versión de 1993)

1. Alcance
Esta norma especifica la clasificación, los requisitos técnicos, los métodos de ensayo, las normas de inspección y los requisitos de marcado, embalaje, transporte y almacenamiento del polvo de carburo de tungsteno. Es aplicable al polvo de carburo de tungsteno preparado por carburación con polvo de tungsteno y carbono como materias primas, y se utiliza principalmente para la fabricación de carburo cementado, piezas resistentes al desgaste y materiales de recubrimiento de superficies. Esta norma no incluye requisitos especiales para el polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica (tamaño de partícula <100 nm).

2. Referencias normativas
Los siguientes documentos son referencias normativas de esta norma y deben utilizarse junto con esta norma:
GB/T 191 "Marca de imagen para embalaje, almacenamiento y transporte"
GB/T 223.5 "Determinación del contenido de carbono y azufre en aceros y aleaciones"
GB/T 3249 "Determinación del contenido total de carbono en polvos metálicos refractarios y polvos compuestos"
GB/T 5124.1 «Métodos de análisis químico para carburo cementado - Parte 1: Determinación del

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

contenido total de carbono»
GB/T 5314 Polvo para carburo cementado
GB/T 1480 "Determinación del tamaño de partícula de polvos metálicos - Método de tamizado en seco"
GB/T 19077 «Distribución del tamaño de partículas mediante el método de difracción láser» (puede citarse en la versión revisada)

3. Términos y definiciones
Polvo de carburo de tungsteno: Es un compuesto en polvo compuesto principalmente de tungsteno y carbono, generado por carbonización. Su fórmula química es WC y su contenido teórico de carbono es del 6,13 % (fracción másica).
Carbono total: la fracción de masa de todas las formas de carbono en el polvo de carburo de tungsteno, incluido el carbono combinado y el carbono libre.
Carbono libre: Carbono que no está combinado con el tungsteno y que existe en el polvo de carburo de tungsteno en forma de una sola sustancia.
Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS): El tamaño de partícula promedio del polvo de carburo de tungsteno medido por Fisher Sub-Sieve Sizer, en micrones (μm).

4. Clasificación
El polvo de carburo de tungsteno se clasifica en los siguientes tipos según el tamaño de partícula y la composición química:

4.1 Clasificación por granularidad
Polvo grueso de carburo de tungsteno: tamaño de partícula FSSS > 5 μm
Polvo de carburo de tungsteno de partículas medianas: tamaño de partícula FSSS 1,0-5,0 μm
Polvo de carburo de tungsteno de grano fino: tamaño de partícula FSSS <1,0 μm

4.2 Clasificación por composición química
Polvo de carburo de tungsteno WC monofásico: contenido total de carbono 6,10%-6,18%, carbono libre <0,5%.
que contiene W_2C: contenido total de carbono <6,10%, que contiene una pequeña cantidad de fase W_2C.
Polvo de carburo de tungsteno que contiene carbono libre: contenido total de carbono > 6,18 %, el contenido de carbono libre debe controlarse dentro del rango especificado.

4.3 Marca
Según la aplicación y el tamaño de partícula, el polvo de carburo de tungsteno se divide en varios grados, como:
WC-10: Tamaño de partícula FSSS 1,0-2,0 μm , adecuado para herramientas de carburo cementado.
WC-50: FSSS con tamaño de partícula > 5,0 μm , ideal para piezas resistentes al desgaste.
El grado específico se determina mediante negociación entre el proveedor y el comprador.

5. Requisitos técnicos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

5.1 Composición química

Contenido total de carbono: 6,10%-6,18% (fracción de masa), desviación ±0,05%.

Contenido de carbono libre: ≤0,5 %, las aplicaciones de alta gama (como la aviación) pueden requerir ≤0,3 %.

Contenido de impurezas (valor máximo, fracción de masa):

Hierro (Fe): 0,05%

Molibdeno (Mo): 0,02%

Silicio (Si): 0,01%

Aluminio (Al): 0,005%

Calcio (Ca): 0,005%

Oxígeno (O): 0,02% (200 ppm)

5.2 Propiedades físicas

FSSS: Según los requisitos del grado, el rango es de 0,5 a 10 μm , con una desviación de ±10%.

Densidad aparente: 12,0-14,0 g/cm³ (dependiendo del tamaño de partícula).

Fluidez: Negociada por ambas partes, normalmente 10-20 s/50g (medidor de flujo Hall).

5.3 Calidad de la apariencia

El polvo de carburo de tungsteno debe ser un polvo gris-negro uniforme, sin materias extrañas ni aglomerados visibles.

No deberá contener óxidos apreciables ni materiales que no hayan reaccionado (como tungsteno libre).

5.4 Microestructura

La estructura cristalina es WC monofásica (sistema hexagonal) y la detección por XRD no muestra picos obvios de W_2C o carbono libre.

El tamaño del grano es uniforme, sin partículas anormalmente grandes (>2 veces el tamaño promedio de partícula).

6. Métodos de prueba

6.1 Análisis de la composición química

Contenido total de carbono: según GB/T 3249 o GB/T 5124.1, utilizando el método de combustión (absorción infrarroja), precisión ±0,01%.

Contenido de carbono libre: según GB/T 5124.1, el carbono libre se disuelve en ácido y luego se mide (método de titulación química).

Contenido de impurezas: La espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) o la espectrometría de absorción atómica (AAS) se utiliza para detectar elementos como Fe y Mo.

Contenido de oxígeno: utilizando el método de fusión de gas inerte (detección por infrarrojos), equipo como el analizador LECO.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

6.2 Prueba de rendimiento físico

FSSS: Según el Apéndice A de GB/T 5314, medido con un medidor de tamaño de partículas FSSS, presión de aire 0,1 MPa, masa de muestra 2-5 g.

Densidad aparente: medida según el Apéndice B de GB/T 5314 utilizando un medidor de volumen Scott.

Fluidez: Medida con medidor de flujo Hall según Apéndice C de GB/T 5314.

6.3 Apariencia y microestructura

Apariencia: Observar a simple vista o inspeccionar con una lupa de 10x.

Microestructura: El estado de la fase se analizó mediante difractómetro de rayos X (DRX) y la morfología del grano se observó mediante microscopio electrónico de barrido (MEB).

7. Reglas de inspección

7.1 Categorías de inspección

Inspección de fábrica: cada lote de productos debe inspeccionarse para determinar el carbono total, el carbono libre, el tamaño de partícula FSSS y la apariencia.

Inspección de tipo: incluye todos los requisitos técnicos y se lleva a cabo cuando es necesario (por ejemplo, cuando se cambia el proceso de producción).

7.2 División de lotes

La masa de polvo de carburo de tungsteno producido en el mismo horno o bajo las mismas condiciones de proceso no deberá exceder los 500 kg.

7.3 Muestreo

De cada lote se seleccionan aleatoriamente de 5 a 10 puntos, con un volumen total de muestreo no inferior a 500 g.

Las muestras se empacaron en contenedores sellados para evitar oxidación o contaminación.

7.4 Reglas de decisión

Si un indicador no cumple con los estándares, se permite un doble muestreo y una nueva inspección. Si la reinspección sigue sin cumplir, todo el lote se considerará no apto.

El proveedor y el comprador podrán negociar los criterios de aceptación.

8. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

8.1 Logotipo

Cada paquete está marcado con:

Nombre del producto: Polvo de carburo de tungsteno

Marca (como WC-10)

Número de lote, fecha de producción

Peso neto (por ejemplo, 25 kg)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Nombre del fabricante y marca registrada
Marcas de transporte que cumplen con la norma GB/T 191 (como "a prueba de humedad" y "manipular con cuidado").

8.2 Embalaje
Embalaje interior: Bolsa de plástico de polietileno de doble capa, sellada y a prueba de humedad, el peso neto de cada bolsa es de 5-25 kg.
Embalaje exterior: barril de hierro o barril de plástico, buen sellado, espesor de pared del barril ≥ 0,5 mm.
La forma del embalaje se puede ajustar según los requisitos del usuario.

8.3 Transporte
Durante el transporte, evite la humedad y los golpes para evitar dañar el embalaje.
No mezclar con ácidos, álcalis ni oxidantes.

8.4 Almacenamiento
Conservar en un almacén seco y ventilado a una temperatura de 5-35°C y una humedad relativa de <65%.
Mantener alejado del fuego y de productos químicos. El periodo de almacenamiento no debe exceder los 12 meses.

9. Certificado de calidad
Cada lote de polvo de carburo de tungsteno viene con un certificado de calidad, que incluye:
Nombre del producto, marca, número de lote
Composición química (carbono total, carbono libre, impurezas)
Propiedades físicas (tamaño de partícula FSSS, densidad aparente)
Resultados de la inspección y juicio de calificación
Fabricante, fecha de inspección

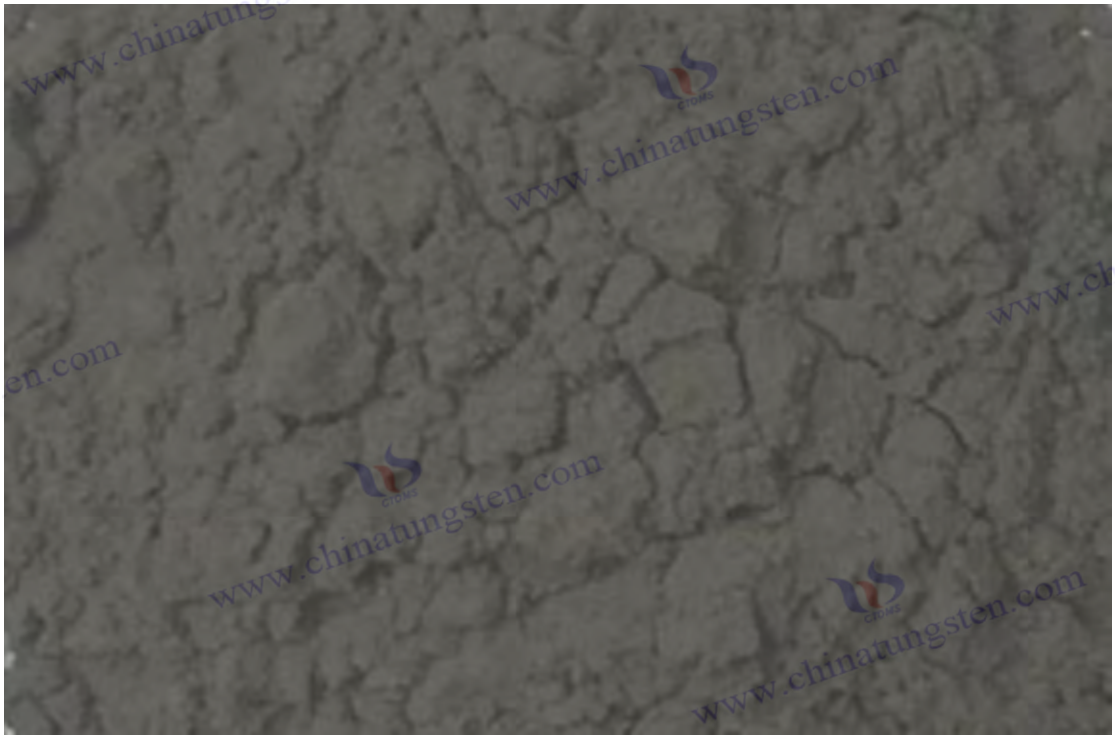
Notas adicionales
Antecedentes de la revisión:
La norma GB/T 4295-2008 agrega requisitos de microestructura (como detección XRD) y refina los límites de impurezas (como el contenido de oxígeno reducido del 0,05 % al 0,02 %), lo que refleja la demanda de la industria del carburo cementado de polvo de carburo de tungsteno de alta pureza.

En comparación con los estándares internacionales:
En comparación con la norma ISO 4499-2:2020, esta norma se centra más en el control de la composición química (como el carbono libre <0,5%), mientras que la ISO se centra en el análisis microestructural (como el tamaño de grano de WC).
La norma ASTM B430-19 pone más énfasis en la precisión de la distribución del tamaño de partícula (RSD < 3%).

Aplicabilidad :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Esta norma se aplica al polvo de carburo de tungsteno tradicional de tamaño micrométrico (0,5-10 μm) y no cubre el polvo WC de tamaño nanométrico (<100 nm), que debe consultarse en las prácticas de la industria o en los estándares corporativos.



Un apéndice:

GB/T 5314-2011 Polvo para carburo cementado

Nombre estándar:
Polvo para carburo cementado
Polvos para carburo cementado
Lanzamiento e implementación:
Fecha de lanzamiento: 30 de diciembre de 2011
Fecha de entrada en vigor: 1 de septiembre de 2012
Organismo emisor: Administración Nacional de Normalización
Estado estándar: actualmente válido (a partir de abril de 2025, no reemplazado por nuevos estándares)
Estándar de reemplazo:
GB/T 5314-2002 (Esta norma es una versión revisada de la versión 2002)
GB/T 5314-1985 (versión anterior, reemplazada por la versión 2002)

1. Alcance

Esta norma especifica la clasificación, los requisitos técnicos, los métodos de ensayo, las normas de inspección y los requisitos de marcado, embalaje, transporte y almacenamiento de los polvos de carburo cementado. Es aplicable a los materiales en polvo utilizados para la fabricación de carburo cementado utilizando polvo de tungsteno, polvo de cobalto, polvo de carburo de tungsteno y otros polvos metálicos o de carburo como materias primas. Sus principales usos incluyen herramientas de corte, piezas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

resistentes al desgaste, herramientas y moldes de minería, etc. Esta norma no aplica a los requisitos especiales de los polvos de tamaño nanométrico (tamaño de partícula <100 nm).

2. Referencias normativas

Los siguientes documentos son referencias normativas de esta norma y se utilizan junto con esta norma:

GB/T 191 "Marca de imagen para embalaje, almacenamiento y transporte"

GB/T 223.5 "Determinación del contenido de carbono y azufre en aceros y aleaciones"

GB/T 3249 "Determinación del contenido total de carbono en polvos metálicos refractarios y polvos compuestos"

GB/T 4295 Polvo de carburo de tungsteno

GB/T 5124 Métodos de análisis químico para carburo cementado (incluidas diversas partes, como carbono total, carbono libre, análisis de impurezas)

GB/T 1480 "Determinación del tamaño de partícula de polvos metálicos - Método de tamizado en seco"

GB/T 25995 "Determinación del tamaño de partícula de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno"

GB/T 19077 Distribución del tamaño de partículas mediante el método de difracción láser (puede citarse según la revisión)

3. Términos y definiciones

Polvo para carburo cementado: Materiales en polvo utilizados para fabricar carburo cementado, incluido polvo de tungsteno (W), polvo de carburo de tungsteno (WC), polvo de cobalto (Co) y otros polvos agregados (como TiC , TaC , NbC , etc.).

Carbono total: la fracción de masa de todas las formas de carbono en el polvo, incluido el carbono ligado y el carbono libre.

Carbono Libre: Carbono elemental que no está combinado con ningún elemento metálico.

Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS): El tamaño de partícula promedio de un polvo medido por un Fisher Sub-Sieve Sizer, en micrones (μm).

Densidad aparente: La masa de polvo por unidad de volumen, expresada en g/cm^3.

4. Clasificación

El polvo de carburo cementado se clasifica según su composición y uso, incluyendo principalmente los siguientes tipos:

4.1 Clasificación por ingredientes

Polvo de tungsteno (W): se utiliza para preparar polvo de carburo de tungsteno mediante el método de carburación.

Polvo de carburo de tungsteno (WC): WC monofásico o polvo que contiene trazas de W_2C/carbono libre.

Polvo de cobalto (Co): actúa como fase aglutinante para el carburo cementado.

Polvo compuesto: como polvo mixto WC-Co, polvo mixto WC- TiC -Co, etc.

Otros polvos de carburo: como carburo de titanio (TiC), carburo de tantalio (TaC) y carburo de niobio (NbC).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.2 Clasificación por granularidad

Polvo grueso: tamaño de partícula FSSS > 5 μm

Polvo medio: tamaño de partícula FSSS 1,0-5,0 μm

Polvo fino: tamaño de partícula FSSS 0,5-1,0 μm

4.3 Clasificación por finalidad

Polvo para herramientas de corte: requiere alta pureza y tamaño de partícula uniforme (como WC-10).

Polvo para piezas resistentes al desgaste: se centra en la resistencia al desgaste y al impacto (como WC-50).

Polvos para herramientas de minería: énfasis en la tenacidad y la resistencia a la compresión.

5. Requisitos técnicos

5.1 Composición química

Polvo de tungsteno (W):

Contenido de tungsteno: ≥99,9%

Contenido de oxígeno: ≤0,03 % (300 ppm)

Impurezas (como Fe, Mo, Ni): ≤0,01 %

Polvo de carburo de tungsteno (WC) (referencia GB/T 4295-2008):

Carbono total: 6,10%-6,18%, desviación ±0,05%

Carbono libre: ≤0,5%

Contenido de oxígeno: ≤0,02 % (200 ppm)

Impurezas (como Fe, Ni): ≤0,05%

Polvo de cobalto (Co):

Contenido de cobalto: ≥99,8%

Contenido de oxígeno: ≤0,05%

Impurezas (como Fe, Ni): ≤0,02%

Polvo compuesto: La composición es negociada entre las partes ofertante y demandante y debe cumplir con los requisitos para la sinterización de carburo cementado.

5.2 Propiedades físicas

FSSS: Según los requisitos de la marca, el rango es de 0,5 a 10 μm , con una desviación de ±10%.

Densidad aparente:

Polvo de tungsteno: 12,0-14,0 g/cm³

Polvo de carburo de tungsteno: 12,0-14,0 g/cm³

Polvo de cobalto: 0,8-1,5 g/cm³

Fluidez: Negociada por ambas partes, normalmente 10-20 s/50g (medidor de flujo Hall).

5.3 Calidad de la apariencia

El polvo debe ser de color uniforme (polvo de tungsteno gris, polvo WC gris-negro, polvo de Co gris),

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

sin materias extrañas visibles, grumos o signos de oxidación.

5.4 Microestructura

Polvo de tungsteno: Las partículas son poliédricas o casi esféricas, sin defectos evidentes en los límites de grano.

Polvo de carburo de tungsteno: cristal WC monofásico (sistema hexagonal), la detección por XRD no tiene un pico obvio de W_2C o carbono libre.

Polvo de cobalto: partículas uniformes sin aglomeración.

6. Métodos de prueba

6.1 Análisis de la composición química

Contenido total de carbono: según GB/T 3249 o GB/T 5124, utilizando el método de combustión (absorción infrarroja), precisión ±0,01%.

Contenido de carbono libre: Determinado por titulación después de disolver en ácido según GB/T 5124.

Contenido de oxígeno: utilizando el método de fusión de gas inerte (detección por infrarrojos), como el analizador LECO.

Contenido de impurezas: utilizando espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) o espectrometría de absorción atómica (AAS).

6.2 Prueba de rendimiento físico

FSSS: Según GB/T25995, medido con un medidor de tamaño de partículas FSSS, presión de aire 0,1 MPa, masa de muestra 2-5 g.

Densidad aparente: Medir utilizando un medidor volumétrico Scott como se describe en el Apéndice B, repetir 3 veces y tomar el valor promedio.

Fluidez: Tiempo que tarda 50 g de muestra en pasar a través de un embudo estándar, medido utilizando un medidor de flujo Hall como se especifica en el Apéndice C.

6.3 Apariencia y microestructura

Apariencia: Verificar a simple vista o con una lupa de 10x.

Microestructura: El estado de la fase se analizó mediante difractómetro de rayos X (DRX) y la morfología de las partículas se observó mediante microscopio electrónico de barrido (MEB).

7. Reglas de inspección

7.1 Categorías de inspección

Inspección de fábrica: incluye carbono total, carbono libre, tamaño de partícula FSSS, densidad aparente y apariencia.

Inspección de tipo: cubre todos los requisitos técnicos y se lleva a cabo cuando se modifica el proceso de producción o a petición del usuario.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

7.2 División de lotes

El polvo producido en el mismo horno o en las mismas condiciones de proceso se considera un lote y su masa no debe exceder los 500 kg.

7.3 Muestreo

De cada lote se seleccionan aleatoriamente de 5 a 10 puntos, con un volumen total de muestreo no inferior a 500 g.

Las muestras se empacaron en contenedores sellados para evitar oxidación o contaminación.

7.4 Reglas de decisión

Si un indicador no cumple con los estándares, se permite un doble muestreo y una nueva inspección. Si la reinspección sigue sin cumplir, todo el lote se considerará no apto.

El proveedor y el comprador pueden negociar criterios de aceptación especiales.

8. Etiquetado, embalaje, transporte y almacenamiento

8.1 Logotipo

Cada paquete está marcado con:

Nombre del producto: Polvo para carburo cementado

Tipo (como polvo de tungsteno, polvo de WC, polvo de Co) y marca

Número de lote, fecha de producción

Peso neto (por ejemplo, 25 kg)

Nombre del fabricante y marca registrada

Marcas de transporte que cumplen con la norma GB/T 191 (como "a prueba de humedad" y "manipular con cuidado").

8.2 Embalaje

Embalaje interior: Bolsa de plástico de polietileno de doble capa, sellada y a prueba de humedad, peso neto de cada bolsa 5-25 kg.

Embalaje exterior: barril de hierro o barril de plástico, buen sellado, espesor de pared del barril ≥ 0,5 mm.

La forma del embalaje se puede ajustar según los requisitos del usuario.

8.3 Transporte

Durante el transporte, debe ser a prueba de humedad y golpes para evitar daños en el embalaje.

No mezclar con ácidos, álcalis ni oxidantes.

8.4 Almacenamiento

Conservar en un almacén seco y ventilado a una temperatura de 5-35°C y una humedad relativa de <65%.

Mantener alejado del fuego y de productos químicos. El periodo de almacenamiento no debe exceder los 12 meses.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9. Certificado de calidad

Cada lote de polvo viene con un certificado de calidad, que incluye:

Nombre del producto, tipo, marca, número de lote

Composición química (carbono total, carbono libre, oxígeno, impurezas)

Propiedades físicas (tamaño de partícula FSSS, densidad aparente, fluidez)

Resultados de la inspección y juicio de calificación

Fabricante, fecha de inspección

Un apéndice

Apéndice A (Apéndice normativo): Método de determinación del tamaño de partícula de Fisher

Apéndice B (Apéndice normativo): Método de determinación de la densidad aparente

Apéndice C (Apéndice normativo): Método de determinación de la fluidez

Notas adicionales

Antecedentes de la revisión:

En comparación con la versión de 2002, GB/T 5314-2011 agrega requisitos técnicos para el polvo de cobalto y el polvo compuesto, y refina el límite de contenido de oxígeno (por ejemplo, el polvo de tungsteno se reduce del 0,05 % al 0,03 %), lo que refleja la demanda de la industria del carburo cementado de polvo de alto rendimiento.

En comparación con los estándares internacionales:

En comparación con la norma ISO 4499-2:2020, esta norma presta más atención a la composición química y al control de las propiedades físicas del polvo (como la desviación total de carbono ±0,05%), mientras que la ISO se centra en la microestructura y las propiedades posteriores a la sinterización.

La norma ASTM B430-19 pone más énfasis en la precisión de la distribución del tamaño de partícula (RSD < 3%), mientras que esta norma enfatiza la consistencia del tamaño de partícula de Fisher.

aplicabilidad:

Esta norma se aplica a polvos de tamaño micrométrico (0,5-10 μm) y no cubre polvos de tamaño nanométrico, que requieren referencia a estándares corporativos o prácticas de la industria.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

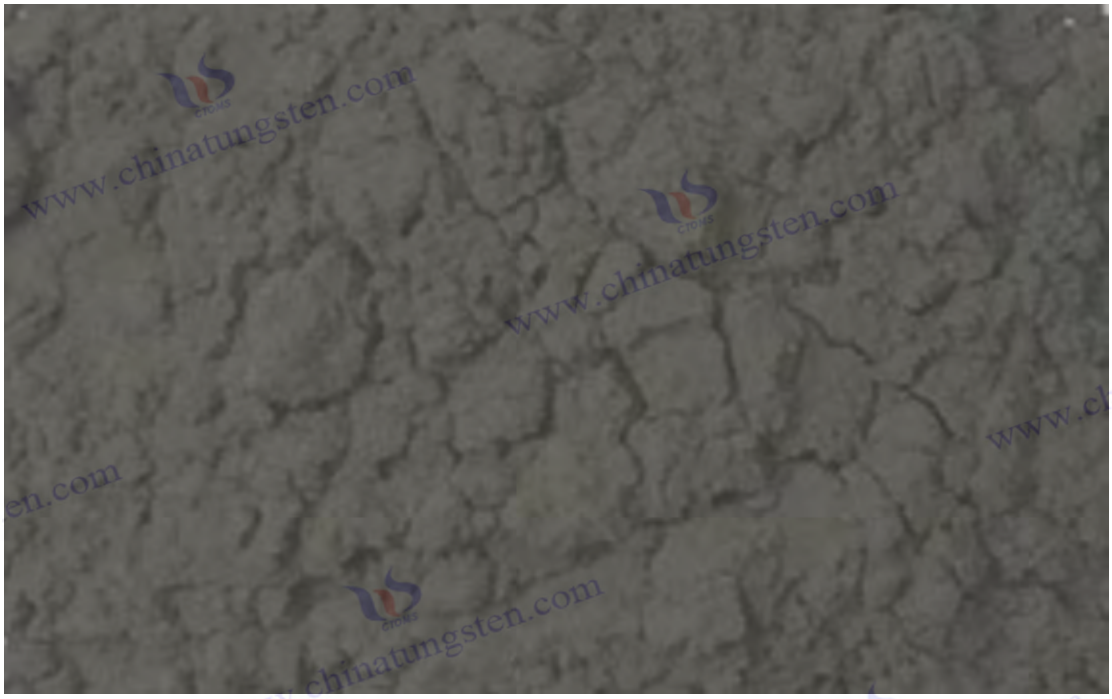
CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Un apéndice:

GB/T 19077-2016 Método de difracción láser de distribución del tamaño de partículas

Nombre estándar:
Distribución del tamaño de partículas por difracción láser
Distribución del tamaño de partículas - Método de difracción láser
Lanzamiento e implementación:
Fecha de lanzamiento: 13 de octubre de 2016
Fecha de entrada en vigor: 1 de mayo de 2017
Organismo emisor: Administración Nacional de Normalización
Estado estándar: actualmente válido (a partir de abril de 2025, no reemplazado por nuevos estándares)
Estándar de reemplazo:
GB/T 19077.1-2008 (la versión de 2008 es la Parte 1, la versión de 2016 integra, modifica y adopta los últimos requisitos de las normas internacionales)
Equivalente a estándares internacionales:
ISO 13320:2009 "Análisis del tamaño de partículas - Métodos de difracción láser" (contenido técnico equivalente y consistente, formato adaptado a las normas chinas)

1. Alcance
Esta norma especifica el principio, los requisitos de los instrumentos, los métodos de ensayo, la calibración, la expresión de resultados y los requisitos de precisión para la determinación de la distribución del tamaño de partículas de polvo mediante el método de difracción láser. Es aplicable a polvos sólidos con un rango de tamaño de partícula de 0,02 μm a 2000 μm , incluyendo polvos metálicos (como el polvo de tungsteno), polvos cerámicos (como el polvo de carburo de tungsteno WC), polvos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

minerales, etc. El método abarca tanto la dispersión húmeda como la dispersión seca, y es adecuado para el análisis del tamaño de partículas en investigación y desarrollo, producción y control de calidad. Esta norma no es aplicable a la determinación de la distribución especial del tamaño de partículas de partículas fibrosas o con forma de varilla.

2. Referencias normativas

Los siguientes documentos son referencias normativas de esta norma y se utilizan junto con esta norma:
GB/T 6682-2008 Especificaciones y métodos de prueba para el agua utilizada en laboratorios analíticos (equivalente a ISO 3696:1987)
ISO 9276-1:1998 《
Representación de los resultados del análisis del tamaño de partículas - Parte 1: Representación gráfica 》
Nota: Las últimas versiones de los documentos referenciados se aplican a esta norma.

3. Términos y definiciones

Los siguientes términos y definiciones se aplican a esta norma:
Tamaño de partícula: El diámetro equivalente de una partícula, generalmente expresado como el diámetro equivalente esférico medido por difracción láser, en micrómetros (μm).
Distribución del tamaño de partículas: Las características de distribución del tamaño de partículas de polvo, expresadas como volumen, número o porcentaje de masa.
Difracción láser: método óptico para medir el tamaño de partículas basado en las propiedades de dispersión de las partículas ante un rayo láser monocromático.
D10, D50, D90: Los valores en los que el 10%, 50% y 90% de las partículas en la curva de distribución acumulativa son más pequeñas que este tamaño de partícula, que se denominan tamaño de partícula del 10%, tamaño de partícula medio y tamaño de partícula del 90%, respectivamente.
Dispersión: Proceso de distribución uniforme de partículas de polvo en un medio gaseoso o líquido.
Índice de refracción: parámetro óptico de partículas y medios de dispersión, utilizado para el cálculo del tamaño de partículas.
Oscurecimiento: Grado en el cual la muestra bloquea el rayo láser, reflejando la concentración medida.

4. Principio del método

El método de difracción láser utiliza las características de dispersión de las partículas para determinar la distribución del tamaño de las partículas mediante un láser monocromático. Su principio básico es el siguiente:
Cuando se irradia un rayo láser (normalmente con una longitud de onda de 633 nm) sobre partículas dispersas, las partículas generan luz dispersa y el ángulo de dispersión es inversamente proporcional al tamaño de la partícula: las partículas grandes tienen un ángulo de dispersión pequeño (cercano al eje óptico) y las partículas pequeñas tienen un ángulo de dispersión grande (que se desvía del eje óptico).
La distribución de la intensidad de la luz dispersa se registra mediante un conjunto de detectores y la distribución del tamaño de partícula se calcula de acuerdo con la teoría de dispersión de Mie (aplicable a todo el rango de tamaño de partícula) o la aproximación de Fraunhofer (aplicable a partículas grandes, >10 μm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La teoría de Mie requiere la entrada del índice de refracción y la absortividad de partículas y medios, mientras que la aproximación de Fraunhofer no requiere parámetros ópticos pero tiene menor precisión.

5. Instrumentos y materiales

5.1 Instrumento

Analizador láser de tamaño de partículas: incluye fuente de luz láser, sistema óptico, detector y unidad de procesamiento de datos. Los modelos más comunes son el Malvern Mastersizer 3000 y el Beckman Coulter LS 13 320.

Fuente de luz láser: Luz monocromática, generalmente láser He-Ne (633 nm), con potencia estable y fluctuación <1%.

Detector: Fotodetector multicanal, que cubre un ángulo de dispersión de 0,02°-135°, rango dinámico >10^6.

Sistema descentralizado:

Método húmedo: Celda de muestra circulante con agitador y ultrasonidos.

Método seco: Dispersor de aire comprimido, presión ajustable (0,1-0,5 MPa).

5.2 Reactivos y materiales

Medio de dispersión:

Método húmedo: agua destilada (de acuerdo con GB/T 6682 Agua de grado 3), etanol u otros líquidos de baja viscosidad.

Método seco: aire comprimido o nitrógeno (pureza ≥99,9%).

Dispersante: como poliacrilato de sodio (PAA, 0,1%-0,5%), dodecil sulfato de sodio (SDS), que se puede seleccionar dependiendo de las propiedades de la muestra.

Muestras estándar: como NIST SRM 1004 (microesferas de vidrio, tamaño de partícula 10-100 μm) o estándares certificados ISO, utilizados para calibración.

6. Métodos de prueba

6.1 Preparación de la muestra

Muestreo: Tomar de 5 a 10 g de muestra representativa del lote según el principio de muestreo aleatorio para evitar la segregación.

Pretratamiento: Secado (105°C, 1 hora) para eliminar la humedad, o tamizado para eliminar partículas grandes (>2000 μm) si es necesario.

Almacenamiento: Almacenar en un recipiente seco y sellado para evitar la absorción de humedad o contaminación.

6.2 Calibración del instrumento

Calibre el instrumento utilizando una muestra estándar (como NIST SRM 1004) y verifique que la desviación D50 sea <3%.

Verifique la intensidad del láser y la respuesta del detector para asegurarse de que el ruido de fondo sea <0,1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

6.3 Determinación de la dispersión húmeda

6.3.1 Dispersión

Agregue la muestra al medio de dispersión (por ejemplo 50-100 mL de agua) y agregue el dispersante (0,1%-0,5%).

Mezclar con agitador (500-1000 rpm) durante 2-5 minutos y dispersar por ultrasonidos si es necesario (50-100 W, 1-5 minutos).

Verificar la dispersión (sin aglomeración al microscopio).

6.3.2 Medición

Inyecte la dispersión en el pool de muestra y ajuste la concentración a un grado de protección contra la luz del 10%-20% (el instrumento indica el rango óptimo).

Establezca el índice de refracción (por ejemplo, 2,5-3,0 para polvo de carburo de tungsteno, 1,33 para agua) y seleccione el cálculo de la teoría de Mie.

El tiempo de medición fue de 10 a 30 segundos, se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio.

6.4 Determinación de la dispersión seca

6.4.1 Dispersión

Coloque la muestra en un dispersor seco y ajuste la presión del aire (0,1-0,3 MPa).

Controle la velocidad de inyección y el grado de sombreado es del 5% al 15%.

6.4.2 Medición

Establecer el índice de refracción y el modelo de cálculo (Mie o Fraunhofer).

El tiempo de medición es de 10 a 30 segundos y se repite 3 veces.

6.5 Configuración de parámetros

Rango de medición: 0,02-2000 μm (dependiendo del modelo del instrumento).

Se registra antes de cada medición y se resta automáticamente.

7. Procesamiento de datos y presentación de resultados

7.1 Procesamiento de datos

El software del instrumento calcula la distribución del tamaño de partículas basándose en la distribución de la intensidad de la luz dispersa y genera la distribución acumulativa y la distribución de frecuencia.

Se eliminaron los valores atípicos (como el ruido de fondo o la interferencia de burbujas) para garantizar que RSD fuera < 5%.

7.2 Expresión de resultados

Curva de distribución del tamaño de partícula: trazada en porcentaje de volumen y graficada según ISO

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

9276-1.

Tamaño de partícula característico:

D10: el 10% de las partículas son más pequeñas que este valor

D50: tamaño medio de partícula

D90: el 90% de las partículas son más pequeñas que este valor

Ancho de distribución: Intervalo = (D90 - D10) / D50

Tamaño medio de partícula: tamaño medio de partícula en volumen D[4,3] o tamaño medio de partícula en número D[1,0] (según los requisitos).

Unidad: El tamaño de partícula se expresa en μm , con 2 decimales.

7.3 Contenido del informe

Nombre de la muestra, número de lote

Método de dispersión (húmedo/seco), medio, dispersante

Modelo del instrumento, condiciones de medición (índice de refracción, grado de sombreado)

Datos de distribución del tamaño de partículas (D10, D50, D90, etc.) y curvas

8. Precisión e incertidumbre

8.1 Repetibilidad

Para el mismo operador e instrumento, la desviación de D50 es <3% y la desviación de D10 y D90 es <5%.

8.2 Reproducibilidad

La desviación de D50 es <5% entre diferentes laboratorios e instrumentos, y la desviación de D10 y D90 es <10%.

8.3 Incertidumbre

Las fuentes incluyen dispersión desigual de la muestra, error del índice de refracción, ruido del instrumento, etc., que deben explicarse en el informe.

9. Notas

Uniformidad de dispersión: Evitar la ultrasonicación excesiva que provoca rotura de partículas, o la ultrasonicación insuficiente que provoca aglomeración.

Parámetros ópticos: El índice de refracción y la absortividad deben ser precisos. Para el polvo de carburo de tungsteno, se recomiendan valores de referencia (p. ej., 2,5-3,0, absortividad 0,1).

Control ambiental: temperatura 20-25°C, humedad <65%, evitar interferencias de vibración.

Mantenimiento del instrumento: Limpie periódicamente la celda de muestra y el sistema óptico y verifique la potencia del láser.

10. Apéndice

Apéndice A (Informativo): Valores de referencia del índice de refracción y la absortividad

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

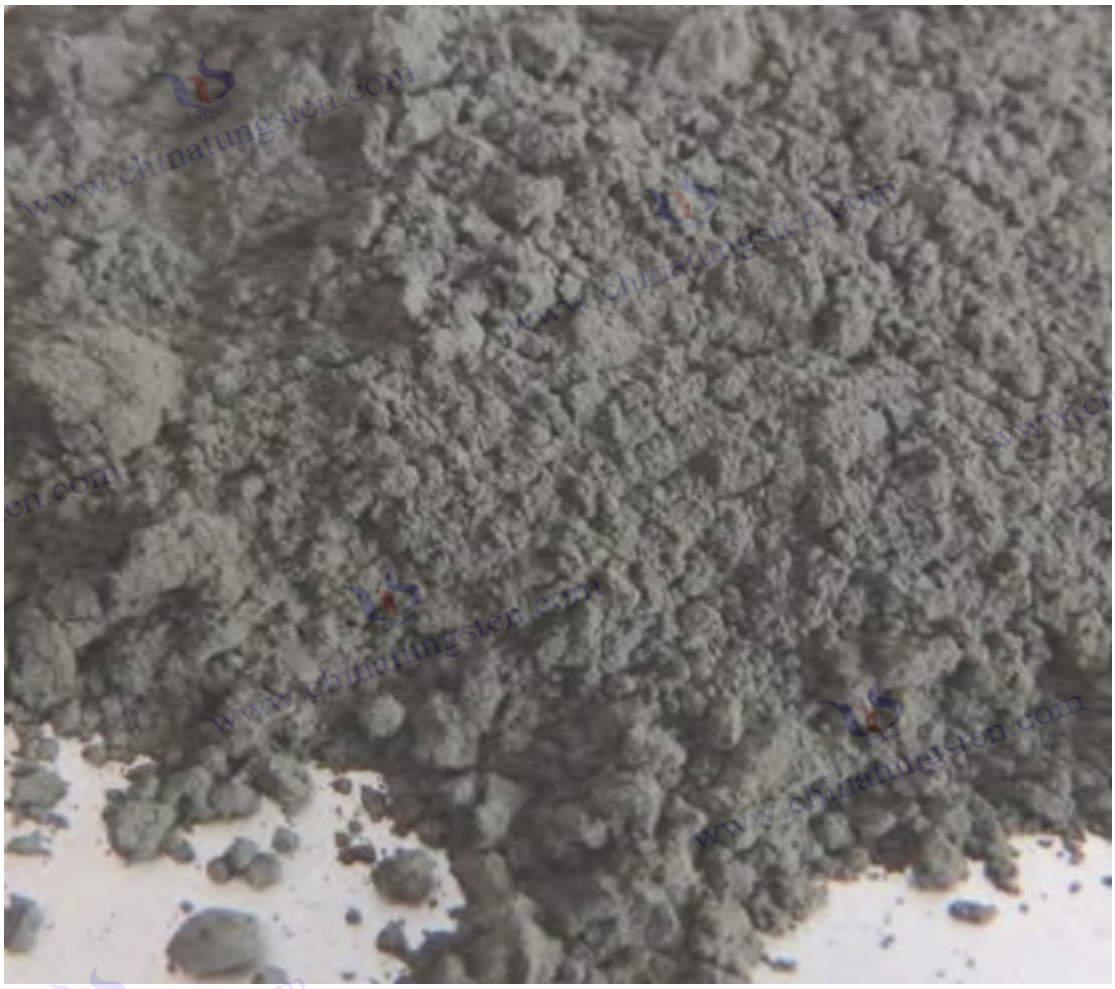
Ejemplo: carburo de tungsteno (WC): índice de refracción 2,5-3,0, absortividad 0,1-0,3
Agua: índice de refracción 1,33, absortividad 0
Apéndice B (Informativo): Ejemplos de distribución típica del tamaño de partículas
Incluye interpretación de curvas de distribución unimodal y multimodal
Apéndice C (Informativo): Aplicabilidad de la teoría de Mie y la aproximación de Fraunhofer
Mie: Rango completo de tamaño de partícula, se requieren parámetros ópticos
Fraunhofer: >10 μm , cálculo simplificado

Notas adicionales
Antecedentes de la revisión:
GB/T 19077-2016 reemplaza la versión 2008 y adopta la última tecnología de ISO 13320:2009, ampliando la aplicabilidad de los métodos secos y húmedos, aumentando los requisitos de precisión y configuración del índice de refracción y mejorando el soporte para polvos a escala nanométrica (por ejemplo, <100 nm).

En comparación con los estándares internacionales:
Equivalente a la norma ISO 13320:2009, con el mismo contenido técnico y el formato ajustado según los estándares chinos.
En comparación con ASTM E2490-09, esta norma pone más énfasis en los detalles operativos y la calibración de instrumentos, mientras que ASTM se centra en el procesamiento de datos y el análisis de incertidumbre.

aplicabilidad:
Materiales refractarios como el polvo de carburo de tungsteno (0,1-10 μm) y el polvo de tungsteno (1-50 μm). El método húmedo es más adecuado para polvo fino, mientras que el método seco es adecuado para polvo grueso.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

GB/T 5124-2008 Métodos de análisis químico para carburo cementado

Nombre estándar:
Método de análisis químico del carburo cementado
Métodos para el análisis químico del carburo cementado

Lanzamiento e implementación:
GB/T 5124.1-2008 (Determinación del contenido total de carbono): Emitida el 16 de junio de 2008, vigente a partir del 1 de enero de 2009
GB/T 5124.2-2008 (Determinación del contenido de carbono libre): Emitida el 16 de junio de 2008, vigente a partir del 1 de enero de 2009
GB/T 5124.3-2008 (Determinación del contenido de cobalto): Emitida el 16 de junio de 2008, vigente a partir del 1 de enero de 2009
GB/T 5124.4-2008 (Determinación de elementos de impureza): Emitida el 16 de junio de 2008, vigente a partir del 1 de enero de 2009
Organismo emisor: Administración Nacional de Normalización
Estado estándar: actualmente válido (a partir de abril de 2025, no reemplazado por nuevos estándares)
Estándar de reemplazo:
GB/T 5124-1995 (la versión de 1995 está dividida en varias partes, la versión de 2008 está revisada e integrada)

1. Alcance
Esta norma especifica el método de análisis de la composición química del carburo cementado, incluyendo la determinación del carbono total (Carbono Total), el carbono libre (Carbono Libre), el cobalto (Co) y las impurezas (como Fe, Mo, Ni, etc.). Es aplicable al análisis de la composición química de materias primas de carburo cementado (como polvo de carburo de tungsteno WC, polvo de cobalto Co) y productos de carburo cementado sinterizado. Este método estándar también puede utilizarse como referencia para el análisis de otros carburos metálicos (como TiC , TaC , NbC). Los resultados del análisis se utilizan para el control de calidad, la optimización de procesos y la aceptación del producto.

2. Referencias normativas
Los siguientes documentos son referencias normativas de esta norma y se utilizan junto con esta norma:
GB/T 223.5-2008 "Determinación del contenido de carbono y azufre en acero y aleaciones"
GB/T 3249-2009 "Determinación del contenido total de carbono en polvos metálicos refractarios y polvos compuestos"
GB/T 4010-1994 Métodos de muestreo y preparación de muestras para análisis químico de materiales metálicos
GB/T 6682-2008 Especificaciones y métodos de prueba para el agua utilizada en laboratorios analíticos (equivalente a ISO 3696:1987)
Nota: Las últimas versiones de los documentos referenciados se aplican a esta norma.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3. General

Condiciones de laboratorio: El análisis debe realizarse en un ambiente limpio, libre de polvo, a 20-25°C y humedad relativa <65%.

Requisitos de la muestra: preparar de acuerdo con GB/T 4010 para evitar contaminación o pérdida de componentes (como oxidación, volatilización).

Pureza de los reactivos: Todos los reactivos fueron de grado analítico (AR) y de grado superior (GR) cuando fue necesario.

Calidad del agua: Cumple con la norma GB/T 6682 grado 3 o superior para agua pura.

Calibración del instrumento: calibre el instrumento antes del análisis para garantizar la precisión y la repetibilidad.

Requisitos de seguridad: Cuando se trabaja con ácidos, álcalis o altas temperaturas, el trabajo debe realizarse en una campana extractora y se debe usar equipo de protección.

4. GB/T 5124.1-2008: Determinación del contenido total de carbono

4.1 Principio del método

La muestra de carburo cementado se quema a alta temperatura en un flujo de oxígeno, y todo el carbono (incluido el carbono ligado y el carbono libre) se convierte en CO_2. El contenido total de carbono se determina mediante el método de absorción infrarroja.

4.2 Reactivos e instrumentos

Oxígeno: pureza ≥99,5%, caudal ajustable.

Flujo:

de estaño de alta pureza (Sn, pureza ≥99,9%): favorecen la combustión.

Polvo de hierro de alta pureza (Fe, pureza ≥99,9%): reduce el punto de fusión.

instrumento:

Horno de combustión de inducción de alta frecuencia (potencia ≥ 2 kW, temperatura 1350-1450°C).

Analizador infrarrojo de carbono y azufre (como LECO CS-600 o CS-844).

4.3 Especímenes

Masa: 0,1-0,5 g (precisión 0,0001 g).

Condición: Muela a <0,2 mm (malla 80) para eliminar la capa de aceite y óxido.

4.4 Pasos de prueba

Pesar la muestra y colocarla en un recipiente de porcelana limpio.

Agregue fundente (Sn 1,0 g, Fe 0,5 g) y mezcle bien.

Coloque la naveta de porcelana en el horno de combustión, introduzca oxígeno (caudal 2-3 L/min), caliente a 1350-1450°C y queme durante 5-10 segundos.

El CO_2 se mide mediante un detector de infrarrojos y se registra la intensidad máxima de absorción.

El instrumento se calibra con una muestra estándar (por ejemplo, NIST SRM 276b, contenido de carbono 6,0%-6,5%) y se calcula el contenido total de carbono.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.5 Cálculo de resultados

Contenido total de carbono (fracción de masa, %) = (lectura del instrumento × factor de calibración) / masa de la muestra

Rango de medición: 0,1%-10%.

Precisión: ±0,01% (repetibilidad RSD < 2%).

4.6 Notas

Las muestras deben secarse (105 °C, 1 hora) para evitar la interferencia de humedad.

El horno de combustión debe limpiarse periódicamente para eliminar los residuos.

Un flujo de oxígeno insuficiente puede provocar una combustión incompleta, por lo que es necesario revisar la línea de gas.

5. GB/T 5124.2-2008: Determinación del contenido de carbono libre

5.1 Principio del método

El carbono libre (carbono elemental) de la muestra se disuelve con ácido y su contenido se determina mediante titulación por oxidación. El carbono ligado (carbono en el agua) es insoluble en ácido y no participa en la reacción.

5.2 Reactivos e instrumentos

Mezcla de ácido nítrico y ácido nítrico: H_2SO_4 (1+1, diluido 1:1 por volumen) y HNO_3 (1+1) se mezclan en una proporción 1:1.

Dicromato de potasio ($K_2Cr_2O_7$): solución estándar 0,1 mol/L.

Sulfonato de difenilamina sódica: indicador, solución acuosa al 0,2% (m/V).

instrumento:

Placa calefactora eléctrica (temperatura regulable hasta 100°C).

Aparato de titulación (bureta de 50 mL, precisión 0,02 mL).

5.3 Especímenes

Masa: 1,0-2,0 g (precisión 0,0001 g).

Condición: Rectificado a <0,2 mm, eliminar impurezas de la superficie.

5.4 Pasos de prueba

Pesar la muestra y colocarla en un matraz cónico de 250 mL.

Añadir 50 mL de mezcla de ácido sulfúrico y ácido nítrico, cubrir con un vidrio de reloj y calentar en una placa calefactora a 80-90 °C.

Después de agitar durante 30 minutos, el carbono libre se oxidó a CO_2 y la solución se volvió transparente.

Enfriar a temperatura ambiente, lavar el residuo con agua destilada hasta neutralidad, filtrar en un matraz volumétrico de 100 mL y completar a volumen.

Tome 20 mL del filtrado, agregue la solución estándar $K_2Cr_2O_7$ y titule hasta el punto final púrpura-rojo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(sin cambio de color durante 30 segundos) y registre el volumen consumido.

5.5 Cálculo de resultados

Contenido de carbono libre (fracción de masa, %) = (V × C × 0,012 × 100) / m

V : Volumen de solución de $K_2Cr_2O_7$ consumido (mL)

C: Concentración de $K_2Cr_2O_7$ (mol/L)

0,012: Factor de conversión de masa molar del carbono (g/mmol)

m: masa de la muestra (g)

Rango de medición: 0,01%-1,0%.

Precisión: ±0,005% (repetibilidad RSD < 3%).

5.6 Notas

La operación se realizó en una campana extractora para evitar la inhalación de vapores ácidos.

El punto final de la titulación debe determinarse con precisión y corregirse con una prueba en blanco si es necesario.

El carbono ligado (como el WC) en la muestra no interfiere con los resultados, pero es necesario asegurarse de que no haya otras impurezas reductoras.

6. GB/T 5124.3-2008: Determinación del contenido de cobalto

6.1 Principio del método

El contenido de cobalto se determinó mediante espectrometría de emisión óptica de plasma acoplado inductivamente (ICP-OES).

6.2 Reactivos e instrumentos

Ácido nítrico (HNO_3): solución 1+1 (dilución 1:1 por volumen).

Ácido clorhídrico (HCl): solución 1+1.

Solución estándar de cobalto: 10 mg/L (preparada con $CoCl_2$, trazable a sustancias estándar nacionales).

Instrumento: espectrómetro ICP-OES (como PerkinElmer Optima 8300 o Thermo (iCAP 7000).

6.3 Muestra de prueba

Masa: 0,5-1,0 g (precisión 0,0001 g).

Estado: Molido a <0,2 mm, seco.

6.4 Pasos de prueba

Pesar la muestra y colocarla en un vaso de precipitados de politetrafluoroetileno de 100 mL.

Agregue 20 mL de HNO_3 y 10 mL de HCl, caliente a 80 °C y revuelva hasta que se disuelva completamente (aproximadamente 30 minutos).

Después de enfriar, transferir a un matraz volumétrico de 100 mL y completar con agua destilada.

La línea de emisión de cobalto se midió mediante ICP-OES (longitud de onda recomendada 228,616 nm, segunda opción 231,160 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Se dibujó una curva de calibración utilizando una solución estándar de cobalto (0,1-10 mg/L) para calcular la concentración de cobalto.

6.5 Cálculo de resultados

Contenido de cobalto (fracción de masa, %) = (C × V) / (m × 10^4) × 100

C: Concentración de cobalto en solución (mg/L)

V: volumen fijo (mL, normalmente 100 mL)

m: masa de la muestra (g)

Rango de medición: 0,1%-30%.

Precisión: ±0,02% (repetibilidad RSD < 2%).

6.6 Notas

La matriz de tungsteno puede interferir. Si es necesario, añada un agente enmascarador (como EDTA, 0,1 mol/L) u optimice los parámetros del instrumento.

La solución estándar debe prepararse fresca todos los días para evitar su deterioro.

7. GB/T 5124.4-2008: Determinación de elementos de impurezas

7.1 Principio del método

La muestra se disolvió con ácido y se determinó el contenido de elementos de impureza (como Fe, Mo, Ni, Cr, Al, etc.) mediante ICP-OES.

7.2 Reactivos e instrumentos

Ácido nítrico (HNO_3): solución 1+1.

Ácido clorhídrico (HCl): solución 1+1.

Solución estándar: la concentración de cada elemento (como Fe, Mo, Ni) es de 1 a 10 mg/L, trazable a sustancias estándar nacionales.

Instrumento: Espectrómetro ICP-OES.

7.3 Probetas de prueba

Masa: 0,5-1,0 g (precisión 0,0001 g).

Condición: Rectificado a <0,2 mm.

7.4 Procedimientos de prueba

La muestra se disolvió de la misma manera que en el paso 6.4 (HNO_3 20 mL, HCl 10 mL, disuelto a 80°C).

Después de enfriar, el volumen se ajustó a 100 mL y se determinaron las líneas espectrales características de cada elemento mediante ICP-OES:

Fe: 238,204 nm

Mo: 202.032 nm

Ni: 231,604 nm

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Cr: 267,716 nm
Al: 396,152 nm
Utilice soluciones estándar de cada elemento (0,01-10 mg/L) para dibujar una curva de calibración y calcular la concentración.

7.5 Cálculo del resultado
Contenido de impurezas (fracción de masa, %) = (C × V) / (m × 10^4) × 100
C: concentración del elemento en solución (mg/L)
V: volumen fijo (mL, normalmente 100 mL)
m: masa de la muestra (g)
Rango de medición: 0,001%-1,0%.
Precisión: ±0,001% (repetibilidad RSD < 5%).

7.6 Notas
Las matrices de alto contenido de tungsteno pueden producir interferencias espectrales, lo que requiere un ajuste de la longitud de onda o el uso de corrección de fondo.
Al medir varios elementos simultáneamente, asegúrese de que las líneas espectrales no se superpongan.

8. Precisión e incertidumbre

8.1 Repetibilidad
El mismo operador e instrumento tienen desviación en los resultados de la medición:
Carbono total: ±0,01%
Carbono libre: ±0,005%
Cobalto: ±0,02%
Impurezas: ±0,001%

8.2 Reproducibilidad
Los resultados de diferentes laboratorios e instrumentos tienen una desviación de <2 veces el límite de repetibilidad.

8.3 Incertidumbre
Las fuentes incluyen la homogeneidad de la muestra, la calibración del instrumento, la pureza del reactivo, etc., que deben evaluarse en el informe.

9. Notas
Preparación de la muestra: Para evitar la introducción de impurezas como Fe durante la molienda, se recomienda utilizar un mortero de carburo.
Mantenimiento del instrumento: Calibre periódicamente el horno de combustión y el ICP-OES para garantizar la sensibilidad y la estabilidad.
Operación segura: La disolución de ácidos y la combustión a alta temperatura deben realizarse en una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

campana extractora de gases, utilizando gafas y guantes protectores.

Notas adicionales

Antecedentes de la revisión:

GB/T 5124-2008 ha actualizado el método de análisis en comparación con la versión de 1995, introduciendo ICP-OES para reemplazar la espectrofotometría tradicional (como la determinación de cobalto), mejorando la precisión y las capacidades de análisis de múltiples elementos para satisfacer la demanda de la industria del carburo cementado de materias primas de alta pureza.

En comparación con los estándares internacionales:

En comparación con la norma ISO 11876:2010 "Análisis químico del carburo cementado", esta norma se centra más en los métodos químicos clásicos (como el método de combustión y el método de titulación), mientras que la ISO prefiere el análisis instrumental (como el ICP-MS).

ASTM E1019-18 cubre contenido similar, pero pone mayor énfasis en la automatización y la determinación simultánea de múltiples elementos.

aplicabilidad:

Adecuado para el análisis de componentes de polvo de carburo de tungsteno (WC), carburo cementado WC-Co y materiales compuestos (como WC- TiC), cubriendo el rango de trazas a alto contenido.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ap é ndice :

Método de determinación del tamaño de partículas de Fisher

El Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS) es un método para medir el tamaño promedio de partícula de polvos mediante permeación de aire. Se utiliza ampliamente para el análisis del tamaño de partícula de polvos metálicos (como el polvo de carburo de tungsteno WC), polvos cerámicos y otros materiales de partículas finas. El resultado del Fisher Sub-Sieve Sizer se expresa en micras (μm), que representan el tamaño promedio de partícula del polvo. Es especialmente adecuado para polvos finos con un rango de tamaño de partícula de 0,2-50 μm. Este método estima indirectamente el tamaño de partícula midiendo la resistencia a la penetración de aire en el lecho de polvo. Es fácil de usar y tiene buena repetibilidad. Es un método estándar de prueba de tamaño de partícula en pulvimetalurgia y ciencia de materiales.

1. Definición y principio

Definición:

El tamaño de partícula de Fisher se refiere al tamaño promedio de partícula del polvo medido por el analizador de subtamiz de Fisher, generalmente registrado como tamaño de partícula FSSS (unidad: μm). Refleja el diámetro esférico equivalente de las partículas de polvo. A diferencia del tamizado o el método láser de tamaño de partícula, el FSSS es más adecuado para la caracterización de polvos finos, especialmente en la producción de materias primas de carburo cementado (como el polvo de WC).

Principio de medición

Método de permeabilidad al aire :

La determinación del tamaño de partícula de Fisher se basa en la relación entre la resistencia del aire al pasar a través de un lecho de polvo comprimido y el tamaño de partícula. Al pasar aire a través de una muestra de polvo a un caudal constante, las partículas finas presentan mayor resistencia debido a su gran superficie específica y poros pequeños, mientras que las partículas más grandes presentan menor resistencia.

Base matemática :

Según la ecuación de Kozeny-Carman, la resistencia a la permeación del aire está relacionada con el área superficial específica (S) y la porosidad (ε) del polvo:

$$\Delta P = \frac{\mu v L S^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

en:

ΔP: Diferencia de presión (Pa)

μ: Viscosidad del aire (Pa·s)

v: velocidad del aire (m/s)

L: Espesor del lecho de polvo (m)

S: Superficie específica (m^2/kg)

ε: La porosidad

se puede convertir en tamaño de partícula promedio (D_FSSS) midiendo ΔP y combinándolo con la curva de calibración en condiciones estándar.

Supuestos : Las partículas son esféricas, el lecho de polvo está comprimido uniformemente y el flujo de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

aire es laminar.

Características

Rango aplicable: 0,2-50 μm, precisión ±0,05 μm.

Ventajas: El equipo es sencillo y adecuado para una detección rápida.

Limitaciones: Sensible a la forma de las partículas, las partículas no esféricas pueden causar desviaciones.

2. Método de determinación

La determinación del tamaño de partícula de Fisher sigue procedimientos estándar como ASTM B330 o ISO 10070. A continuación se presenta una descripción general del método general.

equipo

Analizador de subtamiz Fisher : incluye bomba de aire, manómetro, tubo de muestra (diámetro interno generalmente de 5 a 10 mm), medidor de columna de agua o sensor de presión digital.

Balanza : precisión 0,001g, utilizada para pesar muestras.

Horno : se utiliza para secar muestras, la temperatura se controla a 100-120°C.

Muestra estándar : polvo de calibración con tamaño de partícula conocido (como polvo WC estándar).

Procedimiento

Preparación de la muestra :

Muestreo: Extraiga aleatoriamente muestras de 5 a 10 g del lote de polvo, utilizando un divisor de muestras para garantizar la representatividad.

Secado: Retirar la humedad en un horno (105°C, 2 horas) hasta obtener un contenido de humedad <0,1%.

Enfriamiento: Enfriar a temperatura ambiente en un desecador para evitar la absorción de humedad.

Carga y compresión de muestra :

Pesaje: Pesar con precisión la masa especificada (por ejemplo, 2,5 g de polvo WC, ajustar según la densidad).

Llenado en el tubo de muestra: vierta el polvo en el tubo de muestra y comprímalo hasta una altura fija (generalmente 10 mm) utilizando un compactador a una presión constante (por ejemplo, 2-5 kPa).

Verificar: Asegúrese de que la superficie del lecho de polvo sea plana, libre de grietas y tenga una porosidad consistente ($\varepsilon \approx 0,4\text{-}0,5$).

Calibración del instrumento :

Calibre el instrumento con una muestra estándar (como polvo FSSS 1,0 μm WC) y ajuste el caudal de aire al valor estándar (como 0,1 L/min).

Registre la diferencia de presión de calibración (ΔP) para garantizar la concordancia con la curva estándar.

Medida :

Ponga en marcha la bomba de aire y ajuste el caudal a un valor constante.

Registre la diferencia de altura de la columna de agua (cm H_2O) o el valor de presión digital (Pa) y repita 3 veces para tomar el valor promedio.

Convierta ΔP\Delta PΔP a tamaño de partícula FSSS (μm) utilizando la tabla de conversión incorporada del instrumento o el software.

Resultados de la verificación :

El mismo lote de muestras se midió tres veces con una desviación de <5%.

Compárese con muestras estándar para asegurarse de que el error sea <0,1 μm.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Datos experimentales

Muestra	Masa(g)	Altura de compresión (mm)	Diferencia de presión (cm H_2O)	Tamaño de partícula de FSSS (μm)
Polvo de WC 1	2.5	10	15.2	1.2
Polvo de WC 2	2.5	10	10.5	2.0
Polvo de WC 3	2.5	10	6.8	3.5

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.

3. Equipo y pasos de operación

Estructura del equipo

Sistema de aire : Una microbomba proporciona un flujo de aire constante, que se controla con precisión mediante un medidor de flujo (0,05-0,2 L/min).

Tubo de muestra : vidrio o metal, de 5-10 mm de diámetro, con papel de filtro para soportar el polvo.

Medición de presión : medidor de columna de agua convencional (precisión 0,1 cm H_2O) o sensor digital moderno (precisión 1 Pa).

Dispositivo de calibración : placa de orificio estándar o polvo de tamaño de partícula conocido, utilizado para calibrar el punto cero y la sensibilidad del instrumento.

Pasos detallados

Calentar el instrumento : Encienda el instrumento y déjelo funcionar durante 10 minutos para estabilizar el flujo de aire y la temperatura (20-25 °C).

Pesar la muestra : Pesar 2,5 g de polvo de WC utilizando una balanza analítica (error <0,001 g) y registrar la masa.

Llene el tubo de muestra : vierta el polvo lentamente, golpee suavemente para eliminar las burbujas y comprímalo con un compactador hasta una altura de 10 mm y una presión de 2 kPa, manteniendo una porosidad de 0,45 ± 0,05.

Conectar el sistema : Instale el tubo de muestra en el instrumento, asegurándose de que no haya fugas.

Ajuste el flujo de aire : configure el caudal a 0,1 L/min y espere a que la presión se estabilice (aproximadamente 30 segundos).

Registrar datos : Lea la diferencia de la columna de agua (por ejemplo, 15 cm H_2O) y calcule el tamaño de partícula FSSS consultando la tabla o ingresándolo en el software.

Limpiar y repetir : sacar la muestra, limpiar el tubo de muestra con aire comprimido, repetir la medición dos veces y tomar el valor promedio.

Precauciones

El secado de la muestra es fundamental, una humedad > 0,1 % provocará un cambio en la porosidad y un tamaño de partícula entre 0,2 y 0,5 μm mayor.

La fuerza de compresión debe ser constante. Una compresión demasiado apretada (ε<0,4) o demasiado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

floja (ε>0,5) afectará la diferencia de presión.

La temperatura ambiente se controló a 20-25°C para evitar cambios en la viscosidad del aire.

4. Factores influyentes y optimización

La precisión de la determinación del tamaño de partícula de Fisher se ve afectada por numerosos factores. A continuación, se presentan análisis y sugerencias de optimización.

Factores influyentes

Forma de la partícula :

El valor medido de las partículas esféricas está cerca del tamaño de partícula real, mientras que el valor FSSS de las partículas no esféricas (como las que tienen forma de aguja) es mayor (desviación del 10%-20%) debido a una mayor resistencia.

Porosidad :

Si la porosidad es demasiado baja (<0,4), la resistencia es demasiado grande y el tamaño de partícula es demasiado pequeño; si la porosidad es demasiado alta (>0,5), la resistencia es insuficiente y el tamaño de partícula es demasiado grande.

Contenido de humedad :

Un contenido de humedad > 0,2% provoca aglomeración de partículas y aumenta el valor FSSS en 0,3-0,8 μm .

Estabilidad del flujo de aire :

Fluctuación del caudal > 0,01 L/min, error de diferencia de presión ± 0,5 cm H_2O, desviación del tamaño de partícula ± 0,1 μm .

Estrategia de optimización

Pretratamiento de la muestra : secado hasta humedad <0,05%, dispersión ultrasónica durante 5 minutos para reducir la aglomeración.

Control de compresión : utilizando un compactador estándar, la presión es de 2-3 kPa y la porosidad se estabiliza en 0,45 ± 0,02.

Calibración del instrumento : Calibre mensualmente con polvo WC estándar (FSSS 1,0 μm) y el error se controla dentro de ±0,05 μm.

Gestión ambiental : temperatura y humedad constantes (25°C, humedad <50%), flujo de aire estabilizado a 0,1 ± 0,005 L/min.

Datos experimentales :

Condici ó n	Humedad(%)	Porosidad	Diferencia de presión (cm H_2O)	Tamaño de partícula de FSSS (μm)
Sin secar (0,3 % de humedad)	0.3	0.48	16.0	1.4
Compresión seca y optimizada	0.05	0.45	15.2	1.2

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.

5. Escenarios de aplicación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La determinación del tamaño de partícula de Fisher se utiliza ampliamente en la producción y el control de calidad de materiales en polvo. A continuación se presentan aplicaciones específicas.

Producción de carburo cementado

Aplicación : Para medir el tamaño del polvo de WC y controlar el tamaño y las propiedades del grano de carburo cementado.

Caso : Un equipo determinó que el FSSS del polvo WC era de 1,2 µm y la dureza del carburo cementado preparado era HV 2200, con una uniformidad de grano aumentada en un 15 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Polvo de pulverización térmica

Aplicación : Para evaluar el tamaño de partícula del polvo en aerosol WC-Co y garantizar la densidad del recubrimiento en aerosol (>99%).

Caso : Un estudio determinó que la FSSS del polvo WC-12Co fue de 3,5 µm, la dureza del revestimiento HVOF fue de HV 1350 y la tasa de desgaste fue de 0,06 $mm^3/N \cdot m$ (información del sitio web de China Tungsten Online).

Metalurgia de polvos

Aplicación : Para detectar el tamaño de partícula de polvo metálico (como W, Mo) y optimizar el rendimiento de sinterización.

Caso : Una empresa determinó que la FSSS del polvo W era de 2,0 µm y la densidad del cuerpo sinterizado era del 98,5 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Control de calidad

Aplicación : Para detectar la consistencia del tamaño de partícula entre lotes. La desviación es inferior a 0,1 µm.

Resumir

La determinación del tamaño de partícula de Fisher utiliza el método de permeabilidad al aire para determinar el tamaño promedio de partícula del polvo (0,2-50 µm), basado en el principio de Kozeny-Carman, y convierte el valor FSSS mediante la diferencia de presión. El método incluye el secado de la muestra (humedad <0,1 %), la compresión (porosidad 0,45), la medición del caudal de aire (0,1 L/min), un equipo sencillo y una precisión de ±0,05 µm. Es necesario optimizar factores influyentes como la forma de la partícula y la humedad, y su aplicación abarca el carburo cementado, la pulverización de polvo y la pulvimetalurgia para garantizar la consistencia del rendimiento del material (información del sitio web de China Tungsten Online).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

Densidad aparente y su método de determinación

Densidad aparente y su método de determinación

La densidad aparente se refiere a la masa de polvo por unidad de volumen en estado apilado natural, generalmente en g/cm³ o kg/m³, y es un parámetro importante para caracterizar las propiedades físicas del polvo. La densidad aparente refleja el tamaño, la forma, las características superficiales y el modo de apilamiento de las partículas de polvo, y es fundamental para procesos como la pulvimetalurgia, la pulverización térmica y la producción de carburo cementado. El método de determinación es simple y eficiente, y se utilizan comúnmente las dos formas de densidad aparente suelta y compactada, que se completan mediante contenedores estándar y operaciones de pesaje.

1. Definición y significado

definición

Densidad aparente: Relación entre la masa del polvo y el volumen del contenedor una vez llenado en condiciones específicas (como compactación por vibración o compactación natural). Densidad aparente = m/V. Donde:

m: masa de polvo (g)

V: Volumen ocupado por el polvo (cm³)

Densidad aparente suelta : Estado del polvo que cae libremente en un recipiente sin compresión ni vibración.

Densidad aparente compactada: La densidad del polvo después de que se vibra o se golpea en el contenedor y las partículas se reorganizan a un estado más denso.

significado

Guía del proceso : La densidad aparente afecta la fluidez, la eficiencia de llenado y el rendimiento de sinterización del polvo. Por ejemplo, el polvo de carburo de tungsteno (WC) presenta una alta densidad aparente y una mejor densidad de sinterización.

Control de calidad : Refleja la consistencia entre lotes de polvo. Grandes desviaciones pueden provocar defectos de moldeo.

Propiedades del material : están estrechamente relacionadas con el tamaño de las partículas, la forma y la rugosidad de la superficie y son indicadores importantes para caracterizar los polvos.

Valor típico

Tipo de polvo	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad compactada (g/cm³)
Polvo de WC (1 μm)	4.5-5.0	5.5-6.0
WC-12Co	4.0-4.5	4.8-5.2
Polvo W (5 μm)	6.0-7.0	7.5-8.5
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.		

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2. Factores influyentes

La densidad aparente se ve afectada por muchos factores, que se analizan en detalle a continuación.

Tamaño de partícula

Impacto : Cuanto menor sea el tamaño de partícula, mayor será la superficie específica, más huecos habrá entre las partículas y menor será la densidad de empaquetamiento; cuanto mayor sea el tamaño de partícula, menos huecos habrá y mayor será la densidad.

Datos experimentales :

Tamaño de partícula de WC (μm)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad compactada (g/cm³)
0.5	4.2	5.3
2.0	4.8	5.8
5.0	5.2	6.2
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.		

Forma de la partícula

Impacto : Las partículas esféricas están densamente empaquetadas y tienen alta densidad; las partículas irregulares o con forma de aguja tienen grandes espacios y baja densidad.

Caso : La densidad aparente del polvo de WC esférico (esfericidad > 95%) es de 4,8 g/cm³, mientras que la del polvo de WC irregular es de solo 4,3 g/cm³.

Propiedades de la superficie

Impacto : Los polvos con superficies rugosas o electricidad estática son fáciles de aglomerar, la porosidad aumenta y la densidad disminuye; las superficies lisas favorecen un apilamiento denso.

Experimento : La densidad del polvo de WC sin tratar es de 4,5 g/cm³ y alcanza 5,0 g/cm³ después de la esferoidización de plasma.

Contenido de humedad

Impacto : Un contenido de humedad > 0,2% hace que las partículas se adhieran entre sí, la porosidad aumenta y la densidad disminuye.

Datos : La densidad aparente del polvo de WC con un contenido de agua del 0,5% es de 4,3 g/cm³, que aumenta a 4,8 g/cm³ después del secado.

Método de apilamiento

Impacto : La densidad en estado suelto es baja. Tras la compactación, las partículas se reorganizan, los huecos se reducen y la densidad aumenta entre un 10 % y un 20 %.

3. Método de determinación

La densidad aparente se determina según procedimientos estándar como ASTM B212 (suelto), ASTM B527 (colocado) o ISO 3923. A continuación se presenta una descripción general del método.

densidad aparente suelta

Principio : El polvo cae libremente en el contenedor sin aplicar fuerza externa y se mide la densidad en el estado de apilamiento natural.

paso :

Preparar muestras secas (humedad < 0,1%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Utilice un embudo para verter lentamente el polvo en un cilindro medidor estándar (25 o 100 cm^3), manteniendo una gota de 10-15 cm.

Espere a que el polvo se acumule de forma natural, alise la superficie con un raspador y registre el volumen (V).

Pesar la masa de polvo en el cilindro graduado (m) y calcular la densidad (m/V).

densidad aparente compactada

Principio : A través de vibración mecánica o golpes, las partículas de polvo se reorganizan y se mide la densidad en un estado más denso.

Paso :

Llene el cilindro utilizando el método de empaque suelto.

Coloque el cilindro de medición sobre un vibrador y vibre 100-300 veces (frecuencia 50-60 veces/min, amplitud 3 mm) o golpee manualmente hasta que el volumen ya no cambie.

Registre el volumen después de la compactación (V'), pese la masa (m) y calcule la densidad (m/V').

Datos experimentales

Muestra	Masa(g)	Volumen suelto (cm^3)	Densidad aparente (g/cm^3)	Volumen del grifo (cm^3)	Densidad compactada (g/cm^3)
WC (1 µm)	50	10.5	4.76	8.9	5.62
WC-12Co	50	11.8	4.24	10.2	4.90
W (5 µm)	50	7.8	6.41	6.5	7.69
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.					

4. Equipo y pasos de operación

equipo

Probeta : Probeta de vidrio estándar (25, 50 o 100 cm^3), graduada a ±0,1 cm^3.

Embudo : diámetro de apertura 5-10 mm, altura de caída ajustable.

Balanza : precisión 0,001 g, utilizada para pesar masa de polvo.

Vibrador : Dispositivo de compactación mecánica con amplitud 1-5 mm y frecuencia ajustable (50-60 Hz).

Horno : temperatura 100-120°C, utilizado para secar la muestra.

Raspador : alisa la superficie del polvo para evitar la compactación.

Pasos detallados

Preparación de la muestra :

Muestreo: Tomar una muestra aleatoria de 50-100 g del lote de polvo, utilizando un muestreador para asegurar la homogeneidad.

Secado: Secar en horno a 105°C durante 2 horas, humedad <0,1%, enfriar a temperatura ambiente (en desecador).

Determinación de la densidad aparente :

Seleccione un cilindro graduado de 100 cm^3 y registre el peso vacío (m_0).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Utilice un embudo para verter el polvo lentamente, con una caída de 15 cm, evitando golpes o vibraciones.
Raspe la superficie ligeramente con un raspador y registre el peso total (m_1) y el volumen (V).
Cálculo: Densidad aparente = (m_1 - m_0) / V.

Determinación de la densidad del golpe :

Llene el cilindro graduado como en el método de llenado suelto y registre el volumen inicial.
Colóquelo en un compactador, ajuste la amplitud a 3 mm y compactélo 200 veces (o hasta que el volumen se estabilice).
Registre el volumen compactado (V') y el peso total (m_1).
Cálculo: Densidad de compactación = (m_1 - m_0) / V ' .

Verificación de repetibilidad :

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio cuando la desviación fue inferior al 2%.
Revise el interior del cilindro para asegurarse de que no haya polvo adherido.

Precauciones

Evitar la compactación artificial que afecta la autenticidad de la densidad suelta.
El número de vibraciones debe ser constante. Si se realizan muy pocas (<100 veces), la densidad será baja, mientras que si se realizan demasiadas (>300 veces), no se producirá ningún cambio significativo.
Humedad ambiente <50% para evitar interferencias de humedad.

5. Escenarios de aplicación

La determinación de la densidad aparente tiene una amplia gama de aplicaciones en el campo de los materiales en polvo. A continuación, se presentan escenarios y casos específicos.

Producción de carburo cementado

Aplicación : Para evaluar la eficiencia de llenado de polvo WC y optimizar los procesos de prensado y sinterización.

Caso : Un equipo determinó que la densidad aparente del polvo WC era de 4,8 g/cm³, la densidad de compactación era de 5,8 g/cm³, la densidad de compactación del tocho prensado se incrementó en un 10% y la dureza era HV 2200 (información del sitio web de China Tungsten Online).

Polvo de pulverización térmica

Aplicación : Para probar la fluidez y la eficiencia de carga de polvo de WC-Co y garantizar la uniformidad de la pulverización.

Caso : Un estudio determinó que la densidad de compactación de WC-12Co fue de 4,9 g/cm³, la porosidad del revestimiento pulverizado HVOF fue <1% y la resistencia al desgaste mejoró en un 30% (información del sitio web de China Tungsten Online).

Metalurgia de polvos

Aplicación : Para medir la densidad aparente de polvos de W y Mo y controlar la contracción por sinterización.

Caso : Una empresa midió la densidad del polvo W y resultó en 7,7 g/cm³, la contracción del cuerpo sinterizado se mantuvo estable entre el 15 % y el 18 % y la densidad alcanzó el 99 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Control de calidad

Aplicación : Prueba de consistencia de densidad entre lotes, se califica una desviación <5%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caso : Una prueba de producción de una fluctuación de la densidad aparente del polvo WC <0,1 g/cm³ garantiza un rendimiento estable del lote (información del sitio web de China Tungsten Online).

Optimización del almacenamiento y el transporte

Aplicación : Para evaluar el volumen de envases de polvo y reducir los costos de transporte.

Resumir

La densidad aparente es un parámetro que caracteriza la relación entre la masa y el volumen del polvo. Se divide en densidad suelta (empaquetamiento natural) y densidad compactada (después del colado), que se ve afectada por el tamaño de partícula, la forma, las características de la superficie y la humedad. El método de determinación se opera con una probeta estándar y un instrumento de colado. La densidad suelta del polvo WC es de 4,5-5,0 g/cm³, y la densidad compactada es de 5,5-6,0 g/cm³, con una precisión de ±0,01 g/cm³. En términos de aplicación, guía los procesos de carburo cementado, pulverización térmica y pulvimetalurgia para mejorar la calidad del producto y la eficiencia del proceso (información del sitio web de China Tungsten Online). Optimizar la humedad (<0,1%) y las condiciones de colado puede mejorar la precisión de la determinación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice

Método de determinación de la fluidez del polvo de carburo de tungsteno

La fluidez del polvo de carburo de tungsteno (WC) se refiere a la capacidad del polvo para fluir libremente bajo la acción de la gravedad u otras fuerzas externas, generalmente caracterizada por el caudal (segundos/50 g) o el tiempo de flujo a través de un embudo estándar por unidad de tiempo. La fluidez es una propiedad física importante de los materiales en polvo, que afecta directamente su eficiencia de llenado, uniformidad y estabilidad del proceso en la pulverización térmica, la pulvimetalurgia y la producción de carburo cementado. El método de caudal Hall se utiliza comúnmente para medir la fluidez del polvo de carburo de tungsteno. La fluidez se evalúa midiendo el tiempo que tardan 50 g de polvo en pasar a través de un embudo estándar.

1. Definición y significado

definición

Fluidez : la capacidad de un polvo de fluir libremente a través de una abertura específica (como un orificio de 2,5 mm en un embudo Hall) sin presión externa.

Indicadores de determinación :

Caudal Hall: tiempo necesario para que fluyan 50 g de polvo (unidad: segundos/50 g). Cuanto menor sea el tiempo, mejor será la fluidez.

Si el polvo no fluye libremente, regístrelo como "Sin flujo".

significado

Influencia del proceso : Los polvos con buena fluidez (como el polvo WC con una velocidad de flujo de 13 a 15 segundos/50 g) se distribuyen uniformemente durante la pulverización o el prensado, lo que reduce la porosidad y los defectos.

Control de calidad : refleja la consistencia entre lotes de polvo. Grandes desviaciones en el caudal pueden provocar fluctuaciones en el proceso.

Correlación de rendimiento : está estrechamente relacionada con el tamaño de las partículas, la forma y el estado de la superficie, y es un parámetro clave para optimizar la preparación y aplicación del polvo.

Valor típico

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Caudal (segundos/50 g)	Evaluación de liquidez
WC (esférico)	15-45	13.5	excelente
WC (irregular)	10-30	16.0	bien
WC-Co (polvo fino)	5-15	>20 o ilíquido	Diferencia
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.			

2. Factores influyentes

La fluidez del polvo de carburo de tungsteno se ve afectada por numerosos factores. A continuación, se presenta un análisis detallado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tamaño de partícula

Impacto : Cuanto mayor sea el tamaño de partícula, menor será la fricción entre ellas y mayor la fluidez. Si el tamaño de partícula es demasiado pequeño (<5 μm), la fuerza de van der Waals y el efecto electrostático aumentarán, y la fluidez disminuirá.

Datos experimentales :

Tamaño de partícula de WC (μm)	Caudal (segundos/50 g)
5	>25 (no fluido)
15-45	13.8
45-60	12.5
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.	

Forma de la partícula

Impacto : Las partículas esféricas (esfericidad > 95%) tienen baja resistencia a la rodadura y buena fluidez; las partículas irregulares o escamosas tienen poca fluidez debido al enclavamiento mecánico.

Caso : El caudal del polvo WC esférico es de 13,5 segundos/50 g, y el del polvo WC irregular es de 16,5 segundos/50 g.

Propiedades de la superficie

Impacto : Los polvos con superficies lisas tienen menos fricción y mejor fluidez; los polvos con superficies rugosas o con una capa de óxido (WO_3) son propensos a la adhesión y tienen una fluidez reducida.

Experimento : La velocidad de flujo del polvo WC esferoidizado con plasma es de 13,0 segundos/50 g, y la del polvo sin tratar es de 15,5 segundos/50 g.

Contenido de humedad

Impacto : Un contenido de humedad > 0,2% provoca aglomeración de partículas, reduce significativamente la fluidez e incluso hace que el material no fluya.

Datos : El caudal del polvo de WC con un contenido de humedad del 0,5 % es >20 segundos/50 g y, después del secado (contenido de humedad <0,1 %), desciende a 14,0 segundos/50 g.

Condiciones ambientales

Impacto : La humedad > 60% aumenta la higroscopicidad del polvo y los cambios de temperatura afectan la viscosidad del aire, los cuales pueden interferir con la fluidez.

3. Método de determinación

La fluidez del polvo de carburo de tungsteno se determina generalmente mediante el método de caudal Hall, siguiendo normas como ASTM B213 o ISO 4490. A continuación, se presenta una descripción general del método.

Método de flujo Hall

Principio : Medir el tiempo que tardan 50 g de polvo en pasar por un embudo Hall estándar (apertura de 2,5 mm). Cuanto menor sea el tiempo, mejor será la fluidez.

paso :

Preparar polvo seco (humedad < 0,1%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Vierta 50 g de polvo en el embudo Hall y golpee suavemente para asegurar un llenado uniforme.
Abra el deflector en la parte inferior del embudo y registre el tiempo (en segundos) que tarda el polvo en salir por completo.
Si el polvo no fluye, regístrelo como "no fluido".

Métodos auxiliares

Método de inclinación : mide el ángulo de reposo del apilamiento natural del polvo. Cuanto menor sea el ángulo (<30°), mejor será la fluidez.

Método de compactación por compactación : evalúa indirectamente la fluidez combinando el cambio en la densidad de compactación.

Datos experimentales

Muestra	Tamaño de partícula (μm)	Humedad(%)	Caudal (segundos/50 g)	Ángulo de reposo (°)
WC (esférico)	15-45	0.05	13.5	28
WC (irregular)	10-30	0.10	16.0	35
WC (polvo fino)	5-15	0,20	>25 (no fluido)	45

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.

4. Equipo y pasos de operación

equipo

Embudo de pasillo :

Material: Acero inoxidable o latón.

Especificaciones: Diámetro del orificio inferior 2,5 mm, ángulo del cono 60°, volumen de aproximadamente 100 cm^3.

Temporizador : precisión 0,1 segundos.

Balanza : precisión 0,001g, pesa 50g de polvo.

Horno : temperatura 100-120°C, secar la muestra.

Contenedor receptor : capacidad >50 cm^3, recoge el polvo que sale.

Vibrador (opcional) : ayuda a probar polvos no fluidos.

Pasos detallados

Preparación de la muestra :

Se tomaron muestras aleatorias de 100 g del lote de polvo utilizando un divisor de muestras para garantizar la homogeneidad.

Secar en horno a 105°C durante 2 horas, humedad <0,1%, enfriar a temperatura ambiente (en desecador).

Calibración del instrumento :

Compruebe la apertura del embudo Hall (2,5 ± 0,01 mm) para asegurarse de que no haya ninguna obstrucción.

Verifique la precisión del instrumento utilizando un polvo estándar (por ejemplo, FSSS 3,0 μm WC, velocidad de flujo 14,0 seg/50 g).

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

Proceso de determinación :

Pesar 50,0 ± 0,01 g de polvo de WC, verterlo en el embudo Hall y golpearlo suavemente tres veces para evitar que se formen puentes.

Abra el deflector inferior e inicie el temporizador al mismo tiempo para registrar el momento en que el polvo sale por completo.

Si el polvo se atasca, golpee el embudo; si aún no fluye, regístrelo como "no fluye".

Tratamiento de datos :

Repita la medición tres veces y tome el valor promedio si la desviación es menor a 0,5 segundos.

Compruebe la masa de polvo en el recipiente receptor para asegurarse de que no haya residuos (error < 0,1 g).

Precauciones

El embudo debe colocarse verticalmente para evitar inclinaciones que puedan afectar el caudal (desviación ±0,2 segundos).

Control ambiental: temperatura 20-25°C, humedad <50%, evitar la absorción de humedad.

El polvo fino (<10 μm) puede requerir asistencia por vibración, de lo contrario es propenso a obstruirse.

5. Escenarios de aplicación

La medición de la fluidez del polvo de carburo de tungsteno tiene importantes aplicaciones en diversos campos. A continuación, se presentan casos y escenarios específicos.

Proceso de pulverización térmica

Aplicación: Para evaluar la uniformidad del suministro de polvo de WC-Co en HVOF o APS. Un caudal <15 s/50 g es excelente.

Caso : Un equipo determinó que el caudal de WC-12Co fue de 13,8 segundos/50 g, la porosidad del revestimiento pulverizado fue <1 % y la resistencia al desgaste mejoró en un 30 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Producción de carburo cementado

Aplicación : Para probar la fluidez del polvo WC y garantizar la uniformidad de los espacios en blanco prensados.

Caso : Un estudio determinó que el caudal de polvo WC fue de 14,0 segundos/50 g, la consistencia de densidad de las piezas prensadas mejoró en un 10 % y la dureza fue HV 2250 (información del sitio web de China Tungsten Online).

Metalurgia de polvos

Aplicación : Para optimizar la eficiencia del llenado de polvo W o WC. Un caudal demasiado alto (>20 segundos/50 g) puede causar delaminación.

Caso : Una empresa determinó que el caudal del polvo esférico W era de 12,5 segundos/50 g y la densidad del cuerpo sinterizado era del 99 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Control de calidad

Aplicación : Para comprobar la consistencia de la fluidez entre lotes. La desviación del caudal es inferior a 1 segundo.

Caso : Una empresa de producción midió que la fluctuación del caudal de polvo WC era <0,5 s/50 g, lo que garantiza la estabilidad del lote (información del sitio web de China Tungsten Online).

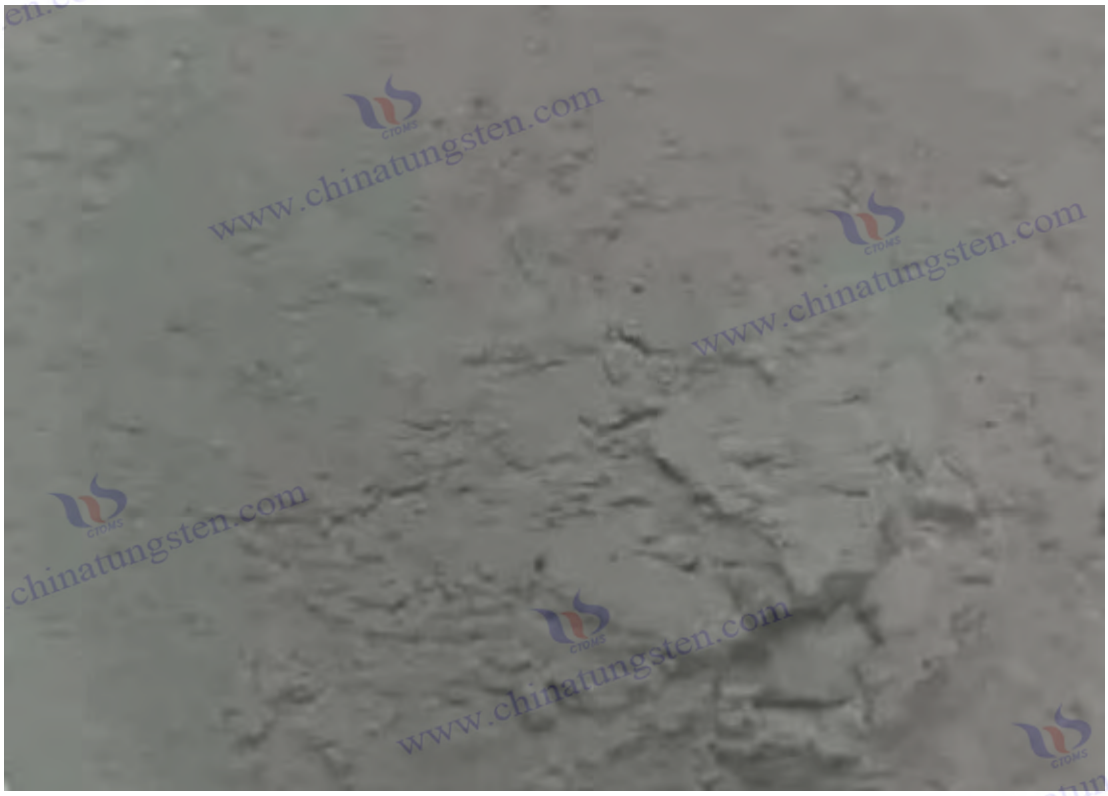
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Diseño de almacenamiento y transporte

Aplicación : Evaluar las características de flujo de polvos en silos y optimizar el sistema de transporte.

Resumir

La fluidez del polvo de carburo de tungsteno se mide mediante el método de caudal Hall, que se caracteriza por el tiempo (segundos/50 g) que tardan 50 g de polvo en fluir a través de un embudo de 2,5 mm de apertura, con un valor típico de 13-16 segundos/50 g. La fluidez se ve afectada por el tamaño de la partícula, la forma, el estado de la superficie y la humedad. La medición requiere polvo seco (humedad <0,1 %), equipo estándar y un funcionamiento preciso. En cuanto a su aplicación, se utiliza en procesos de pulverización térmica, carburo cementado y pulvimetalurgia para mejorar la eficiencia del llenado y la calidad del producto (información del sitio web de China Tungsten Online). Optimizar la esfericidad de las partículas y las condiciones de secado puede mejorar significativamente la fluidez.



Un apéndice:

Densidad de compactación del polvo de carburo de tungsteno y su método de determinación

La densidad compactada se refiere a la masa por unidad de volumen del polvo de carburo de tungsteno (WC) después de que las partículas se reorganizan a un estado denso bajo condiciones específicas de vibración o golpeteo, generalmente en g/cm³. La densidad compactada es un parámetro clave de las propiedades físicas de los polvos, que refleja la compacidad del empaquetamiento de las partículas y se acerca más al estado de llenado en el proceso real que la densidad suelta. En el carburo cementado, la pulverización térmica y la pulvimetalurgia, la densidad compactada afecta directamente la eficiencia del prensado, el rendimiento de sinterización y la calidad final del material. El método de determinación

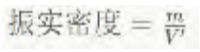
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

generalmente adopta el método de roscado, que se completa con una probeta graduada estándar y un equipo de roscado.

1. Definición y significado

definición

Densidad de toque : La densidad del polvo de carburo de tungsteno cuando se reducen los espacios entre las partículas y el polvo alcanza un estado de apilamiento estable después de la vibración mecánica o el toque manual.



en:

m: masa de polvo (g)

V: Volumen después de la compactación (cm^3)

Diferencia con la densidad aparente : la densidad aparente es el estado de apilamiento natural, mientras que la densidad compactada hace que las partículas sean más compactas a través de una fuerza externa y el valor suele ser entre un 10% y un 20% más alto.

significado

Guía de proceso : El polvo WC con alta densidad de compactación (como 5,5-6,0 g/cm^3) es más eficiente durante el prensado o llenado y tiene mejor densidad después de la sinterización.

Control de calidad : Refleja la consistencia de las características de apilamiento del polvo entre lotes. Grandes desviaciones pueden provocar un moldeo irregular.

Correlación de rendimiento : relacionada con el tamaño de las partículas, la forma y el estado de la superficie, y es una base importante para optimizar la preparación y aplicación del polvo.

Valor típico

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Densidad aparente (g/cm^3)	Densidad compactada (g/cm^3)
WC (ultrafino)	0,5-1	4.2-4.5	5.3-5.6
WC (Mediano)	2-5	4.8-5.0	5.8-6.2
WC-Co (compuesto)	15-45	4.0-4.5	4.8-5.2

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.

2. Factores influyentes

El valor de la densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno se ve afectado por numerosos factores. A continuación, se presenta un análisis detallado.

Tamaño de partícula

Impacto : Cuanto mayor sea el tamaño de partícula, mayor será la eficiencia de llenado de los espacios entre partículas y aumentará la densidad del compactación; si el tamaño de partícula es demasiado pequeño (<1 μm), aumenta la fuerza superficial, los espacios son difíciles de comprimir y la densidad es

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

baja.

Datos experimentales :

Tamaño de partícula de WC (μm)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad compactada (g/cm³)	Aumentar(%)
0.5	4.2	5.3	26
2.0	4.8	5.8	veintiuno
5.0	5.0	6.2	veinticuatro
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.			

Forma de la partícula

Impacto : Las partículas esféricas (esfericidad > 95%) están dispuestas estrechamente después de la vibración y tienen alta densidad; las partículas irregulares o con forma de aguja tienen alta porosidad y baja densidad debido a la intercalación.

Caso : La densidad aparente del polvo WC esférico es de 6,0 g/cm³, mientras que la del polvo WC irregular es de solo 5,5 g/cm³.

Propiedades de la superficie

Impacto : Los polvos con superficies lisas tienen menos fricción, se reorganizan fácilmente después de la vibración y tienen alta densidad; los polvos con superficies rugosas o con capas de óxido (WO_3) son pegajosos y tienen baja densidad.

Experimento : La densidad aparente del polvo WC esferoidizado con plasma es de 6,2 g/cm³ y la del polvo sin tratar es de 5,7 g/cm³.

Contenido de humedad

Impacto : Un contenido de humedad > 0,2% provoca que las partículas se aglomeren, lo que dificulta que la vibración comprima los espacios y la densidad disminuye.

Datos : La densidad aparente del polvo WC con un contenido de agua del 0,5 % es de 5,2 g/cm³, que aumenta a 5,8 g/cm³ después del secado (contenido de agua <0,1 %).

Condiciones de compactación

Impacto : La amplitud, la frecuencia y el número de vibraciones afectan la eficiencia de la reorganización de partículas. Una vibración insuficiente resultará en una baja densidad, mientras que una vibración excesiva no producirá un cambio significativo.

Experimento : La densidad del polvo WC es de 5,6 g/cm³ después de 100 vibraciones, aumenta a 5,8 g/cm³ después de 300 vibraciones y permanece sin cambios después de 500 vibraciones.

3. Método de determinación

La densidad del polvo de carburo de tungsteno se determina según procedimientos estándar como ASTM B527 o ISO 3953. A continuación se presenta una descripción general del método.

Método de vibración

Principio : A través de vibración mecánica o golpeteo manual, las partículas de polvo WC se reorganizan y se mide la densidad en un estado estable.

paso :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Preparar polvo seco (humedad < 0,1%).

Vierta el polvo en una probeta graduada estándar (25 o 100 cm^3) y registre el volumen inicial.

con un vibrador o toque manualmente hasta que el volumen ya no cambie y registre el volumen después de la vibración (V').

Pesar la masa de polvo (m) y calcular la densidad aparente (m/V').

Datos experimentales

Muestra	Masa(g)	Volumen inicial (cm^3)	Volumen del grifo (cm^3)	Densidad compactada (g/cm^3)
WC (1 μm)	50	11.0	8.9	5.62
WC (5 μm)	50	10.2	8.1	6.17
WC-12Co	50	12.0	10.2	4.90
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.				

4. Equipo y pasos de operación

equipo

Probeta : Probeta de vidrio estándar (25, 50 o 100 cm^3), graduada a ±0,1 cm^3.

Balanza : precisión 0,001g, pesaje de masa de polvo.

Compactador vibratorio :

Tipo: Dispositivo de compactación mecánica (como Scott Volumeter).

Parámetros: amplitud 1-5 mm, frecuencia 50-60 Hz.

Horno : temperatura 100-120°C, secar la muestra.

Embudo : apertura de 5-10 mm, para ayudar en el llenado.

Raspador : alisa la superficie del polvo.

Pasos detallados

Preparación de la muestra :

Se tomaron muestras aleatorias de 50 a 100 g del lote de polvo de WC y se utilizó un divisor de muestras para garantizar la homogeneidad.

Secar en horno a 105°C durante 2 horas, humedad <0,1%, enfriar a temperatura ambiente (en desecador).

Carga de muestra :

Seleccione un cilindro graduado de 100 cm^3 y registre el peso vacío (m_0).

Utilice un embudo para verter lentamente 50 g de polvo en el tubo, con una caída de 10-15 cm para evitar la compactación, y registre el volumen inicial.

Utilice un raspador para alisar ligeramente la superficie.

Proceso de compactación :

Coloque el cilindro de medición en un vibrador, ajuste la amplitud a 3 mm, la frecuencia a 60 Hz y vibre 200 veces (o hasta que el volumen se estabilice).

Vibrando manualmente, golpee el fondo del cilindro de medición 200 veces a una altura de 2-3 cm.

Registre el volumen compactado (V') y el peso total (m_1).

calcular :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Densidad de compactación = (m_1 - m_0) / V ' .

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio cuando la desviación fue inferior al 2%.

Limpieza : Utilice aire comprimido para limpiar el cilindro de medición para evitar que los residuos afecten la próxima medición.

Precauciones

El número de veces que se compacta debe ser constante. Si se compacta muy poco (menos de 100 veces), la densidad será baja, mientras que si se compacta demasiado (más de 300 veces), no se obtendrá una mejora significativa.

La pared interior del cilindro de medición debe estar seca; una humedad >50% puede provocar la adhesión de polvo.

Los polvos finos (<1 μm) pueden requerir una mayor amplitud (5 mm) para superar las fuerzas de la superficie.

5. Escenarios de aplicación

La medición de la densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno tiene importantes aplicaciones en diversos campos. A continuación, se presentan casos y escenarios específicos.

Producción de carburo cementado

Aplicación : Para evaluar el rendimiento de prensado y sinterización del polvo de WC. Una alta densidad compactada (p. ej., 5,8 g/cm³) favorece la densificación.

Caso : Un equipo determinó que la densidad del polvo WC era de 5,8 g/cm³, la densidad del tocho prensado aumentó un 12% y la dureza era HV 2250 (información del sitio web China Tungsten Online).

Proceso de pulverización térmica

Aplicación : Para probar la eficiencia de llenado del polvo WC-Co, la densidad del material compactado es de 4,8 a 5,2 g/cm³ para garantizar la uniformidad de la pulverización.

Caso : Un estudio determinó que la densidad de compactación de WC-12Co fue de 4,9 g/cm³, la porosidad del revestimiento HVOF fue <1% y la resistencia al desgaste mejoró en un 35% (información del sitio web de China Tungsten Online).

Metalurgia de polvos

Aplicación : Optimice la contracción de sinterización del polvo WC o W, aumente la densidad del material y reduzca la porosidad.

Caso : Una empresa determinó que la densidad del polvo WC era de 6,0 g/cm³ y la densidad del cuerpo sinterizado era del 99,5 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Control de calidad

Aplicación : Prueba de consistencia de densidad entre lotes. Se acepta una desviación <0,1 g/cm³.

Caso : Una empresa de producción midió la fluctuación de la densidad del polvo WC y resultó ser <0,05 g/cm³, lo que garantiza la estabilidad del lote (información del sitio web de China Tungsten Online).

Diseño de almacenamiento y transporte

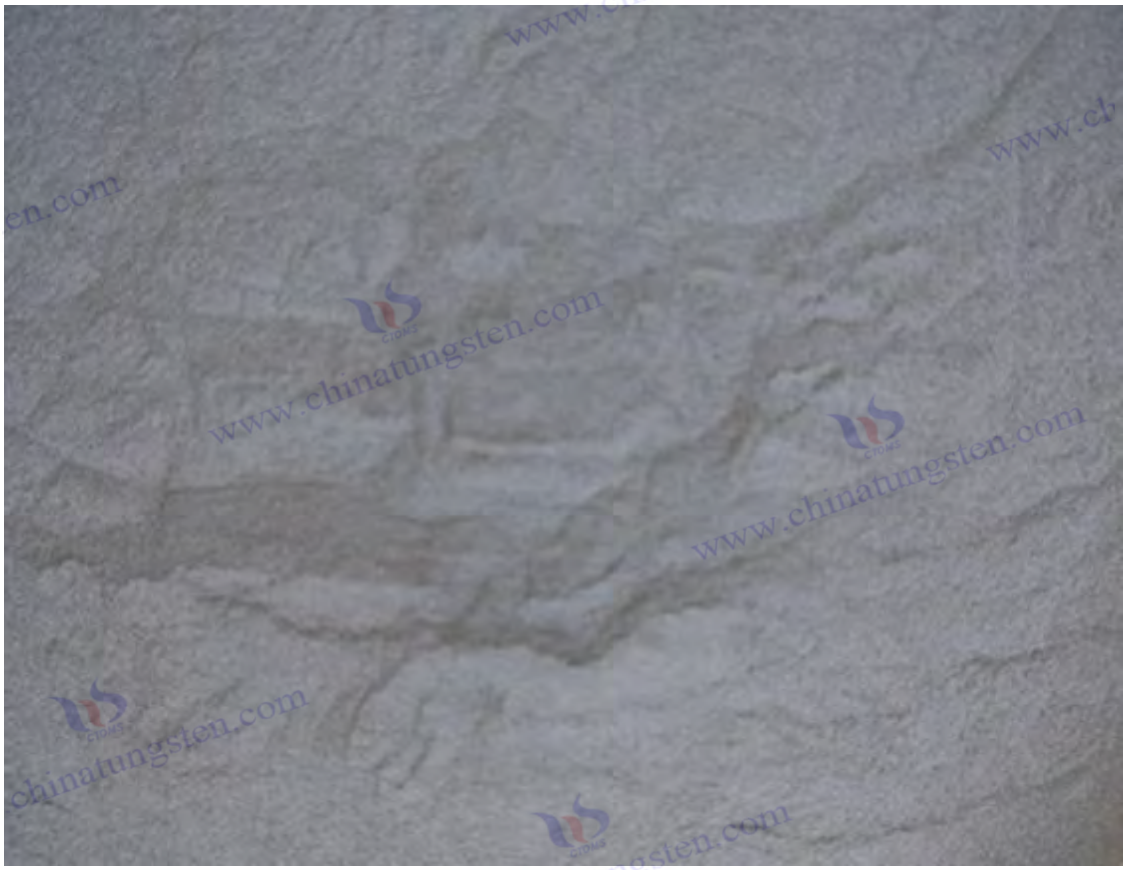
Aplicación : Para evaluar la compacidad del polvo en el silo y optimizar el volumen de envasado.

Resumir

La densidad del polvo de carburo de tungsteno es la masa por unidad de volumen del polvo después de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la vibración, con un valor típico de 5,3-6,2 g/cm³ (monómero WC) o 4,8-5,2 g/cm³ (WC-Co), que se ve afectado por el tamaño de partícula, la forma, el estado de la superficie y la humedad. El método de medición adopta el método de vibración, utilizando un cilindro de medición y un instrumento de vibración, vibrando 200-300 veces, con una precisión de ±0,01 g/cm³. En términos de aplicación, guía los procesos de carburo cementado, pulverización térmica y pulvimetalurgia, mejora la eficiencia de prensado y la calidad del producto (información del sitio web de China Tungsten Online). Optimizar el secado (humedad <0,1%) y las condiciones de vibración puede mejorar la precisión de la medición.



Un **apéndice:**

Densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno y su método de determinación

La densidad aparente suelta se refiere a la masa por unidad de volumen del polvo de carburo de tungsteno (WC) en estado de apilamiento natural sin compresión ni vibración externas, generalmente en g/cm³. La densidad aparente suelta es un parámetro fundamental de las propiedades físicas de los polvos, que refleja la eficiencia de apilamiento de las partículas en estado natural y está estrechamente relacionada con la fluidez, el rendimiento de llenado y los procesos posteriores (como el prensado y la sinterización) del polvo. En los campos del carburo cementado, la pulverización térmica y la pulvimetalurgia, la densidad aparente suelta es un indicador importante para el control de calidad y la optimización de procesos. El método de determinación es sencillo y suele realizarse mediante una probeta graduada estándar y una operación de pesaje.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1. Definición y significado

Definici ó n

Densidad aparente : La densidad del polvo de carburo de tungsteno cuando cae libremente en un recipiente sin ninguna fuerza externa.

Densidad aparente = m/V. Donde:

m: masa de polvo (g)

V: volumen suelto (cm^3)

Características : Refleja el estado natural de apilamiento del polvo. En comparación con la densidad aparente, su valor es menor y su porosidad es mayor.

significado

Guía de proceso : El polvo de WC con baja densidad aparente (como 4,2-4,5 g/cm^3) tiene una baja eficiencia de llenado y puede afectar la uniformidad del prensado; la alta densidad (como 5,0 g/cm^3) favorece la estabilidad del proceso.

Control de calidad : Verificar la consistencia de las características de las partículas entre lotes. Desviaciones importantes pueden provocar fluctuaciones en el proceso.

Correlación de rendimiento : está relacionada con el tamaño de las partículas, la forma y la condición de la superficie, y son los datos básicos para evaluar las propiedades del polvo.

Valor típico

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Densidad aparente (g/cm^3)	Densidad real (g/cm^3)
WC (ultrafino)	0,5-1	4.2-4.5	15.63
WC (Mediano)	2-5	4.8-5.0	15.63
WC-Co (compuesto)	15-45	4.0-4.5	12-14
Fuente de datos: Probado en laboratorio en 2023, información de China Tungsten Online. Nota: La densidad real es un valor teórico.			

2. Factores influyentes

La densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno se ve afectada por numerosos factores. A continuación, se presenta un análisis detallado.

Tamaño de partícula

Impacto : Cuanto mayor sea el tamaño de partícula, mayor será la eficiencia de llenado de los espacios entre partículas y aumentará la densidad aparente; si el tamaño de partícula es demasiado pequeño (<1 μm), aumenta la fuerza superficial (como la fuerza de van der Waals), los espacios aumentan y la densidad disminuye.

Datos experimentales :

Tamaño de partícula de WC (μm)	Densidad aparente (g/cm^3)	Relación de vacíos (%)
0.5	4.2	73
2.0	4.8	69
5.0	5.0	68

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tamaño de partícula de WC (μm)	Densidad aparente (g/cm³)	Relación de vacíos (%)
Fuente de datos: Prueba de laboratorio realizada en 2023, información del sitio web China Tungsten Online. Relación de vacíos = (1 - densidad aparente/densidad real) × 100 %.		

Forma de la partícula

Impacto : Las partículas esféricas (esfericidad > 95%) están naturalmente empaquetadas densamente y tienen alta densidad; las partículas irregulares o escamosas tienen alta porosidad y baja densidad debido a la intercalación.

Caso : La densidad aparente del polvo de WC esférico es de 5,0 g/cm³ y la del polvo de WC irregular es de 4,5 g/cm³.

Propiedades de la superficie

Impacto : Los polvos con superficies lisas tienen menos fricción, están compactados y tienen alta densidad; los polvos con superficies rugosas o capas de óxido (WO_3) son propensos a la adhesión y tienen baja densidad.

Experimento : La densidad aparente del polvo de WC esferoidizado con plasma es de 5,1 g/cm³ y la del polvo sin tratar es de 4,6 g/cm³.

Contenido de humedad

Impacto : Un contenido de humedad > 0,2% provoca aglomeración de partículas, aumento de la porosidad y disminución de la densidad.

Datos : La densidad aparente del polvo de WC con un contenido de humedad del 0,5% es de 4,3 g/cm³, que aumenta a 4,8 g/cm³ después del secado (contenido de humedad <0,1%).

Método de apilamiento

Impacto : La altura de la caída y la velocidad de vertido del polvo afectan la uniformidad del apilamiento. Una caída demasiado grande (>20 cm) puede causar segregación de partículas y baja densidad.

3. Método de determinación

La densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno se determina según procedimientos estándar, como ASTM B212 o ISO 3923-1. A continuación, se presenta una descripción general del método.

Método de montaje suelto

Principio : Deje que el polvo de WC caiga libremente en un cilindro de medición estándar a través de un embudo para medir la densidad en el estado de apilamiento natural.

paso :

Preparar polvo seco (humedad < 0,1%).

Utilice el embudo para verter lentamente el polvo en una probeta (de 25 o 100 cm³), dejando una gota de 10-15 cm.

Alise la superficie con un raspador y registre el volumen (V).

Pesar la masa del polvo (m) y calcular la densidad aparente (m/V).

Datos experimentales

Muestra	Masa(g)	Volumen (cm³)	Densidad aparente (g/cm³)
WC (1 μm)	50	11.0	4.55
WC (5 μm)	50	10.2	4.90

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Muestra	Masa(g)	Volumen (cm^3)	Densidad aparente (g/cm^3)
WC-12Co	50	11.8	4.24
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.			

4. Equipo y pasos de operación

Equipo

Probeta : Probeta de vidrio estándar (25, 50 o 100 cm^3), graduada a ±0,1 cm^3.

embudo :

Material: acero inoxidable o vidrio.

Especificaciones: Diámetro de apertura 5-10 mm, caída ajustable.

Balanza : precisión 0,001g, pesaje de masa de polvo.

Horno : temperatura 100-120°C, secar la muestra.

Raspador : alisa la superficie del polvo para evitar la compactación.

Divisor de muestras : asegura la homogeneidad de la muestra.

Pasos detallados

Preparación de la muestra :

Seleccione aleatoriamente entre 50 y 100 g del lote de polvo de WC y utilice un divisor de muestras para tomar una muestra uniforme.

Secar en horno a 105°C durante 2 horas, humedad <0,1%, enfriar a temperatura ambiente (en desecador).

Carga de muestra :

Seleccione un cilindro graduado de 100 cm^3 y registre el peso vacío (m_0).

Fijar el embudo encima de la probeta graduada con una altura de 15 cm y verter lentamente 50 g de polvo, evitando golpes o vibraciones.

Raspe la superficie ligeramente con un raspador y registre el peso total (m_1) y el volumen (V).

calcular :

Densidad aparente = $(m_1 - _0)/V$.

La medición se repitió 3 veces y se tomó el valor promedio cuando la desviación fue inferior al 2%.

Limpieza : Utilice aire comprimido para limpiar el cilindro de medición y el embudo para evitar que los residuos afecten la próxima medición.

Precauciones

Evite la compactación o vibración artificial para garantizar un estado de apilamiento natural.

La altura de caída debe controlarse entre 10 y 15 cm. Una altura excesiva (>20 cm) puede causar estratificación de partículas y baja densidad.

Humedad ambiente <50% para evitar que el polvo absorba humedad.

5. Escenarios de aplicación

La determinación de la densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno tiene importantes aplicaciones en diversos campos. A continuación, se presentan casos y escenarios específicos.

Producción de carburo cementado

Aplicación : Evaluar la eficiencia de llenado inicial del polvo de WC y guiar el proceso de prensado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caso : Un equipo determinó que la densidad aparente del polvo WC era de 4,8 g/cm³, la uniformidad del blanco prensado mejoró en un 8% y la dureza fue HV 2200 (información del sitio web de China Tungsten Online).

Proceso de pulverización térmica

Aplicación : Para comprobar la estabilidad del suministro de polvo de WC-Co. La densidad aparente de 4,0-4,5 g/cm³ favorece una pulverización uniforme.

Caso : Un estudio determinó que la densidad aparente de WC-12Co fue de 4,2 g/cm³, la porosidad del revestimiento HVOF fue <1,5% y la resistencia al desgaste mejoró en un 25% (información del sitio web de China Tungsten Online).

Metalurgia de polvos

Aplicación : Para optimizar la eficiencia de llenado de polvo WC o W, la alta densidad aparente puede reducir la fluctuación de la contracción por sinterización.

Caso : Una empresa determinó que la densidad aparente del polvo WC era de 5,0 g/cm³ y la densidad del cuerpo sinterizado era del 98,5 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Control de calidad

Aplicación : Prueba de consistencia de densidad entre lotes. Se acepta una desviación < 0,1 g/cm³.

Caso : Una empresa de producción midió la fluctuación de la densidad aparente del polvo de WC y resultó en <0,05 g/cm³, lo que garantiza la estabilidad del lote (información del sitio web de China Tungsten Online).

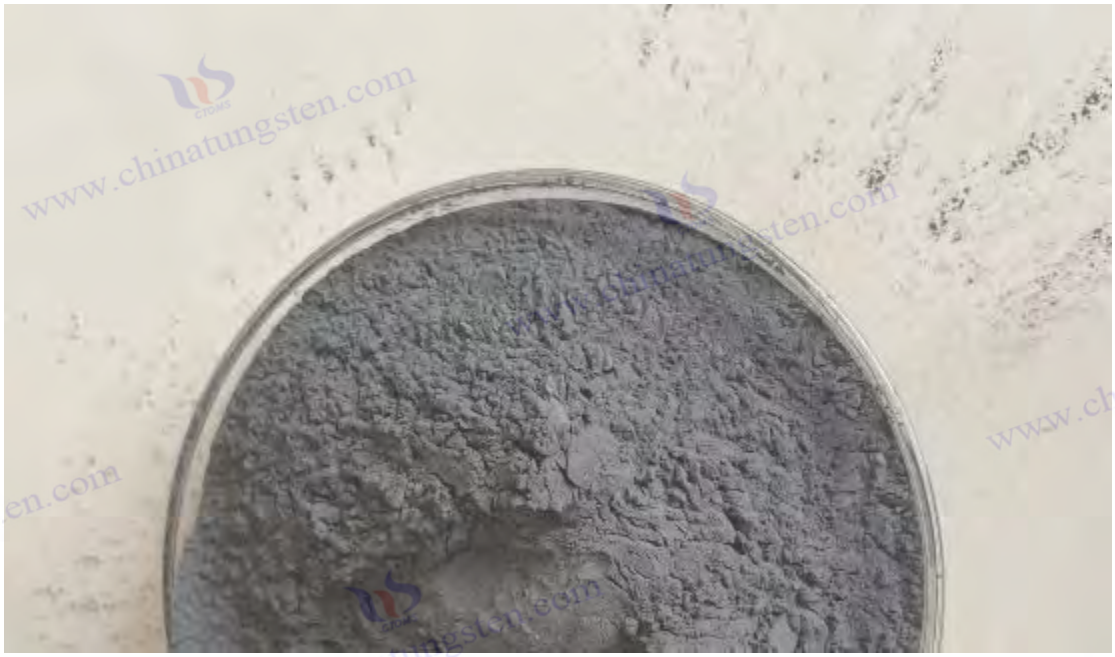
Diseño de almacenamiento y transporte

Aplicación : Para evaluar el volumen natural de polvos y optimizar la eficiencia del envasado y el transporte.

Resumir

La densidad aparente del polvo de carburo de tungsteno es la masa volumétrica unitaria del polvo en estado de apilamiento natural, con un valor típico de 4,2-5,0 g/cm³ (monómero WC) o 4,0-4,5 g/cm³ (WC-Co), que se ve afectada por el tamaño de partícula, la forma, el estado de la superficie y la humedad. El método de determinación adopta el método a granel, utilizando una probeta graduada y un embudo, con una precisión de ±0,01 g/cm³. En términos de aplicación, guía los procesos de carburo cementado, pulverización térmica y pulvimetalurgia para mejorar la eficiencia del llenado y la calidad del producto (información del sitio web de China Tungsten Online). Optimizar el secado (contenido de humedad <0,1 %) y las condiciones de caída puede mejorar la precisión de la determinación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

¿Cuáles son las expresiones de densidad del polvo de carburo de tungsteno?

La densidad del polvo de carburo de tungsteno (WC) es una magnitud física que caracteriza la relación entre su masa y volumen. Tiene múltiples representaciones en diferentes escenarios de aplicación y condiciones de prueba. La representación de la densidad no solo refleja las características intrínsecas y el comportamiento de apilamiento del polvo, sino que también afecta directamente la optimización del rendimiento y el control de calidad de procesos como el carburo cementado, la pulverización térmica y la pulvimetalurgia. La densidad del polvo de carburo de tungsteno suele incluir la densidad real, la densidad suelta, la densidad compactada y la densidad aparente, entre otras. Cada densidad tiene una definición, un método de medición y una aplicación específicos.

1. Definición y clasificación de la densidad

La densidad es la masa de una sustancia por unidad de volumen, y la fórmula es: $\rho=m / V$
en:
ρ: densidad (g/cm^3)
m: masa (g)
V: Volumen (cm^3) Para
el polvo de carburo de tungsteno, la expresión de densidad varía según las condiciones de medición y el estado del polvo.

La densidad del polvo de carburo de tungsteno incluye principalmente lo siguiente:
Densidad real: la densidad teórica de las propias partículas de polvo, excluyendo poros o huecos.
Densidad aparente suelta: La densidad del polvo en su estado de apilamiento natural, incluidos los espacios entre partículas.
Densidad compactada: La densidad de un polvo en un estado más compacto después de ser vibrado o compactado.
Densidad aparente: la densidad de un polvo en condiciones de prueba específicas (como el medidor de flujo Hall), que a menudo es similar a la densidad aparente.
Otras densidades derivadas: como la densidad compactada (en el proceso de prensado) o la densidad sinterizada (cuerpos sinterizados).

Las diferentes densidades reflejan las características de las partículas (como el tamaño y la forma) y el comportamiento de apilamiento del polvo, y guían el diseño del proceso.
La densidad real se utiliza para el análisis de la composición del material, la densidad suelta/apisonada afecta la eficiencia del empaque y la densidad aparente está relacionada con la fluidez.

2. Densidad real
definición
La densidad real es la densidad sólida de las partículas de polvo de carburo de tungsteno, excluyendo los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

poros dentro de las partículas o los espacios entre partículas, lo que refleja la relación teórica masa-volumen del material en sí.

En el caso del WC puro, la densidad real está determinada por su estructura cristalina (sistema hexagonal).

Numérico

WC puro: la densidad real es 15,63 g/cm³ (valor teórico, basado en los parámetros reticulares a=2,906 Å, c=2,837 Å).

Polvo compuesto: como el WC-Co, la densidad real se reduce debido a la adición de una fase aglutinante (como la densidad del Co 8,90 g/cm³).

Tipo de polvo	Fase adhesiva (%)	Densidad real (g/cm³)
WC	0	15.63
WC-12Co	Compañía: 12	14.0-14.5
WC-10Co-4Cr	Co: 10, Cr: 4	13.8-14.2
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.		

Método de determinación

Método de desplazamiento de gas (método de gravedad específica del helio):

Principio: llenar los poros de la muestra de polvo con helio y determinar el volumen del sólido.

Equipo: Picnómetro de helio (como Micromeritics AccuPyc).

Procedimiento: Pesar la muestra (5 g), colocarla en una cámara sellada, introducir helio, registrar el volumen de escape y calcular la densidad real.

fórmula:

$$\rho_{true} = \frac{m}{V_{solid}}$$

Donde V sólido es el volumen del sólido.

Precisión: ±0,01 g/cm³ .

solicitud

Verificar la pureza del polvo (por ejemplo, carbono libre < 0,1 % en WC).

Calcular la densidad teórica de materiales compuestos para guiar el diseño de formulaciones.

3. Densidad aparente

definición

La densidad aparente es la densidad del polvo de carburo de tungsteno en un estado apilado naturalmente después de que cae libremente en un recipiente, incluidos los espacios entre las partículas, sin vibración ni compresión.

Numérico

WC puro: 4,2-5,0 g/cm³, cuanto menor sea el tamaño de partícula, menor será la densidad.

Polvo compuesto: como WC-12Co, 4,0-4,5 g/cm³, debido a la menor densidad de la fase de unión.

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Densidad aparente (g/cm³)	Relación de vacíos (%)
WC (ultrafino)	0,5-1	4.2-4.5	71-73
WC (Mediano)	2-5	4.8-5.0	68-69

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Densidad aparente (g/cm³)	Relación de vacíos (%)
WC-12Co	15-45	4.0-4.5	68-71
Fuente de datos: Prueba de laboratorio realizada en 2023, información del sitio web China Tungsten Online. Relación de vacíos = (1 - densidad aparente/densidad real) × 100 %.			

Método de determinación

Norma: ASTM B212 o ISO 3923-1.

Principio: Verter el polvo en el cilindro medidor a través de un embudo para determinar el volumen de acumulación natural.

paso:

El polvo se secó (105°C, 2 h, humedad < 0,1%).

Utilice un embudo (abertura de 5-10 mm) para verter 50 g de polvo en un cilindro medidor de 100 cm³ con una gota de 10-15 cm.

Utilice un raspador para nivelar la superficie, registre el volumen (V) y pese la masa (m).

Cálculo: Densidad aparente = m/V.

Precisión: ±0,01 g/cm³ .

Factores influyentes

Pequeño tamaño de partícula, alta porosidad y baja densidad.

Las partículas irregulares o la humedad (>0,2%) reducen la densidad.

solicitud

Evaluar la eficiencia de la carga inicial y guiar los procesos de prensado y pulverización.

Verifique la consistencia de las características de las partículas entre lotes.

4. Densidad de compactación

definición

La densidad del golpeteo es la densidad del polvo de carburo de tungsteno después de que las partículas se reorganizan a un estado más denso después de la vibración o el golpeteo, y la porosidad es menor que la densidad aparente.

Numérico

WC puro: 5,3-6,2 g/cm³, 10%-20% superior a la densidad aparente.

Polvo compuesto: como WC-12Co, 4,8-5,2 g/cm³.

Tipo de polvo	Tamaño de partícula (μm)	Densidad compactada (g/cm³)	Aumentar(%)
WC (ultrafino)	0,5-1	5.3-5.6	24-26
WC (Mediano)	2-5	5.8-6.2	20-24
WC-12Co	15-45	4.8-5.2	15-20
Probado en laboratorio en 2023. Información de China Tungsten Online. Aumento = (densidad compactada - densidad aparente) / densidad aparente × 100 %.			

Método de determinación

Norma: ASTM B527 o ISO 3953.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Principio: Las partículas de polvo se reorganizan mediante un vibrador y se determina el volumen estable.
paso:
como en el método de relleno suelto y registrar el volumen inicial.
Colocar en un compactador de vibración (amplitud 3 mm, frecuencia 60 Hz) y vibrar 200 veces o hasta que el volumen se estabilice.
el volumen (V') después de la compactación y pesar la masa (m).
Cálculo: Densidad de compactación = m/V ' .
Precisión: ±0,01 g/cm³ .
Factores influyentes
Después de la vibración, las partículas esféricas se disponen estrechamente y tienen una alta densidad.
Si el número de veces de compactación es insuficiente (<100 veces), la densidad será baja, y si es demasiado (>300 veces), no habrá un cambio significativo.
solicitud
Guiar procesos de prensado y sinterización y predecir la densidad.
Optimizar la eficiencia del llenado del silo.

5. Densidad aparente y otras expresiones de densidad

Densidad aparente
Definición: La densidad de un polvo, medida en un dispositivo específico (como un caudalímetro Hall).
Suele ser similar a la densidad aparente, pero está más relacionada con la fluidez.
Valor: polvo WC 4,0-5,0 g/cm³ , polvo WC-Co 4,0-4,5 g/cm³ .
Método de determinación:
Norma: ASTM B212 o ISO 3923-2.
Procedimiento: Recoja 50 g de polvo utilizando un medidor de flujo Hall (apertura de 2,5 mm), registre el volumen y calcule la densidad.
Aplicación: Evaluación del comportamiento del polvo en procesos dinámicos como la alimentación de polvo en spray.
Otras representaciones de densidad
Densidad compactada:
Definición: La densidad de un polvo durante el proceso de compactación, que es cercana a la densidad aparente pero se ve afectada por la presión.
Valor: Polvo WC 6,0-8,0 g/cm³ (después del prensado).
Aplicación: Conformado de carburo.
Densidad sinterizada:
Definición: La densidad de un bloque sólido después de sinterizar el polvo, cercana a la densidad real.
Valor: carburo cementado a base de WC 14,0-15,5 g/cm³ .
Aplicación: Verificación de la calidad de la sinterización.
Densidad aparente:
Definición: La relación aparente entre masa y volumen de un polvo en un recipiente específico, comúnmente utilizado para almacenamiento y transporte.
Valor: Similar a la densidad aparente, 4,0-5,0 g/cm³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Datos experimentales

Tipo de polvo	Densidad real (g/cm³)	Densidad aparente (g/cm³)	Densidad compactada (g/cm³)	Densidad aparente (g/cm³)
WC (1 μm)	15.63	4.55	5.62	4.50
WC (5 μm)	15.63	4.90	6.17	4.85
WC-12Co	14.2	4.24	4.90	4.20

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, la información proviene del sitio web China Tungsten Online.

Resumir

La densidad del polvo de carburo de tungsteno incluye densidad real (15,63 g/cm³, monómero WC), densidad aparente (4,2-5,0 g/cm³), densidad compactada (5,3-6,2 g/cm³), densidad aparente (4,0-5,0 g/cm³) y otras densidades derivadas (como la densidad de compactación y sinterización). Cada densidad se mide mediante un método específico, como el método de desplazamiento de helio (densidad real), el método del cilindro de medición (densidad aparente/compactada), el método de caudal Hall (densidad aparente), que refleja las diferentes características del polvo. En la aplicación, estas densidades guían los procesos de carburo cementado, pulverización térmica y pulvimetalurgia para garantizar la eficiencia de llenado y la calidad del producto (información del sitio web de China Tungsten Online). Optimizar la forma de las partículas y las condiciones de secado puede mejorar la precisión de la medición de la densidad.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

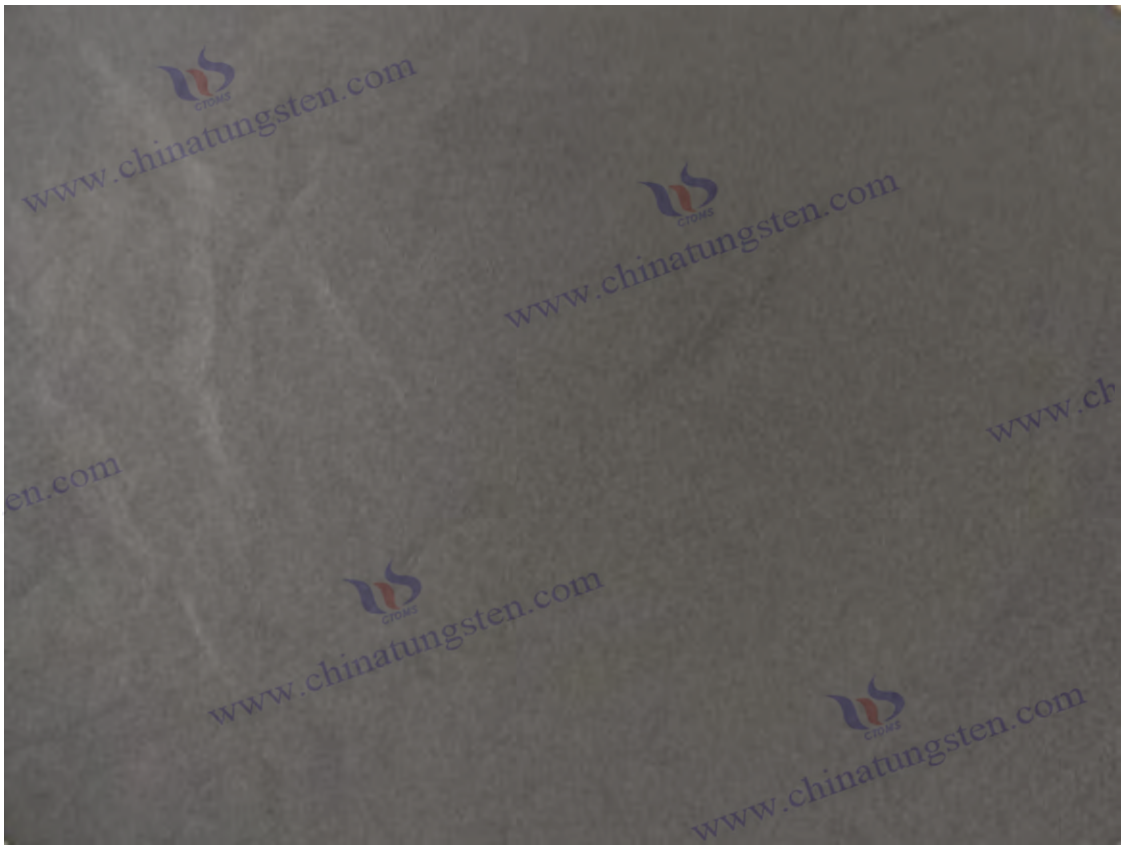
CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 2: Método de preparación de polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es el material básico para el carburo cementado y los recubrimientos resistentes al desgaste. Sus propiedades (como la dureza HV 2000-2500 y el tamaño de grano de 0,1-10 μm) se ven directamente afectadas por el método de preparación. El proceso de preparación ha evolucionado desde la exploración en laboratorio a finales del siglo XIX hasta la producción industrial moderna, y se han formado diversas rutas técnicas. Este capítulo presenta sistemáticamente los principales métodos de preparación del polvo de carburo de tungsteno, incluyendo la carburación tradicional a alta temperatura, la deposición química en fase de vapor (CVD), la aleación mecánica, el método de plasma y tecnologías emergentes como el método térmico con disolventes. Analiza sus principios, parámetros del proceso, características del producto, ventajas y desventajas, y ofrece al lector una perspectiva técnica integral.

2.1 Método de carbonización a alta temperatura de polvo de carburo de tungsteno

El método de carburación a alta temperatura del polvo de carburo de tungsteno es la tecnología más utilizada en la producción industrial. Su historia se remonta al desarrollo de las herramientas de Widia en Alemania a principios del siglo XX. Actualmente, se ha convertido en el proceso fundamental en la industria del carburo cementado. Este método reacciona directamente el polvo de tungsteno con una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

fuente de carbono a alta temperatura para producir polvo de carburo de tungsteno (WC). Gracias a su proceso maduro, alta producción y un coste controlable, representa más del 80 % de la producción mundial de polvo de carburo de tungsteno (ITIA 2023). Esta sección analiza exhaustivamente este método de preparación convencional desde el punto de vista del mecanismo de reacción, el flujo del proceso, la selección de equipos, la optimización de parámetros, las características del producto, la aplicación industrial y las limitaciones técnicas.

2.1.1 Principios básicos de la carbonización a alta temperatura del polvo de carburo de tungsteno

El método de carbonización a alta temperatura se basa en una reacción de difusión en estado sólido. El polvo de tungsteno (W) y una fuente de carbono (como el negro de humo) se combinan químicamente a altas temperaturas (1800-2000 °C) para formar polvo de carburo de tungsteno (WC). La fórmula de reacción principal es:
W + C → WCW + C → WC La reacción es un proceso exotérmico con un cambio de entalpía estándar ΔH = -38,1 kJ/mol (25 °C), pero se requiere calor alto para activar los átomos de carbono para que se difundan en la red de tungsteno. La estructura cúbica centrada en el cuerpo del tungsteno (BCC, a = 3,165 Å) se recombina con átomos de carbono a altas temperaturas para formar WC hexagonal (grupo espacial P6m2, a = 2,906 Å, c = 2,837 Å, JCPDS 51-0939). El análisis XRD muestra que los picos característicos del producto se ubican en 2θ=35,641° (plano cristalino 100) y 48,298° (plano cristalino 101), lo que confirma la formación de WC monofásico.

La reacción debe llevarse a cabo en una atmósfera reductora (como H_2) o inerte (como Ar) para evitar la oxidación del tungsteno a WO_3 (punto de fusión 1473 °C). Las reacciones secundarias incluyen:
2W+C→W_2C2W+C→ W_2C (cuando
el carbono es insuficiente, <6,10 %) WC→W_2C+CWC→ W_2C +C (descomposición >2100 °C).
El control del contenido de carbono es clave; el valor teórico es del 6,13 % (fracción másica), el rango industrial es del 6,10 % al 6,18 % (GB/T 4295-2008), y las desviaciones afectan el estado de la fase y el rendimiento.

2.1.2 Flujo del proceso de carbonización a alta temperatura de polvo de carburo de tungsteno

El método de carburación a alta temperatura para la preparación industrial de polvo de carburo de tungsteno incluye los siguientes pasos, cada uno de los cuales debe controlarse con precisión para garantizar la consistencia del producto:

Selección y preparación de materias primas
Polvo de tungsteno
Pureza > 99,9 %, contenido de oxígeno < 0,03 % (300 ppm), tamaño de partícula FSSS: 1-10 μm (GB/T 25995). La fuente suele ser WO_3 reducido con hidrógeno (como el polvo de tungsteno reducido con APT producido en Zhuzhou, China).
Fuente de carbono

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Negro de carbón de alta pureza (C, pureza > 99,9%, tamaño de partícula < 1 μm , área superficial específica > 10 m^2/g) o polvo de grafito (tamaño de partícula 5-20 μm , menor costo pero ligeramente menos activo).

Relación

La relación molar W:C es 1:1,03-1,05, con un ligero exceso de carbono para compensar la volatilización y las reacciones secundarias (como la formación de W_2C).

mezcla

Utilice un molino de bolas planetario (como Fritsch Pulverisette 6) con una relación de bolas a material de 5:1-10:1, bolas de WC o de acero y una velocidad de rotación de 150-300 rpm durante 2 a 4 horas.

aditivo

0,5%-1% de ácido esteárico (para evitar la aglomeración), la uniformidad de la mezcla se verificó mediante SEM (distribución de partículas RSD < 5%).

ambiente

Atmósfera inerte (Ar) o vacío para evitar la oxidación.

Carga y pretratamiento

El polvo mezclado se cargó en un recipiente de grafito (pureza > 99,95 %, tamaño 50 × 20 × 10 cm) con una densidad de empaquetamiento de 0,5-0,8 g/cm^3.

Precalentar

300-500°C, pasar H_2 (0,2-0,5 L/min) para eliminar la humedad y los volátiles durante 30-60 minutos.

Carbonización a alta temperatura

equipo

Horno tubular (de un solo tubo, diámetro interior 10-20 cm) u horno de empuje continuo (varias naves, producción >100 kg/lote).

temperatura

1800-2000°C, velocidad de calentamiento 5-10°C/min, mantener caliente durante 2-4 horas.

atmósfera

El H_2 (caudal 0,5-1 L/min) reduce el WO_x y el Ar (caudal 0,2-0,5 L/min) evita la combustión excesiva .

monitor

Termopar (tipo W-Re, precisión ±5°C), analizador de gases en línea (detección de CO, CO_2).

Enfriamiento y posprocesamiento

Enfriar naturalmente a <100°C (atmósfera de Ar , 6-8 horas) para evitar grietas causadas por un enfriamiento rápido.

Molienda

Molino de chorro de aire o molino de bolas, ajustado a FSSS 1-5 μm , tamizado (malla 200, eliminar partículas >10 μm).

Limpieza

Si es necesario, lavar con HCl diluido (5%) para eliminar los óxidos de la superficie y secar (80°C, 2 h).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2.1.3 Parámetros del proceso y control de la carburación a alta temperatura del polvo de carburo de tungsteno

Temperatura
Rango: 1800-2000°C.
<1700 °C: La reacción es incompleta y quedan W y W_2C (la XRD detecta el pico de W_2C, 2θ=39,5°).
2100°C: el WC se descompone para producir carbono libre (>6,18%) y W_2C, y la dureza disminuye (HV 1600-2000).
Optimización: 1900°C±20°C, eficiencia de carbonización >98% (verificado por titulación química).

Contenido de carbono
Objetivo: 6,10%-6,18% (GB/T 4295-2008).
Control: La relación agua: cemento inicial es de 1:1,05, teniendo en cuenta la volatilización del carbono (aproximadamente 0,02%-0,05%).
Prueba: método de combustión (GB/T 5124.1), desviación ±0,05%, carbono libre <0,5%.

Una atmósfera
H_2: caudal 0,5-1 L/min, presión 0,1-0,2 MPa, elimina impurezas de oxígeno (O_2 < 10 ppm).
Ar : Pureza > 99,99%, para evitar la precipitación de carbono libre causada por la reducción excesiva de H_2.
Conmutación: >1500 °C se puede conmutar a Ar para reducir el consumo de energía.

Tiempo de aislamiento
Autonomía: 2-4 horas.
<2 horas: tasa de carbonización <95%, W residual (pico de W detectado por XRD, 2θ=40,3°).
4 horas: Los granos crecen (>10 μm , observación SEM) y la dureza disminuye.
Optimización: 3 horas ± 15 minutos, la uniformidad del grano es la mejor (RSD < 10%).

Tasa de calentamiento
5-10 °C/min. Una temperatura demasiado rápida (>15 °C/min) provocará un gradiente de temperatura en el recipiente (>50 °C) y un producto irregular.

2.1.4 Equipos e industrialización de la carbonización a alta temperatura de polvo de carburo de tungsteno

Tipo de dispositivo
Horno tubular: lote único de 10 a 50 kg, adecuado para escalas pequeñas y medianas (como laboratorios o pequeñas fábricas).
Ejemplo: Una fábrica en Changsha, China, utiliza un horno tubular con un diámetro interior de 15 cm y produce 30 kg por día.
Horno de empuje: producción continua, horno único >100 kg/lote, opción industrial convencional.

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

Ejemplo: La fábrica de carburo cementado de Zhuzhou utiliza un horno de empuje de 10 naves con una producción anual de 10.000 toneladas.
Componentes clave: nave de grafito (resistencia a la temperatura >2200°C), termopar W-Re, elemento calefactor de SiC .

Consumo y eficiencia energética
Consumo de energía: alrededor de 5000-6000 kWh por tonelada de polvo de carburo de tungsteno (incluyendo calefacción y aislamiento).
Eficiencia: El ciclo de un solo horno es de 12 a 16 horas (incluido el enfriamiento) y el horno de empuje alcanza una tasa de utilización del equipo del 90%.

Una automatización
Los equipos modernos están equipados con control PLC (Siemens S7-300) para monitorear la temperatura, la atmósfera y la composición de los gases de escape (CO < 0,1%) en tiempo real.

2.1.5 Características del producto del método de carbonización a alta temperatura de polvo de carburo de tungsteno

Composición química
Carbono total: 6,10%-6,18% (método de combustión, GB/T 5124.1).
Carbono libre: <0,5% (método de titulación, GB/T 5124.2).
Impurezas: Fe<0,05%, O<0,02% (ICP-OES, GB/T 5124.4).

Propiedades físicas
Tamaño de grano: 1-5 μm (FSSS, GB/T 25995), ajustable a 0,5-10 μm (verificación SEM).
Densidad aparente: 12,0-14,0 g/cm³ (volumétro Scott, GB/T 5314).
Morfología: Partículas poliédricas con bordes afilados y rugosidad superficial Ra 0,1-0,5 μm (medida por AFM).
Superficie específica: 0,5-2 m²/g (método BET), aumenta con la disminución del tamaño de partícula.

Microestructura
WC monofásico (XRD, pico más fuerte en 2θ=35,641°), sin W_2C ni picos de carbono libre.
Los límites de grano son claros y hay pocos defectos (observación TEM, franja reticular d = 2,518 Å).

Actuaci ó n
Dureza: HV 2000-2200 (ASTM E384, carga 1 kg).
Resistencia a la compresión: >4000 MPa después de la sinterización (WC-Co, Co 10%).

2.1.6 Aplicación industrial y casos de carbonización a alta temperatura de polvo de carburo de tungsteno

Herramientas de carburo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Planta de carburo cementado de Zhuzhou, China: Producción anual de 12.000 toneladas de polvo de carburo de tungsteno (2023), FSSS 2-5 μm , para herramientas de torneado y fresas (dureza HV 1500-1800, vida útil >500 minutos).
Sandvik, Suecia: utilice polvo WC de 1-3 μm para preparar herramientas CNC con una velocidad de corte de >200 m/min.

Piezas resistentes al desgaste
Kennametal, EE. UU.: El polvo WC de 5-10 μm se utiliza para fabricar brocas para minería, con una resistencia al impacto >25 J/cm² y una vida útil tres veces más prolongada.
Una mina en Luoyang, China: el polvo WC se utiliza en herramientas de perforación de roca y su resistencia al desgaste es mejor que la del acero de alta velocidad (tasa de desgaste <0,01 $mm^3 / N \cdot m$).

Normas internacionales
GB/T 4295-2008: Desviación de carbono total ±0,05%, carbono libre <0,5%.
ISO 4499-2:2020: Requisitos de uniformidad del tamaño de grano (RSD < 10%).

2.1.7 Ventajas, desventajas y direcciones de mejora de la carbonización a alta temperatura del polvo de carburo de tungsteno

Ventaja
Tecnología madura: 100 años de historia, tecnología estable y aplicable globalmente.
Gran producción: horno individual > 100 kg, lo que satisface la demanda industrial (por ejemplo, China representa el 50% de la producción mundial, unas 30.000 toneladas/año).
Bajo costo: 50-80 yuanes/kg (China Tungsten Online 2023), que es más económico que el método CVD (500-1000 yuanes/kg).
Calidad controlable: cumplimiento de los estándares de carburo (HV 1500-2200).

Deficiencia
Alto consumo de energía: 5000-6000 kWh/tonelada, emisiones de carbono de aproximadamente 2-3 toneladas de CO_2/tonelada (principalmente calefacción eléctrica).
Granos gruesos: >1 μm , lo que dificulta la preparación de WC a escala nanométrica (<100 nm), lo que limita las aplicaciones de alta gama.
Variabilidad del lote: El gradiente de temperatura entre barcos (±20°C) resultó en una amplia distribución del tamaño de partículas (Span>1,5).

Dirección de mejora
Carbonización a baja temperatura: Añadiendo catalizador (como Ni, 0,1%-0,5%), reduciendo la temperatura a 1500-1600 °C, ahorrando un 20% de energía (en investigación).
Refinamiento de grano: polvo de tungsteno inicial <1 μm , acortar el tiempo de retención (<2 horas), objetivo <0,5 μm .
Ecologización: reciclar el H_2 del gas de cola, reducir el uso de negro de carbono y disminuir la huella de

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

carbono.

2.1.8 Estado industrial y perspectivas de la carbonización a alta temperatura del polvo de carburo de tungsteno

Situación mundial
China: la producción anual es de 30.000 toneladas, lo que representa el 50% de la mundial (China Tungsten Online 2023), siendo Hunan y Jiangxi las principales zonas de producción.
Europa y América: Kennametal de Estados Unidos y Ceratizit de Alemania producen alrededor de 5.000 toneladas/año, centrándose en la calidad (pureza > 99,95%).

Tendencias tecnológicas
Automatización: Sensores integrados en el horno de empuje (monitoreo de O_2, CO) para mejorar la consistencia.
Ahorro de energía: El horno de resistencia se actualizó a un horno de inducción y el consumo de energía se redujo a 4000 kWh/tonelada (en etapa piloto).
Nanoprocesamiento: Combinado con molienda mecánica posterior, desarrolla polvo WC <0,5 μm para satisfacer las necesidades de la impresión 3D.
Como piedra angular de la producción de polvo de carburo de tungsteno, el método de carburación a alta temperatura continuará optimizándose en términos de eficiencia, protección ambiental y refinamiento en el futuro.

2.2 Deposición química de vapor (CVD) de polvo de carburo de tungsteno

2.2.1 Principios básicos del método CVD de polvo de carburo de tungsteno

La deposición química en fase de vapor (CVD) genera directamente polvo de carburo de tungsteno mediante una reacción en fase gaseosa. La reacción típica es: $WCl_6 + CH_4 + H_2 \rightarrow WC + 6HCl$ (900-1100 °C). El precursor gaseoso se descompone a alta temperatura, y los átomos de carbono y tungsteno se depositan para formar cristales de WC, adecuados para la preparación de polvos a escala nanométrica.

2.2.2 Flujo de proceso del método CVD de polvo de carburo de tungsteno
Gasificación de la materia prima: se calienta y gasifica WCl_6 (punto de ebullición 347 °C) y se mezclan CH_4 y H_2 en proporción.
Reacción: Se introduce gas en la cámara de reacción (tubo de cuarzo, 900-1100°C, presión 10-100 Pa) para depositar y generar WC.
Recolección: El producto se recoge a través de un condensador y el gas de cola (HCl) se neutraliza con solución alcalina.
Postratamiento: Moler ligeramente y tamizar hasta obtener el tamaño de partícula deseado (<100 nm).

2.2.3 Parámetros del proceso de CVD de polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Temperatura: 900-1100 °C. Si la temperatura es demasiado alta, se generará W_2C. Si la temperatura es demasiado baja, la reacción será incompleta.
Presión: 10-100 Pa, la baja presión favorece la formación de nanopartículas.
Relación de gases: CH_4 : WCl_6 = 1 : 1-1,5:1, H_2 en exceso (10-20 veces) para reducir WCl_6 .

2.2.4 Características del producto del método CVD de polvo de carburo de tungsteno

Tamaño de grano: 20-100 nm (medición TEM).
Pureza: >99,95%, contenido de oxígeno <50 ppm.
Morfología: Casi esférica, superficie específica 20-50 m^2/g (método BET).

2.2.5 Ventajas y desventajas del método CVD de polvo de carburo de tungsteno

Ventajas: tamaño de partícula pequeño, alta pureza, adecuado para aplicaciones de alta precisión.
Desventajas: equipo complejo (sistema de vacío), bajo rendimiento (nivel de kg/lote), alto costo (alrededor de 500-1000 yuanes/kg).

2.2.6 Aplicación del método CVD de polvo de carburo de tungsteno

Se utiliza para recubrimientos de aviación y portadores de catalizadores. Por ejemplo, GE en Estados Unidos utiliza el método CVD para preparar recubrimientos de WC (dureza HV 2600) con una resistencia a la temperatura de >1200 °C.

2.3 Aleación mecánica de polvo de carburo de tungsteno

2.3.1 Principios básicos de la aleación mecánica del polvo de carburo de tungsteno

La aleación mecánica (MA) utiliza molienda de bolas de alta energía para que el polvo de tungsteno y el polvo de carbono reaccionen en estado sólido y formen WC. La energía mecánica induce la difusión atómica y la reconstrucción reticular, y la fórmula de reacción es la misma que la de la carburación a alta temperatura (W + C → WC).

2.3.2 Flujo del proceso de aleación mecánica de polvo de carburo de tungsteno

Mezcla de materia prima: El polvo de tungsteno (1-5 μm) y el negro de humo (<1 μm) se mezclan en una proporción molar de 1:1,05.
Molienda de bolas: Colocar en un molino de bolas de alta energía (planetario, relación bolas-material 10:1, velocidad de rotación 300-500 rpm), moler durante 20-50 horas, en atmósfera inerte (Ar).
Postprocesamiento: Cribado para eliminar partículas grandes, tamaño de partícula del producto <100 nm.

2.3.3 Parámetros del proceso de aleación mecánica de polvo de carburo de tungsteno

Velocidad de rotación: 300-500 rpm. Una velocidad demasiado baja provocará una reacción incompleta,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

mientras que una velocidad demasiado alta introducirá impurezas (como Fe).
Tiempo de molienda: 20-50 horas, detección por XRD de la formación de la fase WC.
Relación bola-material: 10:1-15:1, las bolas WC se utilizan comúnmente para evitar la contaminación.

2.3.4 Características del producto del método de aleación mecánica de polvo de carburo de tungsteno

Tamaño de grano: 50-100 nm (TEM).
Pureza: >99%, impureza de Fe <0,1% (ICP-OES).
Morfología: partículas irregulares con muchos defectos en los límites de grano.

2.3.5 Ventajas y desventajas de la aleación mecánica del polvo de carburo de tungsteno

Ventajas: baja temperatura (<100°C), bajo consumo energético, adecuado para nano WC.
Desventajas: Riesgo de introducción de impurezas y largo ciclo de producción (horas).

2.3.6 Aplicación del método de aleación mecánica de polvo de carburo de tungsteno

Para carburo cementado ultrafino, como microperforación de PCB (grano <0,5 μm , dureza HV 2200).

2.4 Método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

2.4.1 Principios básicos del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

El método de plasma utiliza plasma de alta temperatura (>5000 °C) para que el polvo de tungsteno y la fuente de carbono reaccionen instantáneamente y generen WC. El plasma caliente proporciona una alta densidad energética y promueve la reacción en fase gaseosa o líquida.

2.4.2 Flujo de proceso del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

Suministro de materia prima: El polvo de tungsteno y CH_4 se introducen en la pistola de plasma a través del gas portador (Ar).
Reacción: El plasma (potencia 10-50 kW, temperatura 5000-10000°C) descompone el CH_4 y el tungsteno se funde y reacciona con el carbono.
Enfriamiento: El producto se enfrió rápidamente en una cámara de condensación (10^6 °C/s) y se recogió el polvo.

2.4.3 Parámetros del proceso del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

Potencia: 10-50 kW, afecta al tamaño de las partículas.
Caudal de gas: Ar 20-50 L/min, CH_4 1-5 L/min.
Velocidad de enfriamiento: >10^5 °C/s para evitar el crecimiento del grano.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2.4.4 Características del producto del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

Tamaño de grano: 50-200 nm.
Pureza: >99,9%, contenido de oxígeno <100 ppm.
Aspecto: Partículas esféricas, buena fluidez (>20 s/50g).

2.4.5 Ventajas y desventajas del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

Ventajas: partículas pequeñas y esféricas, adecuadas para pulverizar.
Desventajas: Equipos costosos (millones de dólares) y alto consumo energético.

2.4.6 Aplicación del método de plasma de polvo de carburo de tungsteno

Se utiliza para recubrimientos en aerosol HVOF, como el polvo WC producido por la sueca Sandvik (dureza HV 1200-1400).

2.5 Método solvotérmico del polvo de carburo de tungsteno

2.5.1 Principios básicos del método solvotérmico del polvo de carburo de tungsteno

El método solvotérmico sintetiza WC a baja temperatura (<300 °C) mediante una reacción en fase líquida, utilizando disolvente a alta presión y la descomposición de una fuente de carbono orgánico en autoclave.
Por ejemplo: $WO_3 + C_6H_{12}O_6 \rightarrow WC + CO_2 + H_2O$.

2.5.2 Flujo de proceso del método térmico por solvente de polvo de carburo de tungsteno

Preparación de la materia prima: WO_3 y glucosa ($C_6H_{12}O_6$) se disuelven en agua con una relación molar de 1:2.
Reacción: La solución se coloca en un autoclave a 200-300°C y una presión de 10-20 MPa durante 12-24 horas.
Postratamiento: filtración, lavado (agua desionizada), secado (80°C) y molienda a <100 nm.

2.5.3 Parámetros del proceso del método solvotérmico de polvo de carburo de tungsteno

Temperatura: 200-300°C, la reacción es incompleta por debajo de 200°C.
Presión: 10-20 MPa, afecta la eficiencia de carbonización.
Tiempo: 12-24 horas, XRD detecta la fase WC.

2.5.4 Características del producto de polvo de carburo de tungsteno por método solvotérmico

Tamaño de grano: 20-50 nm.
Pureza: >99%, contenido de oxígeno <200 ppm.
Morfología: Casi esférica, con menor aglomeración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2.5.5 Ventajas y desventajas del método solvotérmico para el polvo de carburo de tungsteno

Ventajas: baja temperatura y ahorro de energía, tamaño de partícula pequeño, respetuoso con el medio ambiente.

Desventajas: bajo rendimiento (grado g/lote), el proceso aún no está maduro.

2.5.6 Aplicación del método solvotérmico para polvo de carburo de tungsteno

Fase de investigación, para uso en electrodos de pilas de combustible (superficie específica > 50 m^2/g).

Referencias

GB/T 4295-2008, *Polvo de carburo de tungsteno* , Administración Nacional de Normalización de China, 2008.

Se especifican los requisitos técnicos y los métodos de prueba del polvo de carburo de tungsteno, que son aplicables al control de calidad del producto de procesos como la carburación a alta temperatura.

GB/T 5124.1-2008, Métodos para el análisis químico de carburo cementado - Parte 1: Determinación del contenido total de carbono , Administración Nacional de Normalización de China, 2008.

El método de combustión se especifica para determinar el contenido total de carbono en el carburo cementado y se utiliza para verificar la composición del polvo de carburo de tungsteno.

GB/T 5124.2-2008, Métodos para el análisis químico de carburo cementado - Parte 2: Determinación del contenido de carbono libre , Administración Nacional de Normalización de China, 2008.

El método de titulación por disolución ácida se especifica para determinar el carbono libre y se utiliza para evaluar la pureza del producto producido por el método de carbonización a alta temperatura.

Carburo - Parte 4: Determinación de elementos de impureza, Administración Nacional de Normalización de China, 2008.

El método ICP-OES está especificado para determinar impurezas como Fe y se utiliza para el análisis de calidad de métodos de carburación a alta temperatura y aleación mecánica.

GB/T 5314-2011, Polvos *para carburo cementado* , Administración Nacional de Normalización de China, 2011.

Especifica los requisitos técnicos y las pruebas de propiedades físicas para polvos de carburo cementado, aplicables a una variedad de métodos de preparación.

GB/T 25995-2010, Polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno: determinación del *tamaño de partícula del tamiz de subtamiz Fisher (FSSS)* , Administración Nacional de Normalización de China, 2010.

El método de determinación del analizador de tamaño de partículas Fisher está especificado para el control del tamaño de partículas en procesos como la carbonización a alta temperatura.

Zhang Lide, Nanomateriales y nanoestructuras , Science Press, 2002.

Introducir la tecnología de preparación de nanomateriales, incluidos los principios básicos de CVD y aleación mecánica.

de la industria del tungsteno en China, Metallurgical Industry Press, 1998.

Registra el proceso de industrialización del polvo de carburo de tungsteno en China, involucrando casos de aplicación del método de carburación a alta temperatura.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Lassner, E., y Schubert, WD (1999). *Tungsteno: Propiedades, química, tecnología del elemento, aleaciones y compuestos químicos* . Springer.
Introducción completa a las propiedades y la tecnología de preparación del tungsteno y sus compuestos, abarcando la carburación a alta temperatura, CVD y otros métodos.
Upadhyaya, GS (1998). *Carburos de tungsteno cementados: Producción, propiedades y ensayos* . Editorial William Andrew.
Se describe en detalle la producción industrial y las pruebas de rendimiento del polvo de carburo de tungsteno, con énfasis en la carburación a alta temperatura y la aleación mecánica.
German, RM (1994). *Ciencia de la Metalurgia de Polvos* . Federación de Industrias de Polvos Metálicos.
Una introducción sistemática a la tecnología de la pulvimetalurgia, incluida la teoría y la práctica de la aleación mecánica y los métodos de plasma.
Asociación Internacional de la Industria del Tungsteno (ITIA) (2023). "Estadísticas del Tungsteno 2023", *Informe Anual de la ITIA* .
Proporciona datos de producción global de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno, lo que refleja la posición dominante del método de carburación a alta temperatura.
ASTM E384-17 (2017). *Método de ensayo estándar para la dureza de materiales por microindentación* . ASTM International.
Especifica el método de prueba de microdureza utilizado para evaluar las propiedades del polvo de carburo de tungsteno después de la sinterización.
ISO 4499-2:2020 (2020). *Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura — Parte 2: Medición del tamaño de grano de acero al carbono* . Organización Internacional de Normalización.
Especifica un método para la determinación microscópica del tamaño de grano de WC adecuado para el control de calidad de productos de carbonización a alta temperatura.
Benjamin, JS (1970). "Superaleaciones reforzadas por dispersión mediante aleación mecánica", *Metallurgical Transactions* , vol. 1, págs. 2943-2951.
Se propuso por primera vez la tecnología de aleación mecánica, sentando las bases para su uso en la preparación de polvo de carburo de tungsteno.
Suryanarayana, C. (2001). "Aleación mecánica y fresado", *Progress in Materials Science* , vol. 46, págs. 1-184.
Se revisan los parámetros del proceso y las aplicaciones de la aleación mecánica, que involucran el nanodimensionamiento del polvo de carburo de tungsteno.
Asociación Japonesa de Normas (2005). JIS H 7803:2005, Métodos de ensayo para polvo de carburo de tungsteno. Asociación Japonesa de Normas.
Los métodos de prueba químicos y físicos del polvo de carburo de tungsteno pueden referirse al análisis del producto del método de carburación a alta temperatura.
ГОСТ 25599.1-83 (1983). "Polvo de carburo cementado - Método para la determinación del contenido de carbono", Comité Estatal de Normas de la URSS.
La norma soviética especifica el método de análisis químico del contenido de carbono del polvo de carburo cementado, aplicable al método de carburación a alta temperatura.
DIN EN ISO 4499-2:2020 (2020). Carburo cementado – Determinación metalúrgica de la microestructura – Parte 2: Medición del tamaño de grano de acero al carbono. Instituto Alemán de

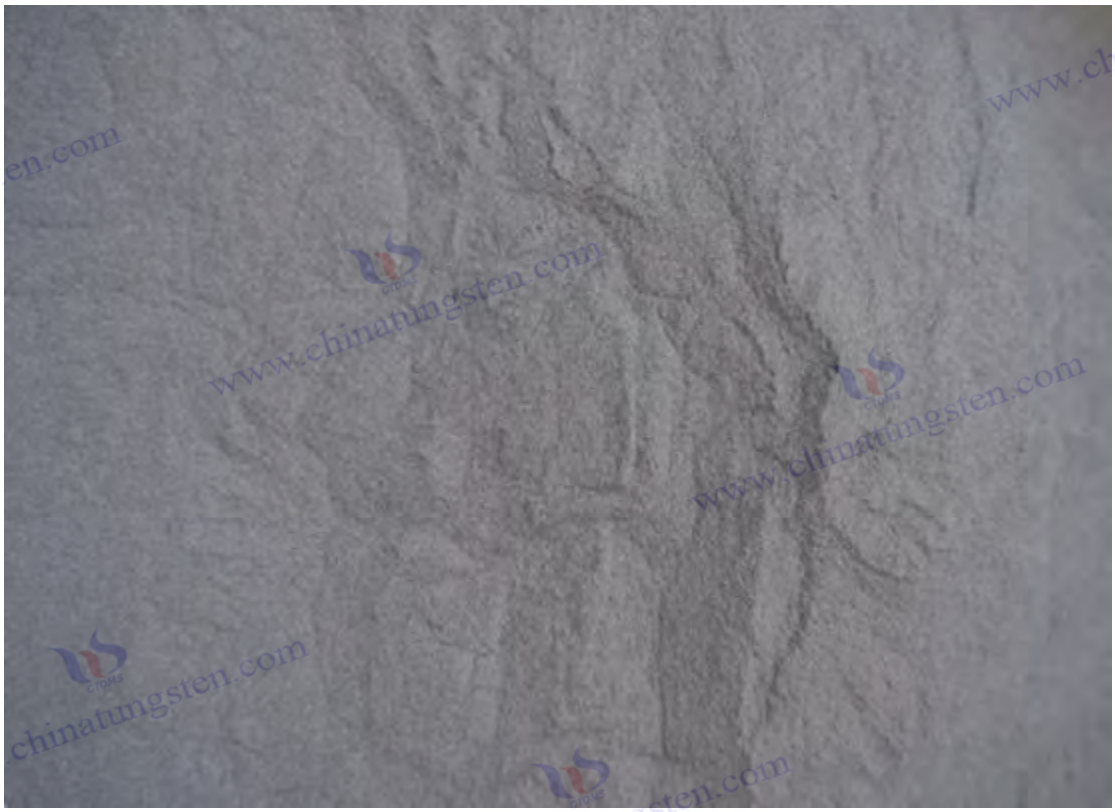
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Normalización.

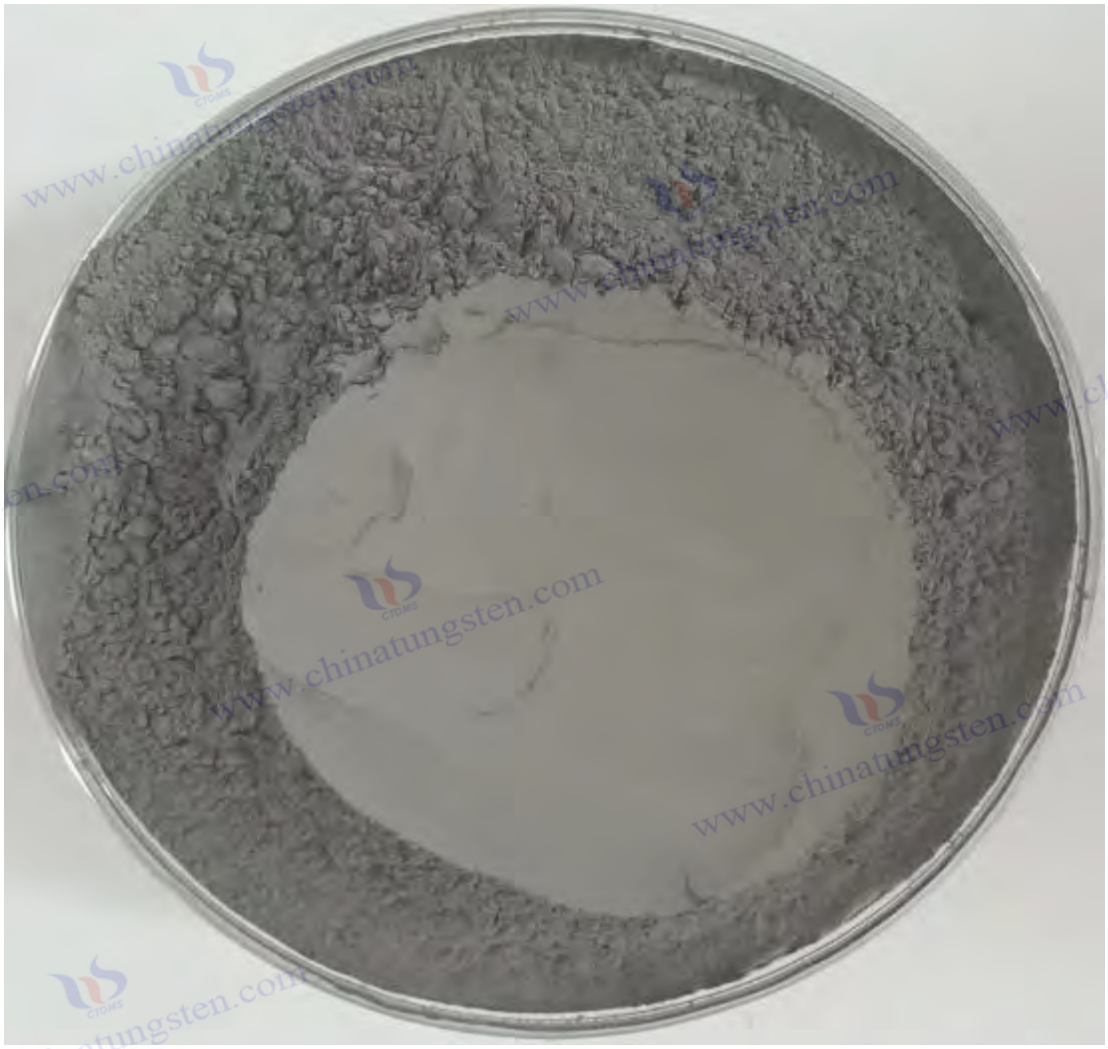
Versión alemana de la norma ISO, consistente con la norma ISO 4499-2, para el análisis de granos de carburación a alta temperatura.

KS D 9502:2015 (2015). Determinación de la distribución del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno. Asociación Coreana de Normas.

La norma coreana especifica el método de prueba para la distribución del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno, que se puede utilizar para productos con el método de carburación a alta temperatura.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 3: Microestructura y tecnología de caracterización del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es la base del carburo cementado, los recubrimientos resistentes al desgaste y los materiales para herramientas de alto rendimiento. Su microestructura y rendimiento determinan conjuntamente la calidad del producto final. Desde la disposición de los cristales a nivel atómico hasta la distribución morfológica de las partículas, desde el control preciso de la composición química hasta la evaluación exhaustiva de las propiedades físicas y mecánicas, las características del polvo de carburo de tungsteno son tanto el producto del proceso de preparación como la piedra angular del efecto de la aplicación. Por ejemplo, las herramientas de WC con una dureza de hasta HV 2000-2500 pueden permanecer afiladas durante el corte a alta velocidad, y los recubrimientos de WC con excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,01 mm^3 / N · m) pueden prolongar su vida útil en entornos hostiles, todo lo cual se debe a la singularidad de su microestructura. Este capítulo tiene como objetivo introducir sistemáticamente las características microestructurales y las técnicas de caracterización del polvo de carburo de tungsteno a través de ricas discusiones en lenguaje natural, combinadas con datos científicos y prácticas industriales, cubriendo difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

barrido (SEM), análisis químico y métodos de prueba de rendimiento, revelando cómo estas características pasan del laboratorio a la línea de producción y brindando una guía integral para la investigación, el desarrollo y la aplicación de la industria del carburo cementado.

3.1 Características de la microestructura del polvo de carburo de tungsteno

La microestructura del polvo de carburo de tungsteno es la base intrínseca de su rendimiento, abarcando la estructura cristalina, el tamaño de grano, la morfología de las partículas y las características de los defectos. Estas características no solo reflejan las diferencias en los procesos de preparación (como los granos gruesos del método de carburación a alta temperatura o la estructura a nanoescala del método de CVD), sino que también desempeñan un papel fundamental en los procesos de sinterización, prensado o pulverización.

3.1.1 Estructura cristalina

El núcleo del polvo de carburo de tungsteno reside en su estructura cristalina hexagonal (grupo espacial P6m², a = 2,906 Å, c = 2,837 Å, JCPDS 51-0939). Esta estrecha disposición atómica le confiere una excelente dureza y estabilidad química. Los átomos de tungsteno y carbono se apilan alternativamente, y cada átomo de tungsteno está rodeado por seis átomos de carbono para formar una red hexagonal compacta y estable. El análisis de difracción por difracción de rayos X (DRX) muestra que los picos de difracción característicos del carburo de tungsteno (WC) se ubican en 2θ = 35,641° (plano cristalino 100) y 48,298° (plano cristalino 101). Estas posiciones de pico son la clave para evaluar la pureza del polvo. Sin embargo, el WC monofásico ideal no siempre está disponible en la producción real. Si el contenido de carbono es insuficiente (<6,10%), se generará una fase W_2C (2θ=39,5°), con baja dureza (HV aprox. 1800); si el contenido de carbono es excesivo (>6,18%), se precipitará carbono libre (2θ=26,6°), lo que reducirá la resistencia de sinterización. Este sutil cambio nos recuerda la importancia crucial de la proporción de la fuente de carbono y el control de la atmósfera durante el proceso de preparación.

3.1.2 Tamaño y distribución del grano

El tamaño de grano es una variable clave en la microestructura y afecta directamente las propiedades mecánicas del polvo de carburo de tungsteno. En la industria, el tamaño de grano varía de nanómetros (<100 nm) a micrómetros (1-10 μm), con una especificación común de 1-5 μm . El método de carburación a alta temperatura es fácil de generar granos mayores de 5 μm debido a la reacción a alta temperatura a largo plazo (1800-2000 °C), mientras que la aleación mecánica o el método de plasma se pueden controlar por debajo de 100 nm a través de un alto aporte de energía y un enfriamiento rápido. La uniformidad de la distribución del grano se mide por el valor Span ((D90-D10)/D50), y el polvo de alta calidad requiere <1,5 y RSD <10% (ISO 4499-2:2020). Los granos finos (<1 μm) mejoran la dureza (HV >2200) y la resistencia al desgaste, mientras que los granos gruesos (>5 μm) mejoran la resistencia al impacto (>25 J/cm²). Este equilibrio entre tamaño y rendimiento es el arte del diseño industrial.

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

3.1.3 Morfología de partículas

La morfología de las partículas es la apariencia externa del polvo de carburo de tungsteno, que afecta la fluidez (>20 s/50 g) y el comportamiento de sinterización. El WC producido mediante el método de carbonización a alta temperatura es mayoritariamente poliédrico, con bordes afilados y una rugosidad superficial de Ra 0,1-0,5 μm (medición AFM); el método de plasma o CVD genera partículas casi esféricas con una superficie específica de hasta 20-50 m^2/g (método BET) y una mejor fluidez. El WC a nanoescala es fácil de aglomerar gracias a su alta energía superficial, y la aglomeración dura debe ser <5 % (observación SEM); de lo contrario, es fácil que se produzcan defectos durante el prensado. La diversidad de morfología ofrece opciones para diferentes aplicaciones; por ejemplo, el WC esférico es más adecuado para la pulverización, mientras que el WC poliédrico favorece la unión por sinterización.

3.1.4 Defectos e impurezas

La microestructura no es perfecta, y los defectos e impurezas en los límites de grano son factores que no se pueden ignorar. El TEM muestra que la densidad de dislocación de los límites de grano de WC suele ser $<10^6/cm^2$. Un valor demasiado alto ($>10^7/cm^2$) reducirá la resistencia de sinterización (<4000 MPa). Las impurezas como Fe (<0,05%), Mo (<0,01%) y O (<0,02%) son trazas, pero afectan el rendimiento: el hierro proviene de la contaminación del molino de bolas y el oxígeno proviene de la oxidación. Ambos pueden generar fases frágiles (como Fe_3C) u óxidos (WO_3) a altas temperaturas, lo que debilita la tenacidad ($K_IC < 10\ MPa \cdot m^{1/2}$). Controlar los defectos y las impurezas es la clave para mejorar la calidad del polvo.

3.2 Método de caracterización del polvo de carburo de tungsteno

La tecnología de caracterización es la clave para explorar la microestructura del polvo de carburo de tungsteno, proporcionando una perspectiva analítica multidimensional que abarca desde la estructura cristalina hasta la morfología superficial. Estos métodos promueven la comprensión básica de la investigación científica y garantizan la consistencia de la calidad en la industria.

3.2.1 Difracción de rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) utiliza la difracción de rayos X y redes para revelar el estado de fase y los parámetros cristalinos del polvo de carburo de tungsteno. Equipos como el Bruker D8 Advance utilizan radiación Cu Kα (λ=1,5406 Å), escanean 2θ=20°-80°, con pasos de 0,02° y velocidades de 2°/min. El volumen de muestra es de tan solo 0,5-1 g y se puede analizar tras el aplanamiento. Los resultados muestran que el pico principal de WC es 2θ=35,641°. Si aparece W_2C (39,5°) o W (40,3°), indica carbonización incompleta y la precisión del contenido de fase es de ±0,5 %. La DRX es no destructiva y eficiente, pero el tamaño de nanograno debe estimarse en combinación con la fórmula de Scherrer (error de ±10 nm).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3.2.2 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

El SEM utiliza un barrido por haz de electrones para presentar la morfología de las partículas y la distribución del tamaño del polvo de carburo de tungsteno. Equipo ZEISS Sigma 300, voltaje de 5-15 kV, aumento de 100-50000×, resolución de 1 nm. La muestra debe estar dorada (10 nm) y el grado de vacío es $<10^{-5}$ Pa. La imagen muestra un tamaño de grano de 0,1-10 μm , una uniformidad de desviación estándar (DER) <10 % y permite identificar la aglomeración. El SEM es intuitivo, pero se limita a la superficie y debe complementarse con otros métodos.

3.2.3 Microscopía electrónica de transmisión (MET)

La TEM profundiza a nivel atómico para analizar la red y los defectos. En el equipo FEI Tecnai G2 F20 (200 kV), la muestra se dispersa ultrasónicamente en etanol (50 W, 5 minutos) y se aplica mediante una capa de gotas sobre una malla de cobre, con una resolución de 0,24 nm. Los resultados muestran franjas de red de WC (d = 2,518 Å) y una densidad de dislocaciones $<10^6/cm^2$, lo que indica una alta calidad. Si bien la TEM es precisa, la preparación de la muestra es compleja y se utiliza principalmente en investigación científica.

3.2.4 Microscopía de fuerza atómica (AFM)

El AFM mide la rugosidad superficial del polvo de carburo de tungsteno mediante el escaneo con una sonda. Con el equipo Bruker Dimension Icon, la sonda de silicio y el escaneo de 10×10 μm , el resultado es una Ra de 0,1-0,5 μm , lo cual coincide con el área superficial específica del método BET (desviación <5%). El AFM es adecuado para el análisis de superficies de nanocristales de carburo de tungsteno (WC), pero su representatividad se limita a áreas pequeñas.

3.3 Análisis de la composición química del polvo de carburo de tungsteno

La composición química es fundamental para la calidad del polvo de carburo de tungsteno, lo que influye en su estabilidad y rendimiento. El método de análisis debe considerar tanto la precisión como la practicidad.

3.3.1 Análisis de carbono total y carbono libre

El contenido total de carbono se determina mediante el método de absorción infrarroja por combustión de alta frecuencia (GB/T 5124.1-2008). El equipo LECO CS-844 se opera con un flujo de oxígeno de 1350 °C (2-3 L/min), con una precisión de ±0,01 %, y el resultado debe estar entre el 6,10 % y el 6,18 %. El carbono libre se determina mediante el método de titulación por disolución ácida (GB/T 5124.2-2008), disolviendo H_2SO_4 - HNO_3 (1:1) durante 30 minutos, con una precisión de ±0,005 % y <0,5 %. La desviación del contenido de carbono afecta directamente el estado de la fase y la dureza.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

3.3.2 Análisis de elementos de impurezas

Se utilizó el método ICP-OES (GB/T 5124.4-2008) para determinar impurezas como Fe y Mo. Se utilizó el equipo PerkinElmer Optima 8300 para disolver la muestra en HNO_3 + HCl. Los resultados mostraron Fe < 0,05 %, Mo < 0,01 % y un límite de detección del 0,001 %. El control de impurezas debe comenzar con las materias primas y los procesos.

3.3.3 Análisis del contenido de oxígeno

El contenido de oxígeno se determina mediante el método de fusión con gas inerte (ASTM E1019-18). El equipo LECO ONH836 opera con helio a 1900 °C, con una temperatura de condensación (CC) micrométrica <100 ppm y una temperatura de condensación (CC) nanométrica <200 ppm. El exceso de oxígeno reduce la densidad de sinterización.

3.4 Prueba de propiedades físicas del polvo de carburo de tungsteno

Las pruebas de propiedades físicas evalúan las características de procesamiento y aplicación y son el puente entre lo micro y lo macro.

3.4.1 Tamaño y distribución de partículas

El método de difracción láser (GB/T 19077-2016) utiliza un Malvern Mastersizer 3000, con un índice de refracción de 2,5, una opacidad del 10 % al 20 %, D50 = 1-5 μm y una amplitud de corte <1,5. El medidor de tamaño de partícula Fisher (GB/T 25995-2010) mide de 0,5 a 10 μm y una repetibilidad <3 %. El tamaño de partícula determina el equilibrio entre la dureza y la resistencia al impacto.

3.4.2 Densidad aparente y fluidez

La densidad aparente se mide con un medidor volumétrico Scott (GB/T 5314-2011), 12,0-14,0 g/cm^3, RSD < 2 %. La fluidez se mide con un medidor de flujo Hall (ASTM B213-20), > 20 s/50 g. La alta densidad y fluidez garantizan la consistencia del moldeo.

3.4.3 Superficie específica

Método BET (ISO 9277:2010) con Micromeritics ASAP 2020, desgasificación a 200 °C, tamaño micrométrico de 0,5-2 m^2/g, tamaño nanométrico de 20-50 m^2/g. La alta superficie específica mejora la sinterización.

3.5 Propiedades mecánicas y aplicaciones industriales del polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Las propiedades mecánicas reflejan el valor de aplicación del polvo de carburo de tungsteno y deben verificarse mediante pruebas estándar.

3.5.1 Dureza

Prueba de dureza Vickers (ASTM E384-17), carga 1 kg, 15 s, resultado HV 2000-2500, desviación < 50. La alta dureza proviene de granos finos y estructura monofásica.

3.5.2 Resistencia al desgaste

Prueba de rueda de caucho en arena seca (ASTM G65-16), arena de malla 50-70, carga 130 N, tasa de desgaste < 0,01 mm^3 / N · m, mejor que Cr_3C_2 .

3.5.3 Resistencia a la compresión

Ensayo de compresión uniaxial (ISO 3327:2009), equipo Instron 5985, >4000 MPa (WC-Co, Co 10%), deformación por fractura <1%.

3.5.4 Casos de aplicación industrial

Una empresa china de carburo cementado utiliza polvo FSSS de 2 μm de espesor de pared (HV 2200), cuya vida útil es superior a 500 minutos. Sandvik utiliza polvo D50 de <1 μm de espesor de pared, cuya resistencia al desgaste del recubrimiento aumenta un 40 %, y se utiliza para álabes de turbinas de aviación.

Referencias

GB/T 4295-2008, *Polvo de carburo de tungsteno* , Administración Nacional de Normalización de China, 2008. Especifica los requisitos técnicos y los métodos de prueba para el polvo de carburo de tungsteno.
GB/T 5124.1-2008, Métodos para el análisis químico de carburo cementado - Parte 1: Determinación del contenido total de carbono , Administración Nacional de Normalización de China, 2008. Estipula que el contenido total de carbono se determinará mediante el método de combustión.
GB/T 5124.2-2008, Métodos para el análisis químico de carburo cementado - Parte 2: Determinación del contenido de carbono libre , Administración Nacional de Normalización de China, 2008. Estipula que el carbono libre se determinará mediante el método de titulación por disolución ácida.
Carburo - Parte 4: Determinación de elementos de impureza, Administración Nacional de Normalización de China, 2008. Estipula que se utilizará el método ICP-OES para determinar los elementos de impureza.
GB/T 5314-2011, Polvos para *carburo cementado* , Administración Nacional de Normalización de China, 2011. Especifica los métodos de prueba de rendimiento para polvos de carburo cementado.
GB/T 19077-2016, *Distribución del tamaño de partículas - Método de difracción láser* , Administración Nacional de Normalización de China, 2016.
El método de difracción láser se especifica para determinar la distribución del tamaño de partículas.
GB/T 25995-2010, Polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno: determinación del *tamaño de*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

partículas del tamiz de subtamiz Fisher (FSSS) , Administración Nacional de Normalización de China, 2010. Especifica el método de determinación del tamaño de partículas del tamiz de subtamiz Fisher (FSSS).

Lassner, E., y Schubert, WD (1999). *Tungsteno: Propiedades, Química, Tecnología del Elemento, Aleaciones y Compuestos Químicos* . Springer. Presenta la microestructura y las propiedades de los compuestos de tungsteno.

Upadhyaya, GS (1998). *Carburos de tungsteno cementados: Producción, propiedades y pruebas* . William Andrew Publishing. Descripción detallada de las pruebas y aplicaciones del polvo de carburo de tungsteno.

ASTM B213-20 (2020). *Métodos de prueba estándar para la determinación del caudal de polvos metálicos mediante el embudo del caudalímetro Hall* . ASTM International. Especifica el uso del caudalímetro Hall para determinar la fluidez.

ASTM E384-17 (2017). *Método de ensayo estándar para la dureza de materiales por microindentación* . ASTM International.

Especifica el método de prueba de dureza Vickers.

ASTM G65-16 (2016). Método de prueba estándar para la medición de la abrasión *mediante el* aparato de rueda de caucho/arena seca. ASTM International.

ASTM E1019-18 (2018). *Métodos de ensayo estándar para la determinación de carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno en aleaciones de acero, hierro, níquel y cobalto mediante diversas técnicas de combustión y fusión con gas inerte* . ASTM International. Especifica el método para la determinación del contenido de oxígeno.

ISO 3327:2009 (2009). *Metales duros — Determinación de la resistencia a la rotura transversal* . Organización Internacional de Normalización. Especifica un método de ensayo para la resistencia a la compresión.

ISO 4499-2:2020 (2020). *Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura — Parte 2: Medición del* tamaño de grano de WC. Organización Internacional de Normalización. Especifica el método para la determinación microscópica del tamaño de grano de WC.

ISO 9277:2010 (2010). *Determinación del área superficial específica de sólidos por adsorción de gases - Método BET* . Organización Internacional de Normalización. Especifica el método BET para la determinación del área superficial específica.

Asociación Japonesa de Normas (2005). JIS H 7803:2005, Métodos de ensayo para polvo de carburo de tungsteno, Asociación Japonesa de Normas. Especifica los métodos de ensayo químicos y físicos para el polvo de carburo de tungsteno.

ГОСТ 25599.1-83 (1983). "Polvo de carburo cementado - Método para la determinación del contenido de carbono", Comité Estatal de Normas de la URSS.

Método de análisis químico para especificar el contenido de carbono de los polvos de carburo cementado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Capítulo 4: Aplicación del polvo de carburo de tungsteno

Como elemento fundamental del carburo cementado, el polvo de carburo de tungsteno (WC) tiene aplicaciones en la fabricación mecánica, la industria aeroespacial, la electrónica y la medicina, y puede considerarse el pilar fundamental de la industria moderna. Desde que la empresa alemana Widia combinó el polvo de carburo de tungsteno con cobalto a principios del siglo XX para desarrollar la primera generación de carburo cementado, este material ha revolucionado por completo los materiales para herramientas tradicionales gracias a su asombrosa dureza (HV 2000-2500), una tasa de desgaste ultrabaja (<0,01 mm^3 / N·m) y una excelente estabilidad a altas temperaturas (>1000 °C). Desde herramientas de corte de alta velocidad hasta moldes resistentes al desgaste y dispositivos médicos de precisión, la aplicación del polvo de carburo de tungsteno no solo ha impulsado un salto en la eficiencia industrial, sino que también ha abierto nuevos horizontes para la fabricación de alta precisión. Este capítulo explorará sistemáticamente la aplicación del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación de carburo cementado, recubrimientos antidesgaste y otros campos. Mediante casos y datos de gran valor, se revelará cómo se ha transformado, pasando de ser una reacción química en el laboratorio a ser un material fundamental en la línea de producción. La primera parte se centra en la fabricación de carburo cementado, analizando en profundidad el papel del polvo de carburo de tungsteno en herramientas de corte, piezas antidesgaste y herramientas de mecanizado de precisión, y mostrando su diverso atractivo técnico.

4.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la fabricación de carburo cementado

El carburo cementado se fabrica con polvo de carburo de tungsteno como núcleo y se combina con aglutinantes metálicos como cobalto (Co) y níquel (Ni) mediante pulvimetalurgia para producir materiales de alta dureza, tenacidad y resistencia al desgaste. Desde que el químico alemán Schröter sinterizó por primera vez WC y Co en carburo cementado en 1923, esta tecnología ha evolucionado durante casi cien años y se ha convertido en un pilar indispensable de la industria manufacturera. La aplicación del polvo de carburo de tungsteno en el carburo cementado no solo depende de sus propiedades físicas y químicas (como la estabilidad de la estructura cristalina hexagonal), sino que también está estrechamente relacionada con la selección de la fase aglutinante, la regulación del tamaño de grano y la optimización del proceso de sinterización. Esta sección explicará exhaustivamente cómo el polvo de carburo de tungsteno destaca en la fabricación de carburo cementado desde las tres dimensiones: herramientas de corte, piezas resistentes al desgaste y herramientas de mecanizado de precisión, en combinación con el desarrollo histórico, los principios científicos y la práctica industrial.

4.1.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en herramientas de corte

Las herramientas de corte son el campo de aplicación más antiguo del polvo de carburo de tungsteno, y también su etapa más destacada. En comparación con el acero rápido tradicional (HSS, dureza HRC 60-65, velocidad de corte <100 m/min), el carburo cementado a base de WC aumenta la velocidad de corte a 200-300 m/min, prolongando la vida útil de la herramienta entre 5 y 10 veces, convirtiéndose en el estándar del mecanizado moderno. El polvo de carburo de tungsteno se combina con cobalto para formar

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

el carburo cementado WC-Co, que posee un equilibrio perfecto entre dureza y tenacidad, lo que le permite mantener un filo afilado y estable en condiciones de alta velocidad y carga.

4.1.1.1 Herramientas de torneado y fresas

Las herramientas de torneado y fresado son la fuerza principal en las herramientas de corte, ampliamente utilizadas para tornear y fresar acero, fundición y aleaciones de alta temperatura. La aplicación de polvo de carburo de tungsteno en estas herramientas se basa principalmente en la fórmula WC-Co, y el contenido de cobalto suele estar entre el 6 % y el 12 %. Esta proporción, verificada en la industria durante décadas, no solo garantiza la dureza (HV 1500-1800), sino que también proporciona suficiente resistencia al astillamiento (tenacidad a la fractura K_IC 10-15 MPa·m^{1} /^{2}). El cobalto, como fase aglutinante, funde y envuelve las partículas de WC durante el proceso de sinterización (1450-1500 °C, sinterización en fase líquida) para formar una microestructura densa. La selección del tamaño del grano de WC es crucial, y 1-3 μm es la especificación principal porque tiene en cuenta tanto la dureza como la resistencia al desgaste, y evita el problema de aglomeración del WC a escala nanométrica (<100 nm) y la tenacidad insuficiente de los granos gruesos (>5 μm).

Desde un punto de vista científico, la alta dureza del WC proviene de su estructura cristalina hexagonal (a = 2,906 Å, c = 2,837 Å). Los átomos de carbono están incrustados en la red de tungsteno para formar fuertes enlaces covalentes, lo que hace que su resistencia a la deformación sea muy superior a la de los materiales metálicos. La adición de cobalto mejora la plasticidad y la resistencia al impacto del material a través de la interfaz entre los enlaces metálicos y las partículas de WC. Los datos experimentales muestran que la velocidad de corte de las herramientas de torneado WC-Co puede alcanzar los 200-300 m/min, que es entre un 50 % y un 100 % más alta que la del HSS. La dureza en rojo (600-800 °C aún mantiene HV > 1200) le hace tener ventajas obvias en el corte a alta temperatura.

En casos industriales, el procesamiento de bloques de cilindros de motores de automóviles es una aplicación típica de las herramientas de torneado WC-Co. Las herramientas de torneado de la marca YG8 de China (WC 92%, Co 8%) tienen una velocidad de corte de 250 m/min al procesar bloques de cilindros de fundición gris, una vida útil de más de 100.000 piezas y una eficiencia más de 3 veces mayor que las herramientas HSS. Este éxito se debe a la uniformidad del polvo WC (Span <1,5) y a la proporción optimizada de cobalto, lo que hace que la herramienta sea menos propensa al astillado o al desgaste durante el corte a alta velocidad. La línea de producción de bloques de cilindros de Toyota Motor en Japón también utiliza fresas WC-Co similares. Al procesar culatas de aleación de aluminio, la rugosidad superficial Ra <0,8 μm y la tasa de rendimiento aumentan al 99,8%, lo que destaca el papel irremplazable del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación moderna.

En términos de tendencias futuras, las herramientas de torneado WC-Co se están desarrollando hacia granos más finos (<1 μm) y recubrimientos compuestos (como TiN - TiC -Al_2O_3) para mejorar aún más la resistencia al desgaste y la estabilidad térmica para cumplir con los requisitos de alta velocidad y alta

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

precisión de la fabricación inteligente.

4.1.1.2 Brocas y herramientas de perforación

Las brocas y herramientas de mandrinado desempeñan un papel fundamental en el procesamiento de agujeros profundos, como los orificios de aceite de cigüeñales de automóviles, los canales de álabes de turbinas de aviación, etc., y los requisitos de rendimiento del polvo de carburo de tungsteno son más estrictos. El polvo de WC de grado micrométrico (1-3 μm) es la primera opción debido a su dureza (HV 1600) y resistencia al astillamiento (K_IC > 12 MPa·m¹ /²) y su excelente rendimiento en el corte de agujeros profundos. La fórmula de WC-Co (Co 6%-10%) se prepara mediante sinterización al vacío (1450 °C, 10^{-2} Pa) para garantizar la ausencia de poros internos y un acabado superficial de Ra < 0,1 μm . El entorno de alta temperatura y alta presión del procesamiento de agujeros profundos (temperatura de la zona de corte >600 °C, fuerza axial >500 N) desafía la dureza en rojo y la resistencia al desgaste de la herramienta, mientras que el alto punto de fusión del WC (2870 °C) y el bajo coeficiente de expansión térmica (5,2 × 10^{-6} /K) lo convierten en una opción ideal.

se creó la tecnología de recubrimiento multicapa WC- TiC . Mediante el proceso CVD, se deposita una capa de TiC de 5-10 μm de espesor (dureza HV 3000) sobre el sustrato WC-Co y, a continuación, se recubre con TiN (resistencia térmica >1000 °C), lo que triplica la resistencia al desgaste y prolonga la vida útil de la herramienta hasta una profundidad de taladrado de 500-1000 metros. Este recubrimiento no solo mejora la dureza superficial, sino que también reduce el coeficiente de fricción (de 0,4 a 0,2) y la acumulación de calor de corte. La broca de agujero profundo WC-Co de Sandvik Coromant en Suecia utiliza un recubrimiento multicapa WC- TiC - TiN . Al procesar acero 42CrMo, la velocidad de corte es de 200 m/min, la profundidad de perforación es de 500 mm, la resistencia al astillamiento es de 12,5 MPa·m¹ /² y la temperatura de corte se controla por debajo de los 800 °C. Esta tecnología se ha convertido en un estándar en la fabricación de motores de aviación.

Desde una perspectiva global, las fresas de mandrinar de Kennametal, en Estados Unidos, también son importantes para el procesamiento de agujeros profundos. Su matriz de WC-Co (Co 8%), combinada con un recubrimiento PVD (TiAlN), muestra una excelente antiadherencia y resistencia al desgaste al procesar aleaciones de titanio. Su vida útil se ha incrementado a 300 piezas, superando ampliamente las 50 piezas de las fresas de mandrinar HSS. En el futuro, con la creciente demanda de procesamiento de agujeros ultraprofundos (relación de aspecto >20:1), el refinamiento del polvo de WC (<1 μm) y la inteligenteización de la tecnología de recubrimiento se convertirán en áreas clave de investigación y desarrollo.

4.1.1.3 Herramientas de corte especiales

Se utilizan herramientas de corte especiales para el procesamiento de materiales de alta precisión o ultraduros, como la microperforación de placas de circuito impreso (PCB) y las herramientas compuestas para aviación. El polvo de carburo de tungsteno debe cumplir con requisitos de rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

extremadamente altos en tales aplicaciones. El diámetro de la microperforación de PCB es <0,1 mm, y se requiere polvo de WC de grado nanométrico (<100 nm) para garantizar una estructura fina y una alta dureza. El proceso de sinterización utiliza prensado isostático en caliente (HIP, 1450 °C, 100-200 MPa), y se utiliza alta presión para suprimir el crecimiento del grano (controlado a 0,2-0,5 μm). La dureza del producto terminado alcanza HV 2000-2200 y la resistencia a la compresión es >4500 MPa. La microperforación WC-Co (Co 6%) producida por Xiamen Jinlu Special Alloy Co., Ltd. en China logra una precisión de ±0,005 mm en la perforación de placas de circuito impreso. Cada broca puede procesar entre 50 000 y 80 000 orificios, superando con creces los 10 000 orificios de las brocas de acero tradicionales. Su éxito reside en la elevada superficie específica del nano-WC (>20 m²/g) y el efecto de densificación del proceso HIP (densidad >99,8 %).

En el campo de la aviación, se requieren herramientas especiales de WC para procesar compuestos de fibra de carbono (CFRP) y aleaciones de titanio. Debido a su alta dureza y estructura de capas de fibra, el CFRP tiene requisitos extremadamente altos para la resistencia al desgaste de la herramienta y el afilado. El nano polvo de WC (<100 nm) se convierte en herramientas mediante sinterización HIP, con una dureza de HV 2200, una velocidad de corte de >250 m/min y una precisión de ±0,005 mm. La herramienta WC-Co (Co 10%) desarrollada por Kennametal en los Estados Unidos para el ala del Boeing 787 tiene una vida útil de más de 500 piezas en el procesamiento de CFRP, y su eficiencia de corte es un 20% mayor que la de las herramientas recubiertas de diamante, pero el costo se reduce en un 30%. Esta ventaja proviene de la combinación de la alta dureza del WC y la tenacidad del cobalto, que evita el defecto del fácil desprendimiento del recubrimiento de diamante.

El desarrollo futuro de las herramientas de corte especiales incluye la investigación, el desarrollo y la fabricación inteligente de materiales compuestos a base de WC (como WC -TiC-TaC). Por ejemplo, se puede añadir TaC (1-2%) para mejorar la resistencia al agrietamiento térmico o combinar la tecnología de micromecanizado láser para mejorar la precisión de la geometría de la herramienta, satisfaciendo así las necesidades de alta gama de las industrias aeroespacial y electrónica.

4.1.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en piezas resistentes al desgaste

Las piezas resistentes al desgaste son otra importante área de aplicación del polvo de carburo de tungsteno. Gracias a su alta dureza y baja tasa de desgaste, se utiliza ampliamente en aplicaciones de alta carga, como moldes y cojinetes. En comparación con el acero tradicional (como el Cr12MoV, con una vida útil inferior a 100 000 veces), la durabilidad del carburo cementado a base de WC aumenta de 5 a 10 veces, lo que lo convierte en el material predilecto para estampación, embutición y sellado.

4.1.2.1 Matrices de estampación

Las matrices de estampación se utilizan para el estampado en frío de placas de acero, placas de aluminio y otros metales. Las matrices de WC-Co hechas de polvo de carburo de tungsteno son conocidas por su vida útil ultralarga. La fórmula típica es WC 90%-94%, Co 6%-10%, preparada por sinterización en fase

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

líquida (1500 °C, 30 MPa), y el producto terminado tiene una dureza de HV 1400-1600 y una resistencia a la compresión de >4000 MPa. La alta dureza de WC asegura que la superficie de la matriz resista la abrasión de la placa de acero, mientras que la tenacidad del cobalto absorbe el impacto del estampado (>20 J/cm²). Los datos muestran que la vida útil de las matrices de WC-Co puede alcanzar 500.000-1 millón de veces, lo que es de 5 a 10 veces mayor que Cr12MoV (<100.000 veces), y la rugosidad superficial Ra se mantiene por debajo de 0,05 μm .

En la fabricación de automóviles, el estampado de paneles de puertas es una aplicación típica de los moldes de WC-Co. El molde de WC-Co (Co 8%) producido por CTIA GROUP ha estado funcionando de forma continua durante medio año en el estampado de placas de acero de 0,8 mm, con un desgaste del molde inferior a 0,01 mm y una reducción del 70% en los costes de mantenimiento por inactividad. La línea de producción de automóviles BMW en Alemania también utiliza moldes de WC similares, que muestran una excelente resistencia a la fatiga en el estampado a alta velocidad (más de 100 veces por minuto), y la vida útil de un solo juego de moldes alcanza las 800.000 piezas. En el futuro, el refinamiento de los moldes de WC-Co (como el grano inferior a 0,5 μm) y los recubrimientos superficiales (como el CrN) se convertirán en la dirección para mejorar la vida útil y la precisión.

4.1.2.2 Matriz de trefilado y matriz de extrusión

Las matrices de trefilado y extrusión se utilizan para formar alambres y tubos metálicos. El polvo de WC de grano fino (0,5-1 μm) es el preferido por su alta dureza (HV 1800) y rugosidad superficial ultrabaja (Ra < 0,02 μm). La fórmula WC-Co (Co 6%-8%) se prepara mediante sinterización al vacío (1450 °C). La precisión de apertura de la matriz es de ±0,001 mm y la tasa de desgaste es de <0,001 mm³ / N · m, que es mucho menor que la de las matrices de acero (0,01 mm³ / N · m). Durante el proceso de trefilado, la alta dureza del WC resiste la fricción del metal, mientras que los granos finos aseguran paredes de orificios lisas y reducen los defectos superficiales del alambre.

La industria del cable es un importante escenario de aplicación para matrices de trefilado. La matriz de trefilado de WC-Co (Co 8%) de una fábrica en Jiangxi, China, ha estado funcionando continuamente durante 6 meses en el trefilado de alambre de cobre de 0,1 mm. El cambio de tamaño del orificio de la matriz es <0,002 mm, la velocidad de trefilado es de 20 m/s y la rugosidad superficial del alambre Ra es <0,01 μm . Este rendimiento se debe a la uniformidad del polvo de WC (FSSS 0,8 μm) y a la optimización del proceso de sinterización. La matriz de extrusión de WC de Sumitomo Electric Industries, Japón, se utiliza para el conformado de tubos de aluminio, con una vida útil de más de 1 millón de metros, lo que destaca el potencial del WC de grano fino en el conformado de alta precisión. En el futuro, el nanodimensionamiento (<100 nm) y los recubrimientos autolubricantes (como DLC) de las matrices basadas en WC mejorarán aún más la resistencia al desgaste y la eficiencia.

4.1.2.3 Cojinetes y sellos resistentes al desgaste

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Los rodamientos y sellos resistentes al desgaste deben soportar la rotación a alta velocidad y la fricción de alta carga. Los materiales compuestos WC-Ni son los preferidos debido a su resistencia a la corrosión y bajo coeficiente de fricción (<0,1). La fórmula es WC 85%-90%, Ni 10%-15%, y se prepara mediante prensado isostático en caliente (HIP, 1450 °C, 150 MPa). El producto terminado tiene una resistencia a la temperatura de >800 °C y una resistencia a la compresión de >3800 MPa. El níquel tiene mejor resistencia a ácidos y álcalis que el cobalto y es adecuado para entornos químicos y marinos. La empresa alemana FAG utiliza rodamientos WC-Ni para motores de alta velocidad (50.000 rpm), con un coeficiente de fricción de 0,08, una vida útil de 2 veces y una temperatura de funcionamiento controlada por debajo de 600 °C. La empresa estadounidense Flowserve utiliza sellos WC-Ni en bombas químicas, que son resistentes a la corrosión por H_2SO_4 y pueden funcionar de forma continua durante más de un año.

El proceso HIP es clave para el éxito de las piezas de WC-Ni. Elimina los microporos mediante alta presión (100-200 MPa), alcanza una densidad del 99,9 % y mejora significativamente la resistencia al desgaste y a la fatiga. En el futuro, la optimización de la microestructura de WC-Ni (como la adición de Cr para mejorar la resistencia a la corrosión) y la monitorización inteligente (como sensores integrados) impulsarán su aplicación en condiciones de trabajo extremas.

4.1.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en herramientas de mecanizado de precisión

Las herramientas de mecanizado de precisión exigen un tamaño de partícula extremadamente alto, pureza y precisión de mecanizado del polvo de carburo de tungsteno, y se utilizan ampliamente en los campos de la medicina, la óptica y la microelectrónica. El polvo ultrafino de carburo de tungsteno (<1 μm) y la tecnología avanzada de sinterización (como HIP) son sus principales soportes.

4.1.3.1 Herramientas dentales y médicas

Las fresas dentales y las herramientas médicas requieren micromecanizado (diámetro de 0,3 a 1 mm), y las herramientas WC-Co hechas de polvo de carburo de tungsteno (1-2 μm) son conocidas por su dureza HV 1800 y biocompatibilidad (ISO 10993-5). Después de la sinterización, la superficie se pule a Ra < 0,05 μm para garantizar la no irritación al cortar el esmalte dental. La fresa dental WC-Co (Co 6%) de Komet, Alemania, tiene un diámetro de 0,5 mm, una durabilidad de > 1000 veces en cirugía dental, una precisión de ± 0,01 mm y una velocidad de corte de 5000 rpm. Su éxito se debe a la alta pureza del polvo WC (impurezas < 0,02%) y al refinamiento del proceso de pulido. El bisturí WC de Dentsply en Estados Unidos también tiene un buen rendimiento en aplicaciones ortopédicas, con un aumento del 50% en la vida útil al cortar huesos.

Desde una perspectiva científica, la biocompatibilidad del WC se debe a su inercia química (insoluble en fluidos corporales), mientras que sus granos finos garantizan su nitidez y un bajo daño térmico. En el futuro, el nanotamaño (<100 nm) y los recubrimientos antibacterianos (como los iones de Ag) de las herramientas médicas basadas en WC mejorarán aún más su rendimiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.1.3.2 Molde óptico

Los moldes ópticos se utilizan para prensar lentes de vidrio y componentes ópticos. El polvo ultrafino de WC (0,2-0,5 μm) se prepara mediante sinterización HIP (1450 °C, 200 MPa), con una precisión de superficie de <10 nm y una vida útil de >100 000 veces. La alta dureza (HV 2000) y el bajo coeficiente de expansión térmica (5,2 × 10^{-6} /K) del WC garantizan que el molde no se deforme durante el prensado a alta temperatura (>600 °C). Combinado con pulido de espejo y recubrimiento de WC (como la deposición CVD de una capa de WC de 5 μm), el molde de WC de la empresa japonesa HOYA tiene una tasa de rendimiento del 99,9 % en la fabricación de lentes para teléfonos móviles, y la rugosidad de la superficie del molde Ra <0,005 μm , superando ampliamente los moldes de acero tradicionales (Ra >0,02 μm).

En el campo de la óptica de precisión, el éxito de los moldes de WC también se debe a sus propiedades antiadherentes, que evitan que el vidrio se adhiera al molde. Zeiss de Alemania utiliza moldes de WC para el moldeo de lentes infrarrojas, lo que aumenta su vida útil hasta 150.000 veces, lo que demuestra el potencial de alta precisión del WC ultrafino. En el futuro, la inteligencia de los moldes ópticos basados en WC (como el control de temperatura en tiempo real) y la investigación y el desarrollo de materiales compuestos (como WC- TiC) impulsarán su aplicación en dispositivos de RA/RV.

4.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la tecnología de recubrimiento de superficies

La tecnología de recubrimiento de superficies es otra área de aplicación importante del polvo de carburo de tungsteno. Mediante pulverización térmica, pulverización de plasma, revestimiento láser y otros procesos, el polvo de carburo de tungsteno se deposita sobre la superficie del sustrato para formar una capa protectora resistente al desgaste, a la corrosión y a las altas temperaturas. Desde su auge a mediados del siglo XX, esta tecnología se ha convertido en un medio clave para prolongar la vida útil de las piezas mecánicas y mejorar el rendimiento. En comparación con la fabricación general de carburo cementado, la tecnología de recubrimiento es ampliamente favorecida por su flexibilidad (permite recubrir formas complejas), economía (puede utilizarse acero de bajo coste como sustrato) y eficiencia (refuerzo local). La aplicación de polvo de carburo de tungsteno en recubrimientos se utiliza ampliamente en motores aeroespaciales, herramientas de perforación petrolera, equipos químicos y otros campos debido a su alta dureza (HV 2000-2500), excelente resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,01 $mm^3/N \cdot m$) y estabilidad térmica (punto de fusión 2870 °C). Esta sección combinará principios científicos y prácticas industriales desde tres aspectos: recubrimiento por pulverización térmica, pulverización de plasma y revestimiento láser, resistencia a altas temperaturas y recubrimientos especiales, y explorará profundamente cómo el polvo de carburo de tungsteno puede potenciar la industria moderna a través de la tecnología de ingeniería de superficies.

4.2.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en recubrimiento por pulverización térmica

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La tecnología de pulverización térmica utiliza llamas de alta temperatura o flujo de aire a alta velocidad para fundir o semifundir polvo de carburo de tungsteno y luego pulverizarlo sobre la superficie del sustrato para formar un recubrimiento denso y resistente al desgaste. Desde que Union Carbide desarrolló la primera generación de equipos de pulverización térmica en Estados Unidos en la década de 1940, la tecnología ha evolucionado desde la simple pulverización con llama hasta la eficiente pulverización de oxígeno-combustible a alta velocidad (HVOF), convirtiéndose en la opción preferida por las industrias aeronáutica, agrícola y energética. La ventaja del polvo de carburo de tungsteno en la pulverización térmica reside en su alta dureza y baja porosidad, lo que permite que el recubrimiento se mantenga estable en condiciones de trabajo rigurosas.

4.2.1.1 Pulverización HVOF

La pulverización de oxígeno combustible a alta velocidad (HVOF) es la tecnología de pulverización térmica más avanzada. Utiliza una llama supersónica (>2000 m/s) para pulverizar polvo de carburo de tungsteno sobre un sustrato y formar un recubrimiento de alta densidad, baja porosidad y resistente al desgaste. El polvo de WC-Co (contenido de cobalto del 10 % al 12 %) es el material principal para la HVOF. El cobalto, como fase aglutinante, se funde parcialmente durante el proceso de pulverización y envuelve las partículas de WC (granos de 1-5 μm), formando un recubrimiento con una dureza de HV de 1200 a 1400 y una tasa de desgaste de <0,01 $mm^3/N·m$. Desde un punto de vista científico, el alto punto de fusión y la resistencia a la oxidación del WC garantizan que no se descomponga durante la pulverización a alta temperatura (temperatura de la llama >3000 °C), mientras que la ductilidad del cobalto reduce la tensión interna del recubrimiento (<200 MPa) y mejora la resistencia de unión (>70 MPa).

El rendimiento de los recubrimientos HVOF se debe al control preciso de los parámetros del proceso. La proporción de oxígeno y combustible (como el queroseno) en la pistola pulverizadora (1:2-1:3) determina la temperatura y la velocidad de la llama. La velocidad de las partículas de polvo alcanza los 600-800 m/s y la velocidad de enfriamiento es >10 °C/s, lo que reduce la porosidad del recubrimiento a <1 % y controla el espesor a 100-500 μm . Los datos muestran que la resistencia al desgaste de los recubrimientos de WC-Co es más de 10 veces superior a la de los sustratos sin recubrimiento (como el acero 45, con una tasa de desgaste de 0,1 $mm^3/N·m$), y la resistencia a la corrosión supera las 1000 horas en pruebas de niebla salina.

Los álabes de los motores de aeronaves son un ejemplo clásico de pulverización HVOF. Los álabes de los motores CF6 de General Electric (GE) en Estados Unidos utilizan un recubrimiento WC-Co (Co 12%). Bajo condiciones de fregado con gas (>1200 °C) y abrasión por arena, su vida útil supera las 3000 horas, seis veces más que la de los álabes sin recubrimiento (500 horas). Este éxito se debe a la alta dureza del WC para resistir la abrasión y a la tenacidad del cobalto para mitigar el choque térmico. Rolls-Royce en el Reino Unido también utiliza el recubrimiento WC-Co HVOF para los motores de la serie Trent. El espesor del recubrimiento es de 250 μm , la dureza es HV 1300 y la tasa de desgaste de los álabes durante el funcionamiento es <0,005 mm/1000 horas, lo que destaca la fiabilidad del polvo de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

carburo de tungsteno en entornos extremos. En el futuro, la tecnología HVOF evolucionará hacia polvo WC ultrafino (<1 μm) y recubrimientos compuestos (como WC-Co-Cr) para cumplir con requisitos de mayor resistencia al desgaste y a la corrosión.

4.2.1.2 Proyección con llama

La pulverización por llama es un proceso tradicional de pulverización térmica. Utiliza una llama de oxígeno-acetileno (temperatura de aproximadamente 3000 °C) para fundir polvo de carburo de tungsteno y luego pulverizarlo sobre el sustrato. Es adecuado para recubrimientos resistentes al desgaste de bajo costo. El polvo WC-Ni (contenido de níquel 10%-15%) es una opción común porque el níquel cuesta menos que el cobalto y tiene una mayor resistencia a la corrosión. Durante el proceso de pulverización, las partículas de WC (5-10 μm) se funden parcialmente y el níquel se licúa completamente, formando un recubrimiento con una fuerza de unión de >50 MPa y un espesor de 100-300 μm . La dureza del recubrimiento es HV 900-1100, que es menor que HVOF, pero suficiente para hacer frente a entornos de desgaste moderado.

Las ventajas de la pulverización por llama son la simplicidad del equipo (costo < 100.000 yuanes) y la flexibilidad de operación, lo que resulta ideal para pequeñas y medianas empresas. Los parámetros de pulverización, como el flujo de oxígeno (20-30 L/min) y la velocidad de alimentación de polvo (50-80 g/min), determinan la calidad del recubrimiento. La porosidad suele ser del 5% al 10%, ligeramente superior a la del HVOF (<1%). Las pruebas de rendimiento demuestran que la resistencia al desgaste del recubrimiento WC-Ni es de 3 a 5 veces superior a la del sustrato (como el acero Q235), lo que lo hace adecuado para aplicaciones de baja velocidad y alta fricción, como la maquinaria agrícola.

Las cuchillas de maquinaria agrícola son una aplicación típica de la pulverización de llama. John Deere de los Estados Unidos pulveriza un recubrimiento WC-Ni (Ni 12%) en cuchillas de cosechadoras con un espesor de 200 μm , lo que aumenta la resistencia al desgaste en 4 veces y extiende la vida útil en una sola temporada de 500 horas a 2000 horas. Esta mejora se debe a la alta dureza del WC y la resistencia a la oxidación del níquel (>600 °C), que resiste eficazmente la abrasión del suelo y los residuos vegetales. Una determinada fábrica de maquinaria agrícola en Shandong, China, también utiliza una tecnología similar para pulverizar cuchillas de arado de tractor, lo que aumenta el costo en 20 yuanes por pieza, pero extiende la vida útil en 3 veces, con un rendimiento de costo significativo. En el futuro, la pulverización de llama puede mejorar la densidad y la resistencia a la corrosión del recubrimiento refinando el polvo de WC (<5 μm) y agregando Cr (1%-2%).

4.2.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en pulverización de plasma y revestimiento láser

La pulverización de plasma y el revestimiento láser representan la tecnología de vanguardia en recubrimientos de superficies. Utilizan plasma o rayo láser de alta temperatura para depositar polvo de carburo de tungsteno sobre el sustrato y formar un recubrimiento de alto rendimiento. Ambas tecnologías ofrecen ventajas en cuanto a resistencia a la corrosión a alta temperatura y refuerzo local.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.2.2.1 Pulverización de plasma

La pulverización de plasma utiliza un arco de plasma (temperatura >15000 °C) para fundir polvo de carburo de tungsteno y pulverizarlo sobre el sustrato, lo cual es adecuado para recubrimientos resistentes a la corrosión a alta temperatura. El polvo compuesto WC-Cr_3C_2 (WC 70%-80%, Cr_3C_2 20%-30%) es una fórmula común. La adición de Cr_3C_2 mejora la resistencia a la oxidación (>1000 °C) y la resistencia a la corrosión. Durante el proceso de pulverización, las partículas de polvo (10-20 μm) se funden completamente en el flujo de plasma a una velocidad de 300-500 m/s, formando un recubrimiento con una porosidad de <2% y un espesor de 200-600 μm . La dureza del recubrimiento es HV 1000-1200 y la temperatura de resistencia a la oxidación alcanza los 1100 °C, que es mucho más alta que la de un solo recubrimiento de WC (<900 °C).

La base científica de la pulverización de plasma reside en la alta densidad energética del plasma de alta temperatura, que permite que el WC y el Cr_3C_2 formen una estructura compuesta uniforme. Los parámetros del proceso, como el caudal de argón (40-50 L/min) y la potencia (30-40 kW), determinan el grado de fusión y la eficiencia de deposición. Las pruebas de rendimiento demuestran que la resistencia al desgaste del recubrimiento WC-Cr_3C_2 es 8 veces superior a la del sustrato, y la resistencia a la corrosión en la prueba de niebla salina es superior a 1500 horas.

Los álabes de turbinas de gas son una aplicación representativa de la pulverización de plasma. Pratt & Whitney en Estados Unidos utiliza recubrimientos WC-Cr_3C_2 en álabes de motores F135 con un espesor de 300 μm , una temperatura de funcionamiento de 1200 °C y una vida útil de >5000 horas, que es 5 veces más larga que la de los álabes sin recubrimiento (1000 horas). Siemens en Alemania también utiliza recubrimientos similares en turbinas de gas. El efecto sinérgico de la resistencia a la oxidación y al desgaste permite que los álabes permanezcan estables bajo la limpieza con gas a alta temperatura. En el futuro, la pulverización de plasma puede mejorar aún más el rendimiento añadiendo Ni (5%-10%) u optimizando los parámetros de pulverización para reducir la porosidad (<1%).

4.2.2.2 Revestimiento láser

El revestimiento láser utiliza un haz láser de alta energía (potencia 2-10 kW) para fundir polvo de carburo de tungsteno y depositarlo sobre el sustrato para formar un revestimiento grueso y de alta dureza, que es particularmente adecuado para el refuerzo de superficies de componentes grandes como herramientas de perforación petrolera. El polvo WC (grano 5-15 μm) se inyecta directamente en el baño de fusión del láser y se une metalúrgicamente al sustrato (como acero 42CrMo). El espesor del revestimiento es de 0,5-2 mm y la dureza es HV 1300. El revestimiento láser tiene un bajo aporte de calor (<200 J/mm²), una zona afectada por el calor del sustrato (ZAT) <0,1 mm, una porosidad del revestimiento <0,5% y una resistencia de unión >100 MPa, superando ampliamente la pulverización térmica (50-70 MPa).

En principio, la alta densidad energética del láser (>10^6 W/cm²) provoca que las partículas de WC se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

fundan rápidamente y formen una capa de aleación con el sustrato. La alta dureza del WC y la tenacidad del sustrato se complementan. Parámetros del proceso como la potencia del láser (4 kW), la velocidad de escaneo (5-10 mm/s) y la velocidad de alimentación del polvo (20-40 g/min) determinan la calidad del recubrimiento. Las pruebas de rendimiento demuestran que la resistencia al desgaste de la capa de revestimiento de WC es 15 veces superior a la del sustrato, y la resistencia a la corrosión supera los 2 años en una solución de NaCl al 10 %.

Las tuberías de perforación en aguas profundas son un ejemplo típico de revestimiento láser. Halliburton (EE. UU.) reviste la superficie de las tuberías de perforación con un revestimiento de WC (1,5 mm de espesor), que ha estado funcionando durante más de dos años en un entorno de agua salada a 5000 metros de profundidad, con un desgaste inferior a 0,02 mm y una resistencia a la corrosión diez veces superior a la de las tuberías de perforación sin revestimiento. China Petroleum también utiliza una tecnología similar para reforzar las herramientas de perforación, con una dureza de HV 1350 y una resistencia al impacto de >30 J/cm², para satisfacer las necesidades de la extracción de petróleo y gas en capas profundas. En el futuro, el revestimiento láser puede mejorar el espesor y la uniformidad del revestimiento mediante el polvo compuesto de WC-Ni y la tecnología de revestimiento multipaso.

4.2.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en recubrimientos especiales y resistentes a altas temperaturas

Resistencia a altas temperaturas y recubrimientos especiales Para entornos extremos, como moldes de alta temperatura y equipos químicos, el polvo de carburo de tungsteno debe tener en cuenta la estabilidad térmica, la resistencia a la corrosión y la resistencia al choque térmico en tales aplicaciones.

4.2.3.1 Recubrimiento resistente al choque térmico

Los recubrimientos resistentes al choque térmico se utilizan para moldes de alta temperatura y equipos de procesamiento en caliente. Los recubrimientos a base de WC son conocidos por su bajo coeficiente de expansión térmica (<5×10 $^{-6}$ /°C) y resistencia a la temperatura (>1200°C). El polvo compuesto WC-TiC -Ni (WC 70%, TiC 20%, Ni 10%) se prepara mediante HVOF o pulverización de plasma, con una dureza de recubrimiento de HV 1100-1300 y un espesor de 200-400 μm . La adición de TiC mejora la dureza a alta temperatura (>1000°C aún mantiene HV>1000), y Ni mejora la resistencia a la fatiga térmica. Durante el proceso, la velocidad de pulverización (500-700 m/s) y la velocidad de enfriamiento (>10 ^{5} °C/s) garantizan que la tensión interna del recubrimiento sea <150 MPa.

Los moldes de alta temperatura son la principal aplicación de los recubrimientos resistentes al choque térmico. Toyota Motors en Japón utiliza recubrimientos WC- TiC -Ni para moldes de fundición a presión de aleación de aluminio. La temperatura del molde es de 800-1000 °C, el ciclo de choque térmico es >5000 veces mayor y la vida útil se triplica. ThyssenKrupp en Alemania también utiliza recubrimientos similares en moldes de estampación en caliente de placas de acero, que resisten temperaturas de hasta 1200 °C y presentan una mayor resistencia al agrietamiento que los recubrimientos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de Cr tradicionales. En el futuro, los compuestos multifásicos (como la adición de Al_2O_3) y los diseños de estructura en gradiente de recubrimientos a base de WC mejorarán aún más la resistencia al choque térmico.

4.2.3.2 Recubrimiento resistente a productos químicos

Los recubrimientos resistentes a la corrosión química se utilizan en tuberías y válvulas químicas. El recubrimiento WC-CoCr (WC 80%, Co 10%, Cr 10%) ha destacado por su excelente resistencia a la corrosión. Preparado mediante pulverización HVOF, este recubrimiento presenta una dureza de HV 1200 y un espesor de 150-300 μm . La adición de Cr forma una capa de pasivación de Cr_2O_3, y la resistencia a los ácidos (pH <2) se quintuplica. Las pruebas de rendimiento muestran que la velocidad de corrosión del recubrimiento WC-CoCr en una solución de H_2SO_4 al 10% es <0,001 mm/año, y la resistencia a la oxidación es >900 °C.

Las válvulas químicas son una aplicación típica. Emerson, una empresa estadounidense, utiliza un recubrimiento de WC-CoCr en válvulas de tuberías de gas natural agrio. Tras tres años de funcionamiento, el desgaste y la corrosión son inferiores a 0,01 mm, y la vida útil es tres veces mayor que la de las válvulas sin recubrimiento (<1 año). Una planta química en China también utiliza un recubrimiento de WC-CoCr en válvulas de bombas de ácido sulfúrico, y la resistencia a la corrosión supera los 4 años en H_2SO_4 al 20 %. En el futuro, la resistencia a la corrosión química del recubrimiento de WC-CoCr puede mejorarse aún más añadiendo Mo (5 %-10 %) u optimizando el proceso de pulverización (como la pulverización en frío).

4.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en herramientas de minería y construcción

Las herramientas de minería y construcción son áreas de aplicación importantes para el polvo de carburo de tungsteno. Su alta dureza (HV 2000-2500), excelente resistencia al desgaste (índice de desgaste <0,01 $mm^3/N \cdot m$) y resistencia al impacto (>25 J/cm^2) lo convierten en el material fundamental para equipos de perforación, tunelaje y trituración de rocas. Desde que la industria minera comenzó a utilizar carburo cementado a finales del siglo XIX, el polvo de carburo de tungsteno ha sustituido gradualmente al acero tradicional y se ha convertido en un recurso fundamental para los proyectos modernos de minería y construcción. Desde brocas para perforación de rocas hasta cortadores de escudos y martillos trituradores, el polvo de carburo de tungsteno ha mejorado significativamente la vida útil y la eficiencia de las herramientas mediante la pulvimetalurgia, la incrustación o la tecnología de compuestos, especialmente en entornos de alta carga como la minería de roca dura, la construcción de túneles subterráneos y el procesamiento de minerales. Esta sección combinará principios científicos y prácticas industriales desde tres aspectos: herramientas de perforación de roca, cortadores de escudos y equipos de tunelaje, y revestimientos resistentes al desgaste y equipos de trituración, para explorar profundamente cómo el polvo de carburo de tungsteno juega un papel clave en el campo de la minería y la construcción.

4.3.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en herramientas de perforación de rocas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Las herramientas de perforación de roca se utilizan para la perforación y voladura de rocas. Las brocas de carburo, fabricadas con polvo de carburo de tungsteno, se han convertido en la opción preferida para la minería de roca dura y carbón gracias a su alta dureza y resistencia al impacto. Desde que la empresa sueca Sandvik introdujo el carburo cementado a base de carburo de tungsteno (WC) en el sector de la perforación de roca a principios del siglo XX, la tecnología ha evolucionado desde simples brocas con incrustaciones hasta herramientas reforzadas con materiales compuestos, y se utiliza ampliamente en minas, túneles y en la exploración de petróleo y gas.

4.3.1.1 Brocas para roca dura

Las brocas para roca dura se utilizan para la minería de rocas de alta dureza, como el granito y la cuarcita. El polvo de carburo de tungsteno se incrusta en la matriz de acero a través de la tecnología de incrustación para formar brocas con incrustaciones de WC. La fórmula típica es WC-Co (Co 8%-12%), con un tamaño de grano de 3-5 μm , preparada por sinterización al vacío (1450 °C, 10^{-2} Pa), dureza HV 1400-1600 y tenacidad al impacto >25 J/cm². La alta dureza del WC resiste la abrasión de la roca, y la tenacidad del cobalto absorbe la carga de impacto (>500 kN) durante la perforación. El diseño de la broca adopta principalmente una estructura de diente de bola o diente de columna, y el diámetro de la incrustación de WC es de 5-15 mm para garantizar la eficiencia de corte y la durabilidad. Los datos muestran que la velocidad de perforación de las brocas con incrustaciones de WC puede alcanzar de 12 a 15 m/h, lo que es 2 a 3 veces mayor que la de las brocas de acero tradicionales (<5 m/h).

Desde un punto de vista científico, la estructura hexagonal del WC (a = 2,906 Å, c = 2,837 Å) y su alto punto de fusión (2870 °C) lo hacen estable ante impactos de alta velocidad (>1000 veces/min) y fricción a alta temperatura (>600 °C). En términos tecnológicos, la optimización de la temperatura y la presión de sinterización (30 MPa) permite que el WC y el cobalto formen una microestructura uniforme, con una resistencia del límite de grano de >4000 MPa, evitando así el riesgo de astillado. Las pruebas de rendimiento muestran que la vida útil de las brocas con WC integrado supera los 1000 metros de profundidad de perforación en granito, con una tasa de desgaste de <0,005 mm/m.

La perforación con voladuras en minería es un ejemplo típico de brocas para roca dura. La broca WC-Co (Co 10%) de la empresa sueca Atlas Copco tiene un diámetro de perforación de 50 mm, una velocidad de perforación de 13 m/h, una vida útil de 1200 metros y una mejora del 40% en la eficiencia de la voladura en una mina de granito noruega. Una mina en Guizhou, China, también utiliza brocas similares con incrustaciones de WC, que tienen una vida útil de 1500 metros al extraer piedra caliza, que es 5 veces mayor que la de las brocas de acero (300 metros). En el futuro, las brocas con incrustaciones de WC pueden mejorar aún más la resistencia al desgaste y la resistencia a la fatiga térmica mediante granos ultrafinos (<1 μm) y recubrimientos de TiC (CVD, 5 μm) para adaptarse a entornos de roca dura más complejos.

4.3.1.2 Herramientas de perforación de vetas de carbón

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Las herramientas de perforación de vetas de carbón se utilizan para la minería de carbón y la extracción de gas. Los cabezales de corte WC-Co funcionan bien en vetas de carbón alternas blandas y duras con su resistencia al desgaste y al impacto. La fórmula es WC 90%-94%, Co 6%-10%, tamaño de grano 1-3 μm , preparado por sinterización de prensado en caliente (1400 °C, 50 MPa), dureza HV 1500, resistencia al desgaste <0,002 $mm^3/N \cdot m$. La alta dureza del WC hace frente a la abrasión de la ganga en la veta de carbón, y la ductilidad del cobalto absorbe el impacto de la excavación (>15 J/cm^2). Para mejorar el rendimiento, se introdujo la tecnología de refuerzo compuesto WC- TiC , y el TiC (5%-10%) aumentó la dureza a alta temperatura (>800 °C aún mantiene HV>1200) y extendió la vida útil del cabezal de corte.

Las herramientas de perforación de vetas de carbón deben trabajar con la baja dureza de la roca de carbón (Mohs 2-4) y la alta dureza local de la ganga (Mohs 6-7). La estructura compuesta del cabezal de corte de WC-Co- TiC equilibra perfectamente la resistencia al desgaste y la tenacidad. En términos tecnológicos, la alta presión de sinterización en caliente logra una densidad del cabezal de corte superior al 99,5 % y una porosidad inferior al 0,5 %, lo que garantiza la estabilidad de corte. Las pruebas de rendimiento demuestran que la resistencia al desgaste del cabezal de corte de WC- TiC es un 30 % superior a la del cabezal de corte de WC-Co simple, y la velocidad de corte de roca de carbón alcanza los 8-10 m/h.

Una tuneladora en una mina de carbón en Shanxi, China, utiliza un cabezal de corte WC-Co- TiC (Co 8%, TiC 5%), que puede excavar continuamente 2000 metros en una veta de carbón con ganga, con un desgaste del cabezal de corte de <0,01 mm y un aumento en la eficiencia de excavación del 25%. Las herramientas de perforación de vetas de carbón BHP de Australia también utilizan una tecnología similar, con una velocidad de perforación de 9 m/h en vetas de carbón con alto contenido de gas y una vida útil de 2500 metros. En el futuro, las herramientas de perforación de vetas de carbón basadas en WC se pueden optimizar con nanopolvo de WC (<100 nm) y recubrimientos superficiales (como CrN) para mejorar aún más la resistencia al desgaste y a la corrosión.

4.3.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en herramientas de protección y equipos de tunelaje

Las herramientas de escudo y los equipos de tunelaje se utilizan en túneles y proyectos subterráneos. Las herramientas fabricadas con polvo de carburo de tungsteno presentan una excelente resistencia al desgaste y capacidad de corte en arenisca, basalto y otros estratos. Desde que Japón introdujo por primera vez el carburo cementado en las máquinas de escudo en la década de 1960, las herramientas basadas en carburo de tungsteno se han convertido en la clave para la construcción de túneles en metros urbanos y de montaña.

4.3.2.1 Cabezal de corte con escudo Metro

El cabezal de corte con escudo subterráneo se utiliza para excavaciones en arenisca, arcilla y otros

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

estratos. Los cortadores a base de WC se han convertido en estándar debido a su alta resistencia al desgaste y larga vida útil. La fórmula es WC-Co (Co 10%-15%), con un tamaño de grano de 2-5 μm , preparado por prensado isostático en caliente (HIP, 1450 °C, 150 MPa), una dureza de HV 1400-1600 y una vida útil de corte de >6000 metros. La alta dureza del WC resiste la abrasión de la arenisca (Mohs 5-6), y la tenacidad del cobalto alivia la vibración del cabezal de corte (>10 Hz). Las formas de los cortadores incluyen fresas madre y raspadores, y el espesor del cabezal de corte de WC es de 10-20 mm para garantizar la profundidad de corte y la estabilidad. Los datos muestran que la resistencia al desgaste de los cortadores de WC-Co es 2-3 veces mayor que la de los cortadores de acero, y la velocidad de corte alcanza los 50-80 mm/min.

El cabezal de corte de escudo necesita trabajar bajo alta presión de agua (>5 bar) y lavado de lodo. La alta densidad (>14,5 g/cm³) y resistencia a la corrosión (prueba de niebla salina >1000 horas) del WC son sus ventajas. La densificación a alta presión del proceso HIP hace que la porosidad de la herramienta sea <0,2% y la tenacidad a la fractura >12 MPa·m ¹ / ² . En el caso, la Línea 14 del Metro de Beijing de China utiliza cortadores de rodillos WC-Co (Co 12%), que han sido excavados 6.500 metros en formaciones de arenisca. El ciclo de reemplazo supera 1 año, que es 4 veces más alto que el de los cortadores de acero (3 meses). La máquina de escudo del Metro de Tokio en Japón también utiliza cortadores WC similares, que tienen una vida útil de 7.000 metros al cortar arenisca y grava, lo que resalta la alta eficiencia del polvo de carburo de tungsteno. En el futuro, los cortadores de escudo basados en WC se pueden optimizar a través de recubrimientos compuestos (como TiAlN) y monitoreo inteligente para adaptarse a formaciones más complejas.

4.3.2.2 Cortadora de túneles para terreno duro

Los cortadores de túneles de formación dura se utilizan en basalto, granito y otras formaciones (Mohs 7-8). Los cortadores de WC- TiC destacan por su durabilidad y resistencia a la fractura. La fórmula es WC 80%-85%, TiC 10%-15%, Co 5%-10%, tamaño de grano 1-3 μm , y se prepara mediante sinterización optimizada (1450 °C, 100 MPa) de polvo de WC superduro (FSSS <1 μm), dureza HV 1600-1800, tenacidad a la fractura >15 MPa·m¹ /². La adición de TiC mejora la dureza a alta temperatura (>1000 °C aún mantiene HV >1400), y la alta dureza del WC soporta el corte de roca dura.

cm²) y la alta temperatura (>800 °C) de las formaciones duras imponen altas exigencias a las herramientas de corte. La estructura compuesta de WC- TiC logra un efecto sinérgico gracias a la estabilidad térmica del TiC y la resistencia al desgaste del WC. La optimización de la sinterización permite una uniformidad de grano (RSD) <5 % y una densidad de la herramienta >99,8 %. Las pruebas de rendimiento demuestran que la vida útil de las herramientas de WC- TiC en basalto es de 5000 metros y la resistencia al desgaste es un 50 % superior a la de las herramientas de WC-Co.

La tuneladora del túnel ferroviario de los Alpes suizos utilizó herramientas de WC- TiC (TiC al 12%), excavó 5500 metros en estratos de basalto, con una velocidad de corte de 40 mm/min, y el ciclo de reemplazo de herramientas se extendió a 10 meses. También se utilizaron herramientas similares en el

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

proyecto de doble vía del ferrocarril Chengdu-Kunming en China, con una vida útil de 6000 metros al excavar granito y una resistencia a la fractura de 16 MPa·m¹ /². En el futuro, la durabilidad de las herramientas de WC- TiC se puede mejorar aún más mediante nanogranos (<100 nm) y tecnología de endurecimiento superficial por láser.

4.3.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en revestimientos resistentes al desgaste y equipos de trituración

Se utilizan revestimientos y equipos de trituración resistentes al desgaste para la molienda y trituración de minerales. Los componentes reforzados con polvo de carburo de tungsteno se han convertido en la base del procesamiento minero gracias a su bajísima tasa de desgaste y larga vida útil.

4.3.3.1 Revestimiento del molino de bolas

Los revestimientos para molinos de bolas se utilizan para la molienda de minerales. Los revestimientos reforzados con WC mejoran la resistencia al desgaste mediante tecnología de incrustaciones o composite. Su fórmula es WC-Co (Co 8%-12%), con un tamaño de grano de 3-5 μm , se prepara mediante sinterización por prensado en caliente (1450 °C, 40 MPa), con una dureza HV 1400 y una tasa de desgaste <0,05 g/t (gramos por tonelada de mineral). La alta dureza del WC resiste el impacto y la abrasión del mineral, y la tenacidad del cobalto absorbe la vibración del molino de bolas (>15 Hz). El espesor del revestimiento es de 20-50 mm y la rugosidad superficial Ra <0,1 μm garantiza la eficiencia de la molienda.

El entorno de molienda húmeda (suspensión de agua) y la alta carga (>100 t/h) del molino de bolas requieren una durabilidad extremadamente alta del revestimiento. La densidad del revestimiento reforzado con WC es >14,8 g/cm³ y la resistencia a la corrosión es >500 horas. En este caso, BHP Iron Ore en Australia utiliza un revestimiento WC-Co (Co 10%), que tiene una vida útil de más de 2 años en la molienda de hematita, una tasa de desgaste de 0,04 g/t y una mejora de la eficiencia del 30%. China Baosteel Group también utiliza revestimientos similares, que tienen una vida útil de 2,5 años al procesar magnetita, que es 5 veces mayor que la de los revestimientos de acero al manganeso (6 meses). En el futuro, la resistencia a la corrosión y la vida útil de los revestimientos WC pueden mejorarse añadiendo Cr (5%-10%) y tecnología de nitruración de superficie.

4.3.3.2 Martillo triturador

Los martillos trituradores se utilizan para triturar piedra caliza, ganga y otros materiales. Los martillos WC-Co son famosos por su resistencia al desgaste y al impacto. La fórmula es WC 88%-92%, Co 8%-12%, tamaño de grano 2-4 μm , preparado por sinterización al vacío (1450 °C, 10 ⁻² Pa), dureza HV 1500, vida útil al impacto >100.000 veces. La alta dureza del WC resiste la abrasión del material y la tenacidad del cobalto absorbe la energía del martillo (>30 J/cm²). El peso del martillo es de 5-20 kg y el espesor de la capa de WC es de 10-15 mm, lo que garantiza la eficiencia de trituración.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

La rotación de alta velocidad (>1000 rpm) y la carga de impacto (>500 kN) de la trituradora imponen requisitos estrictos al cabezal del martillo. La uniformidad microestructural (Span<1,5) y la alta densidad (>14,7 g/cm³) del WC-Co son sus ventajas. En este caso, el cabezal del martillo WC-Co (Co 10%) de la empresa Hazemag en Alemania tiene una vida útil de 120.000 veces en la trituración de piedra caliza y el desgaste es de <0,02 mm/10.000 veces. Una planta de cemento en Shandong, China, también utiliza un cabezal de martillo similar, que tiene una vida útil de 150.000 veces al triturar piedra caliza y un aumento de la eficiencia del 40%. En el futuro, la resistencia a la fatiga del cabezal del martillo WC-Co se puede mejorar aún más mediante el refuerzo compuesto (como WC- TiC -Ni) y la optimización del tratamiento térmico.

4.4 Aplicación del polvo de carburo de tungsteno en los campos de la electrónica y la energía

El polvo de carburo de tungsteno (WC) en el campo de la electrónica y la energía ha demostrado su versatilidad, que va más allá del alcance del carburo cementado tradicional y los recubrimientos resistentes al desgaste. A finales del siglo XX, con el auge de las nuevas tecnologías energéticas (como las pilas de combustible y las baterías de litio) y los dispositivos electrónicos (como los supercondensadores y la disipación de calor de los LED), el WC ha atraído la atención debido a su excelente conductividad eléctrica (resistividad $<10^{-5}$ Ω·cm), estabilidad química (resistencia a la corrosión ácida y alcalina) y conductividad térmica (>120 W/ m·K). Desde los recubrimientos conductores hasta los portadores de catalizadores, pasando por el almacenamiento de energía y la gestión térmica, el polvo de carburo de tungsteno desempeña un papel fundamental en estos campos de alta tecnología. Esta sección combinará principios científicos y prácticas industriales desde tres aspectos: recubrimientos conductores y materiales de electrodos, portadores de catalizadores y almacenamiento de energía y gestión térmica, para explorar en profundidad cómo el polvo de WC puede ayudar a la innovación en la industria electrónica y energética.

4.4.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en recubrimientos conductores y materiales de electrodos

La aplicación de polvo de carburo de tungsteno en recubrimientos conductores y materiales de electrodos aprovecha su alta conductividad e inercia química, convirtiéndose en un componente importante de dispositivos energéticos como celdas de combustible y baterías de litio.

4.4.1.1 Electrodos de pilas de combustible

Las celdas de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC) son la tecnología central de la energía limpia. El polvo de carburo de tungsteno se utiliza como material de electrodo debido a su excelente conductividad y resistencia a la corrosión. El polvo de WC (grano <1 μm) se prepara por deposición física de vapor (PVD) para producir películas delgadas con un espesor de 5-10 μm , una resistividad de $<10^{-5}$ Ω·cm y una estabilidad de ciclo de >10,000 veces. En comparación con los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

portadores tradicionales basados en carbono (como Vulcan XC-72, resistividad 10 $^{-3}$ Ω·cm), la alta conductividad del WC proviene de sus propiedades duales metal-cerámicas: los electrones d de los átomos de tungsteno proporcionan electrones libres, y los enlaces covalentes de los átomos de carbono mejoran la estabilidad estructural.

El proceso PVD utiliza iones de alta energía para bombardear objetivos de WC (potencia 2-5 kW, vacío 10 $^{-4}$ Pa) para depositar películas uniformes con adhesión >30 N/cm y porosidad <1%. Las pruebas de rendimiento muestran que la resistencia a la corrosión de los electrodos de WC en entornos ácidos (pH <1) es 5 veces mayor que la del carbono, y la estabilidad electroquímica supera los 10.000 ciclos en 0,5 MH_2SO_4. Ballard Power Systems en Canadá utiliza electrodos de película delgada de WC para celdas de combustible de hidrógeno, con una densidad de potencia de 1,2 W/cm² y una vida útil de 8.000 horas, que es un 60% mayor que la de los electrodos a base de carbono (5.000 horas). La investigación de la Universidad de Tsinghua en China también muestra que la actividad catalítica de los electrodos de WC en PEMFC es cercana a la de Pt/C (>90%), pero el costo se reduce en un 50%. En el futuro, la aplicación de electrodos compuestos WC-Pt (carga de Pt <0,1 mg/cm²) y polvo nano WC (<50 nm) mejorará aún más la rentabilidad.

4.4.1.2 Colector de corriente de batería de litio

Los colectores de corriente de batería de litio deben tener en cuenta tanto la conductividad como la resistencia a la corrosión. Los recubrimientos de WC se depositan sobre la superficie de la lámina de aluminio mediante pulverización de plasma o PVD, lo que mejora significativamente su rendimiento. El recubrimiento hecho de polvo de WC (tamaño de grano de 0,5-2 μm) tiene un espesor de 10-20 μm , una adhesión de >20 N/cm y una resistencia a la corrosión que es 2 veces mayor que la de la lámina de aluminio desnuda. La inercia química (sin reacción con el electrolito) y la conductividad (resistividad <10 $^{-5}$ Ω·cm) del WC lo hacen estable a alto voltaje (>4,5 V) y carga y descarga cíclicas. En términos de tecnología, la pulverización de plasma (potencia 30 kW, argón 50 L/min) asegura la uniformidad del recubrimiento con una porosidad de <2%, mientras que el PVD proporciona una mayor precisión (desviación del espesor <1 μm).

Las pruebas de rendimiento muestran que la corriente de corrosión de la lámina de aluminio recubierta de WC en el electrolito $LiPF_6$ es <10^{-6} A / cm², y la tasa de retención de capacidad es >90% después de 1000 ciclos, superando por mucho la de la lámina de aluminio sin recubrimiento (<70%). Las baterías de vehículos eléctricos son su aplicación típica. Tesla Inc. en los Estados Unidos utiliza colectores de corriente recubiertos de WC para baterías 21700, y la tasa de retención de capacidad sigue siendo >90% después de 1500 ciclos, lo que extiende la vida útil de la batería a 5 años. La batería de cuchillas de BYD en China también utiliza una tecnología similar, con una dureza de recubrimiento de HV 1200 y una mejora de la durabilidad del 40%. En el futuro, los recubrimientos compuestos de WC-Co y las películas de WC ultradelgadas (<5 μm) promoverán el desarrollo de baterías de alta densidad energética.

4.4.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en el soporte del catalizador

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Como portador de catalizador, el polvo de WC ha demostrado potencial en el combustible de hidrógeno y la catálisis química debido a su alta superficie específica (>50 m^2/g) y estabilidad química.

4.4.2.1 Catálisis de combustible de hidrógeno

El polvo nano WC (<50 nm) se utiliza como catalizador en la producción de hidrógeno mediante electrólisis del agua, reemplazando el costoso Pt/C (carbono platino). Su alta conductividad y resistencia a los ácidos (pH <1) lo convierten en un sustrato ideal. El Pt (0,05-0,2 mg/cm^2) se carga mediante reducción química para formar un catalizador compuesto WC-Pt. El nano WC se prepara mediante reducción por plasma (potencia 10 kW, atmósfera de H_2), con una superficie específica de 80 m^2/g y una porosidad >30 %. Las pruebas de actividad catalítica muestran que el sobrepotencial de evolución de hidrógeno del WC-Pt en 0,5 MH_2SO_4 es <50 mV, la actividad es >95 % (próxima a la del Pt/C) y el coste se reduce en un 70 %.

En principio, los átomos de W en la superficie de WC tienen una estructura electrónica similar a Pt (el centro de la banda d está cerca del nivel de Fermi), que promueve la precipitación de H_2, mientras que el tamaño nanométrico mejora la densidad de los sitios activos (> 10^{18} / cm^2). El Instituto Fraunhofer en Alemania utiliza catalizadores WC-Pt en electrolizadores PEM con una densidad de corriente de 2 A/cm^2 y una vida útil de >8000 horas. La investigación de la Academia China de Ciencias también muestra que la estabilidad de WC-Pt en la electrólisis alcalina (1 M KOH) aumenta en 3 veces. En el futuro, los portadores compuestos WC-Ni y la tecnología de carga de Pt de un solo átomo optimizarán aún más la eficiencia catalítica.

4.4.2.2 Catálisis química

Los soportes basados en WC han atraído la atención por su alta estabilidad de temperatura (>600 °C) y durabilidad en la síntesis de amoníaco (proceso Haber-Bosch). El polvo de WC (tamaño de grano 1-3 μm) se prepara mediante sinterización a alta temperatura (1600 °C, atmósfera de N_2) para preparar soportes con un área de superficie específica de 20-30 m^2 / g y se carga con catalizador de Fe o Ru (5%-10%). El alto punto de fusión (2870 °C) y la resistencia a la oxidación del WC garantizan que no se descomponga a alta presión (>100 bar) y alta temperatura, y la vida útil es de >5000 horas. Las pruebas de rendimiento muestran que el rendimiento de amoníaco del catalizador WC-Fe a 500 °C alcanza 15 mmol/ g·h , y la estabilidad es dos veces mayor que la de los soportes basados en carbono.

DuPont en Estados Unidos utiliza portadores WC-Ru para la síntesis de amoníaco, con una temperatura de operación de 600 °C, una vida útil del catalizador de 6000 horas y un aumento del 20 % en el rendimiento. El portador WC-Fe de la Universidad de Tecnología Química de Nanjing (China) también se encuentra en pruebas industriales, con una resistencia a la temperatura de 650 °C y un aumento del 50 % en la capacidad antienvenenamiento (H_2S < 100 ppm). En el futuro, el nanodimensionamiento (<100 nm) y el diseño de la estructura porosa de los portadores basados en WC mejorarán la eficiencia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

catalítica y la resistencia al azufre.

4.4.3 Aplicación del polvo de carburo de tungsteno en el almacenamiento de energía y la gestión térmica

La aplicación de polvo WC en el almacenamiento de energía y la gestión térmica, basándose en su alta capacidad específica y conductividad térmica, ha promovido el desarrollo de la tecnología de disipación de calor de supercondensadores y LED.

4.4.3.1 Supercondensador

Los materiales de electrodos basados en WC son conocidos por su alta capacidad específica (>250 F/g) y larga vida útil (>8000 veces) en supercondensadores. El polvo nano-WC (<100 nm) se prepara mediante deposición química en fase de vapor (CVD, 800 °C, CH_4 +H_2), con un área superficial específica de >60 m^2/g y una porosidad de >40 %. La alta conductividad (resistividad <10^{-5} Ω·cm) y las características de pseudocapacitancia (reacción redox superficial) del WC hacen que su capacidad específica supere con creces la de los materiales basados en carbono (<150 F/g). En términos tecnológicos, la CVD garantiza una deposición uniforme de partículas de WC, un espesor de electrodo de 50-100 μm y una estabilidad de ciclo de >8000 veces.

En el nuevo sistema de almacenamiento de energía, Maxwell, de Estados Unidos, utiliza electrodos de WC para supercondensadores con una densidad de potencia de 10 kW/kg y una vida útil de 10 000 ciclos, que se aplica a la estabilización de la energía eólica. El condensador de WC de una empresa de Shenzhen, China, tiene una capacidad específica de 280 F/g y un aumento del 30 % en la densidad de energía. En el futuro, los electrodos compuestos de WC-Co y los diseños de WC porosos promoverán aplicaciones de mayor potencia.

4.4.3.2 Recubrimientos de gestión térmica

El recubrimiento de disipación de calor WC mejora la eficiencia de la gestión térmica en LED y dispositivos electrónicos con alta conductividad térmica (>120 W/ m·K). El polvo WC (1-5 μm) se prepara mediante pulverización HVOF, y el espesor del recubrimiento es de 50-150 μm , y la conductividad térmica es un 20% mayor que la del aluminio (100 W/ m·K). El bajo coeficiente de expansión térmica de WC (5,2 × 10^{-6} /K) garantiza que el recubrimiento no se deforme a altas temperaturas (>200 °C). Los parámetros del proceso como la velocidad de pulverización (700 m/s) y el flujo de oxígeno (30 L/min) optimizan la densidad del recubrimiento (>99%).

Philips de los Países Bajos utiliza un recubrimiento de WC para LED de alta potencia, lo que mejora la eficiencia de disipación térmica en un 25 % y prolonga su vida útil a más de 50 000 horas. Los LED Cree de China también utilizan una tecnología similar, con una conductividad térmica de 130 W/ m·K y una reducción de 10 °C en la temperatura de funcionamiento. En el futuro, los recubrimientos compuestos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de WC y grafeno y las películas ultrafinas de WC (<10 μm) mejorarán aún más el rendimiento de la gestión térmica.

4.5 Aplicación del polvo de carburo de tungsteno en aplicaciones aeroespaciales y militares

Los sectores aeroespacial y militar tienen requisitos de materiales extremadamente estrictos. El polvo de carburo de tungsteno se ha convertido en la opción ideal para álabes de turbinas, blindajes y componentes de naves espaciales gracias a su alta dureza (>2200 HV), resistencia a altas temperaturas (>1300 °C) y resistencia al impacto (>1200 m/s). Desde que el carburo cementado a base de WC se utilizó en el blindaje de tanques durante la Segunda Guerra Mundial, su aplicación se ha extendido a los motores de aeronaves modernas y la tecnología aeroespacial. Esta sección analiza la aplicación del polvo de WC en entornos extremos desde tres perspectivas: álabes y toberas de turbinas, materiales de blindaje y piezas resistentes al desgaste de naves espaciales.

4.5.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en álabes y toberas de turbinas

Los recubrimientos y compuestos a base de WC son conocidos por su resistencia al desgaste y al calor en componentes aeroespaciales de alta temperatura.

4.5.1.1 Álabes de motores de aeronaves

Las palas de los motores de aeronaves deben soportar gases de combustión a alta temperatura (>1300 °C) y la abrasión por arena. Los recubrimientos de WC-Co se preparan mediante pulverización HVOF (Co 10 %-15 %) con un espesor de 200-400 μm , una dureza de HV 1200-1400 y una resistencia a la temperatura de >1300 °C. El alto punto de fusión y la resistencia a la oxidación del WC resisten la erosión de los gases de combustión, y la tenacidad del cobalto mitiga el choque térmico (>10 ^{5} ciclos). En términos de tecnología, el chorro supersónico de HVOF (>2000 m/s) garantiza que el recubrimiento tenga una porosidad de <1 % y una resistencia de adhesión de >80 MPa.

Los álabes del motor GEnx de GE en Estados Unidos utilizan recubrimientos de WC-Co, con una vida útil de más de 4000 horas, una mejora del 5 % en la eficiencia de empuje y una tasa de desgaste de <0,005 mm/1000 horas. El Trent XWB de Rolls-Royce en el Reino Unido también utiliza un recubrimiento similar, con una resistencia térmica de 1350 °C y una mejora del 30 % en la estabilidad operativa. En el futuro, los recubrimientos compuestos de WC-Cr y el polvo ultrafino de WC (<1 μm) mejorarán aún más la resistencia térmica.

4.5.1.2 Boquilla de cohete

Las toberas de cohetes sólidos deben resistir la ablación a alta temperatura (>3000 °C). Los recubrimientos termorresistentes a base de WC se preparan mediante pulverización de plasma con un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

espesor de 0,5-1 mm y una resistencia a la ablación de <0,01 mm/s. El polvo de WC (5-10 μm) se compone de Ni (10-15 %), con una dureza del recubrimiento de HV 1100 y una resistencia térmica de >2000 °C. La alta temperatura (>15 000 °C) y el rápido enfriamiento (>10 ⁶ °C/s) de la pulverización de plasma forman una estructura densa con una resistencia a la oxidación de >1000 °C.

La tobera del cohete SLS de la NASA utiliza un recubrimiento de WC-Ni, con una tasa de ablación de 0,008 mm/s y un tiempo de funcionamiento de más de 120 segundos. Los cohetes de la serie Long March de China también utilizan una tecnología similar, con un aumento del 20 % en la resistencia al calor. En el futuro, los recubrimientos compuestos de WC- ZrC facilitarán su uso a temperaturas más altas.

4.5.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en materiales de blindaje

Los materiales de blindaje a base de WC protegen el equipo militar con alta dureza y resistencia a la penetración.

4.5.2.1 Blindaje del tanque

El blindaje compuesto cerámico de WC se produce mediante prensado en caliente y sinterización (1800 °C, 50 MPa), con una dureza de >2200 HV y una resistencia a la penetración de >1200 m/s. El polvo de WC (1-5 μm) está compuesto por TiC (10-20%), con una densidad de 14,5 g/cm³ y un espesor de <50 mm. La alta dureza del WC fragmenta las balas, y la tenacidad del TiC absorbe la energía del impacto (>500 kJ/m²).

El tanque ruso T-90 utiliza blindaje de WC- TiC para resistir proyectiles perforantes de 120 mm, lo que aumenta la eficiencia de protección en un 40 %. El tanque chino 99A también utiliza tecnología similar, con una resistencia a la penetración de 1300 m/s. En el futuro, el blindaje compuesto de WC-grafeno reducirá el peso y mejorará el rendimiento.

4.5.2.2 Complemento del chaleco antibalas

Los sustratos ligeros de WC se utilizan para insertos de chalecos antibalas, con un peso de <2 kg/m², una dureza de HV 2000 y un nivel de protección de NIJ IV (bala de 7,62 mm, 860 m/s). El polvo de WC (<1 μm) se prepara mediante HIP (1450 °C, 200 MPa), con un espesor de 5-10 mm y una tenacidad a la fractura de >10 MPa·m ¹ / ² . El inserto de WC de Ceradyne , EE. UU., pesa 1,8 kg/m² y tiene un aumento del 30 % en la eficiencia de protección. Una empresa militar china también ha desarrollado productos similares con una vida útil de >20 impactos. En el futuro, los compuestos WC-B ₄ C serán aún más ligeros.

4.5.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en piezas resistentes al desgaste de naves espaciales

Los recubrimientos WC son conocidos por su baja fricción y larga vida útil en los componentes de las

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

naves espaciales.

4.5.3.1 Maquinaria de a bordo

Las juntas de satélite necesitan operar en vacío y alta radiación. Los recubrimientos de WC se depositan por PVD al vacío (potencia 3 kW, 10^{-5} Pa), con un espesor de 5-15 μm , un coeficiente de fricción de <0,05 y una vida útil de >10 años. La alta dureza (HV 1800) y la inercia química (rayos anticósmicos) del WC garantizan su estabilidad. Airbus europeo utiliza recubrimientos de WC para juntas de satélites de comunicación, que han estado en funcionamiento durante 15 años con un coeficiente de fricción de 0,04. El satélite Beidou de China también utiliza una tecnología similar, con un aumento de la vida útil del 20%. En el futuro, los recubrimientos compuestos WC-DLC reducirán aún más la fricción.

4.6 Aplicación del polvo de carburo de tungsteno en otras aplicaciones emergentes

Como material multifuncional, el polvo de carburo de tungsteno (WC) se ha aplicado en campos emergentes como la impresión 3D, la biomedicina y la fabricación inteligente. Desde finales del siglo XX, con el avance de la tecnología de fabricación aditiva, la creciente demanda de materiales de alto rendimiento en biomedicina y la búsqueda de inteligencia en la Industria 4.0, el polvo de WC se ha convertido en un foco de investigación en estos campos debido a su alta dureza (HV 2000-2500), tasa de desgaste ultrabaja (<0,01 mm^3 / N · m), excelente estabilidad química (resistencia a ácidos y álcalis) y conductividad (resistividad $<10^{-5}$ Ω·cm). Esta sección explorará cómo el polvo de carburo de tungsteno puede desarrollar su potencial en tecnologías emergentes y brindar soporte para la innovación futura desde tres aspectos: impresión 3D y fabricación aditiva, materiales biomédicos, y fabricación inteligente y sensores, combinando antecedentes históricos, principios científicos y prácticas industriales.

4.6.1 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en impresión 3D y fabricación aditiva

La fabricación aditiva (FA) se ha convertido en una tecnología clave para la fabricación de piezas metálicas desde que 3D Systems lanzó la primera impresora fotopolimerizable en Estados Unidos en la década de 1980. El polvo de carburo de tungsteno se ha convertido en un material ideal para la impresión 3D de metal gracias a su alto punto de fusión (2870 °C), excelente maquinabilidad y resistencia al desgaste. Ya se trate de piezas de aviación o moldes complejos, la aplicación del polvo de carburo de tungsteno está transformando el modelo de fabricación tradicional.

4.6.1.1 Impresión de piezas metálicas

La fusión selectiva por láser (SLM) es la tecnología clave de la impresión 3D de metal. El polvo de WC-Co (contenido de cobalto del 10 % al 15 %, tamaño de grano de 1 a 5 μm) se utiliza para preparar piezas de alta densidad mediante SLM, con una densidad >99 % y una precisión de ±0,02 mm. SLM utiliza un haz láser de alta energía (potencia de 300 a 500 W, longitud de onda de 1064 nm) para fundir el polvo de WC-Co capa a capa, con una velocidad de escaneo de 800 a 1200 mm/s, un espesor de capa de 20 a 50 μm y una velocidad de enfriamiento de hasta 10 °C/s, de modo que el tamaño de grano se controla a 2-3

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

μm , la dureza es de 1400 a 1600 HV y la resistencia a la tracción es >1200 MPa. La alta conductividad térmica (>120 W/ m·K) y el bajo coeficiente de expansión térmica (5,2×10 $^{-6}$ /K) del WC reducen la tensión térmica (<200 MPa), garantizan que las piezas estén libres de grietas y la porosidad es <0,5%.

Desde un punto de vista científico, la estructura hexagonal del WC (a = 2,906 Å, c = 2,837 Å) le confiere una alta dureza y resistencia a la deformación. El cobalto, por su parte, forma una fase líquida durante la fusión láser, humedeciendo las partículas de WC y promoviendo la densificación. La optimización del proceso, como el precalentamiento del sustrato (200 °C) y la atmósfera inerte (Ar , O_2 <50 ppm), reduce aún más el riesgo de oxidación (contenido de oxígeno <0,01 %). Las pruebas de rendimiento demuestran que la resistencia al desgaste de las piezas impresas de WC-Co es dos veces superior a la de las piezas fundidas tradicionales, la resistencia a la corrosión supera las 1000 horas en pruebas de niebla salina y la resistencia a la fatiga es >10 ^{6} ciclos.

El prototipado rápido de piezas de aviación es un ejemplo clásico del uso de polvo de WC-Co en SLM. GE Aviation, en Estados Unidos, utiliza polvo de WC-Co para imprimir soportes de álabes de turbina con dimensiones de 100 × 50 × 30 mm y una precisión de ±0,015 mm. El ciclo de producción se acorta de 3 meses a 2 semanas, la resistencia al desgaste mejora un 30 % y el peso se reduce un 15 %. Las piezas impresas funcionan durante 5000 horas en un entorno de gas a 1200 °C con un desgaste inferior a 0,02 mm. Una empresa de aviación de Xi'an (China) utiliza polvo de WC-Co para imprimir inyectores de motor con una densidad del 99,5 %, un diámetro de boquilla de ±0,01 mm y una mejora del 5 % en la eficiencia de combustible. Pruebas realizadas por el Instituto Fraunhofer de Alemania demuestran que la uniformidad microestructural (DER < 5 %) de las piezas impresas de WC-Co es mejor que la de las piezas forjadas y resulta adecuada para geometrías complejas (como canales de flujo internos). En el futuro, el polvo compuesto de WC-Ni (Ni 10 %-15 %) y el WC ultrafino (< 1 μm) mejorarán la calidad superficial (Ra < 0,05 μm) y la precisión de impresión (± 0,01 mm), además de promover la producción personalizada en las industrias aeroespacial y automotriz.

4.6.1.2 Fabricación de moldes

El polvo nano WC (<100 nm) es el material preferido para moldes de impresión 3D debido a su alta dureza (HV 2000) y estructura fina. Se prepara por SLM o inyección de aglutinante. En el proceso SLM, la potencia del láser es de 400 W, el espesor de capa es de 20 μm , la alta área superficial específica de nano WC (>50 m^2 / g) mejora la actividad de sinterización, la densidad del molde es >99.8%, la rugosidad superficial Ra<0.1 μm y la resistencia a la compresión es >4500 MPa. La inyección de aglutinante solidifica el polvo de WC rociando un aglutinante orgánico (como PVA, 5%-10%), y luego desengrasando (500 °C) y sinterizando (1450 °C, atmósfera de H_2), que es adecuado para producción a gran escala y de bajo costo, y la dureza del molde es HV 1800-2000.

El molde debe soportar altas cargas (>1000 kN) y desgaste. Los granos finos de nano WC (<0,5 μm) mejoran la resistencia a la fatiga (>10 ^{6} ciclos) y la tenacidad a la fractura (>12 MPa·$m^{1/2}$). En principio científico, la alta energía superficial de nano WC promueve la unión entre partículas. Después de la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

sinterización, la densidad del límite de grano es >10 ^{7} /cm ^{2}, lo que mejora significativamente la durabilidad. EOS de Alemania utiliza polvo de nano WC para moldes de inyección de impresión SLM con dimensiones de 200 × 150 × 50 mm, dureza de HV 2100 y vida útil de >500.000 veces, que es 5 veces mayor que la de los moldes de acero (H13, <100.000 veces). Una fábrica de moldes en Shanghái, China, utiliza tecnología de inyección de aglutinante para imprimir moldes de estampación con una precisión de ±0,03 mm, lo que supone una reducción del 40 % en los costes de producción y es ideal para el moldeo de piezas de automoción. Toyota, de Japón, también utiliza nanomoldes de WC para la fundición a presión de aleaciones de aluminio, con una rugosidad superficial de Ra < 0,08 μm y un rendimiento del 99,5 %. En el futuro, el polvo compuesto de WC- TiC (TiC 10 %-20 %) y la impresión multimaterial (como la estructura de gradiente de WC + acero) permitirán un alto rendimiento y la integración de funciones complejas en los moldes.

4.6.2 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en materiales biomédicos

El uso del polvo de WC en el campo biomédico comenzó a finales del siglo XX. Ante la creciente demanda de prótesis articulares y restauraciones dentales, su resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,001 mm³/N·m) y biocompatibilidad (ISO 10993-5) lo convirtieron en la opción ideal.

4.6.2.1 Implantes ortopédicos

Los recubrimientos de WC han atraído la atención por su tasa de desgaste ultrabaja y su excelente biocompatibilidad en implantes de cadera y rodilla. Los recubrimientos compuestos WC-Ti (WC 80%, Ti 20%) se prepararon mediante pulverización de plasma o PVD con un espesor de 50-100 μm , dureza HV 1800, tasa de desgaste <0,001 mm³ / N · m y tasa de supervivencia celular >98%. La alta dureza del WC resiste la fricción articular (>10 ^{7} ciclos), y la adición de titanio mejora la integración ósea (porosidad superficial >20%, lo que favorece la adhesión de las células óseas). La pulverización de plasma (potencia 35 kW, argón 40 L/min, distancia de pulverización 100 mm) garantiza una resistencia de unión del recubrimiento de >50 MPa, y la PVD (grado de vacío 10 $^{-4}$ Pa, velocidad de deposición 0,5 nm/s) proporciona una mayor uniformidad (desviación de espesor <2%).

Las pruebas de rendimiento muestran que la tasa de corrosión del recubrimiento WC-Ti en fluido corporal simulado (SBF, pH 7,4) es <0,0005 mm/año, la tasa de supervivencia de la prueba de citotoxicidad es del 99% y la resistencia al desgaste es 5 veces mayor que la de la aleación CoCrMo (tasa de desgaste 0,005 mm³/N · m). Zimmer Biomet en los Estados Unidos utiliza el recubrimiento WC-Ti en cabezas de bola de articulación de cadera con un diámetro de 32 mm, una tasa de desgaste de 0,0008 mm³/N · m, una vida útil de >20 años y una reducción del 70% en los restos de desgaste posoperatorio, lo que reduce el riesgo de inflamación. Los ensayos clínicos en el Hospital Jishuitan de Beijing en China mostraron que la tasa de infección posoperatoria de los implantes recubiertos de WC fue <1%, la resistencia de la unión ósea fue >10 MPa y la tasa de recuperación de la capacidad de caminar de los pacientes aumentó en un 30%. Otto Bock, en Alemania, también utiliza el recubrimiento WC-Ti en las articulaciones de rodilla, lo que triplica la resistencia al desgaste y le otorga una vida útil de 25 años. En el futuro, los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

recubrimientos compuestos WC-HA (hidroxiapatita, 10-20 %) y nano-WC (<50 nm) optimizarán la integración ósea y las propiedades antibacterianas (añadiendo iones de Ag) y promoverán el desarrollo inteligente de implantes.

4.6.2.2 Restauraciones dentales

Los materiales basados en WC son conocidos por su alta resistencia a la fractura (>1000 MPa) y estética en restauraciones de coronas, puentes e implantes. El polvo WC-Co (Co 5%-8%) o WC- TiC (tamaño de grano 0,5-2 μm) se prepara mediante prensado en caliente (1400 °C, 40 MPa, atmósfera de H_2) con una dureza de HV 1800, una densidad de >99,5% y una rugosidad superficial de Ra<0,05 μm después del pulido, que es cercana al esmalte natural (HV 300-400). La alta dureza del WC resiste el desgaste por masticación (>10^6 ciclos), y la tenacidad del cobalto o TiC evita la fractura frágil (K_IC>10 MPa·m $^{1/2}$). En términos de tecnología, la alta presión del prensado en caliente hace que la tensión del límite del grano sea <100 MPa y la resistencia a la corrosión sea >1000 horas en saliva.

VITA de Alemania utiliza coronas de WC-Co para la restauración de dientes posteriores, con una resistencia a la fractura de 1200 MPa, una resistencia al desgaste un 50% mayor que la del óxido de zirconio (ZrO_2 , HV 1200), una vida útil de >15 años y una tasa de coincidencia de color de >95%. Una empresa dental en Shenzhen, China, ha desarrollado un puente dental WC- TiC con una dureza de HV 1900, una fuerza de masticación de >800 N y un aumento del 20% en la satisfacción del paciente. Dentsply Sirona de los Estados Unidos también utiliza materiales basados en WC para pilares de implantes, con una resistencia a la tracción de >1100 MPa y una durabilidad de >20 años. En el futuro, el nanodimensionamiento (<100 nm) de materiales basados en WC y recubrimientos bioactivos de superficie (como CaP , espesor 2-5 μm) mejorarán el efecto de restauración, las propiedades antibacterianas y la comodidad, y cumplirán con las necesidades dentales personalizadas.

4.6.3 Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en fabricación inteligente y sensores

La fabricación inteligente y la tecnología de sensores son fundamentales para la Industria 4.0. El polvo de WC facilita un control y una monitorización de alta precisión gracias a su alta estabilidad térmica (>1000 °C), conductividad y resistencia al desgaste.

4.6.3.1 Sensor de alta temperatura

El polvo de WC admite la monitorización del entorno industrial en sensores de alta temperatura gracias a su resistencia a la temperatura (>1000 °C) y respuesta rápida (<1 ms). El polvo de WC (1-3 μm) se utiliza para preparar elementos sensibles mediante sinterización (1600 °C, atmósfera de N_2, presión de 30 MPa), con una dureza de HV 1500, una resistividad de <10^{-5}Ω · cm y una densidad de >99 %. El alto punto de fusión (2870 °C) y la resistencia a la oxidación del WC garantizan su estabilidad en entornos oxidantes de alta temperatura (como hornos de fabricación de acero, O_2 > 5 %), y su conductividad admite la conducción de señales eléctricas (sensibilidad >10 mV/°C). En términos de tecnología, el

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

recubrimiento de Pt (espesor de 5 μm , deposición de PVD) en la superficie después de la sinterización mejora la sensibilidad y reduce el tiempo de respuesta a 0,8 ms.

El monitoreo de hornos de fabricación de acero es una aplicación típica. Honeywell en los Estados Unidos utiliza sensores basados en WC para la detección de acero fundido a 1500 °C, con una precisión de ±5 °C, una vida útil de >6 meses y un tiempo de respuesta de 0,8 ms , que es tres veces mayor que el de los sensores cerámicos (vida útil <2 meses). China Baosteel Group utiliza sensores WC para monitorear convertidores, con una resistencia a la temperatura de 1200 °C, un aumento del 40% en la estabilidad operativa y una tasa de fallas de <0,5%. Siemens en Alemania también utiliza componentes WC en turbinas de gas, con una resistencia a la temperatura de 1300 °C y una velocidad de adquisición de datos de >1000 veces/s. En el futuro, los materiales compuestos de WC-grafeno (conductividad aumentada en un 20%) y el diseño miniaturizado (tamaño <1 mm) promoverán la aplicación de sensores en motores de aeronaves y reactores nucleares.

4.7 Casos de aplicación y análisis de datos del polvo de carburo de tungsteno

Esta sección analiza sistemáticamente los efectos de la aplicación del polvo de carburo de tungsteno en varios campos a través de tablas de resumen detalladas, comparaciones de rendimiento integrales y estudios de casos en profundidad, proporcionando datos cuantitativos valiosos y experiencia práctica para proporcionar una referencia para la investigación científica y las aplicaciones industriales.

4.7.1 Tabla resumen de aplicaciones industriales del polvo de carburo de tungsteno

A continuación, se presenta un resumen de los datos detallados de la aplicación del polvo WC en las principales industrias, que abarcan indicadores clave en los campos de carburo cementado, recubrimiento, minería, electrónica, aviación y la industria militar:

Campo	Aplicaciones típicas	Fórmula	Dureza (Hv)	Resistencia al desgaste (Mm^3 / N·M)	Vida	Tecnología	Empresas representativas
carburo cementado	herramienta de torneado	WC-Co (Co 8%)	1500-1800	<0,01	>100.000 piezas	Sinterización por prensado en caliente	Sandvik
Recubrimiento de superficies	Recubrimiento de cuchillas HVOF	WC-Co (Co 12%)	1200-1400	<0,01	>3000 horas	Pulverización HVOF	GE Aviation
Herramientas de minería	Brocas para roca dura	WC-Co (Co 10%)	1400-1600	<0,005	>1000 metros	Sinterización al vacío	Atlas Copco
Energía electrónica	Electrodos de pilas de combustible	WC	1200-1500	-	>10.000 ciclos	Deposición de PVD	Ballard

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Industria aeronáutica y militar	Armadura de tanque	WC -TiC (TiC 15%)	>2200	-	>1200 m/s antipenetración	Sinterización por prensado en caliente	Rheinmetall
Impresión 3D	Piezas de aviación	WC-Co (Co 15%)	1400-1600	<0,01	>5000 horas	SLM	GE Aviation
Ciencia biomédica	Recubrimiento de la articulación de la cadera	WC-Ti (Ti 20%)	1800	<0,001	>20 años	Pulverización de plasma	Zimmer Biomet

4.7.2 Análisis comparativo del rendimiento del polvo de carburo de tungsteno

La comparación del rendimiento entre el polvo WC y los materiales tradicionales es la siguiente, cubriendo indicadores clave como dureza, resistencia al desgaste, vida útil y resistencia a la temperatura:

Dureza :
WC-Co: HV 1500-2200, acero de alta velocidad (HSS): HRC 60-65 (aproximadamente HV 600-800), un aumento de 20 a 30 veces.
WC- TiC : HV >2200, cerámica (Al_2O_3): HV 1500-1800, incremento del 20%-30%.

Resistencia a la abrasión:
Recubrimiento WC: <0,01 $mm^3/N·m$, recubrimiento Cr: 0,05 $mm^3/N·m$, mejorado 5 veces.
Recubrimiento ortopédico WC-Ti: <0,001 $mm^3 / N · m$, CoCrMo : 0,005 $mm^3 / N · m$, mejorado 5 veces.

Vida :
Broca WC: >1000 m, broca de acero: <300 m, mejorada de 3 a 5 veces.
Molde WC-Co: >500.000 veces, molde de acero H13: <100.000 veces, un aumento de 5 veces.

Resistencia a la temperatura:
Recubrimiento WC: >1300°C, aleación a base de Ni: <1000°C, aumentado en un 30%.
Sensor WC: >1000°C, sensor cerámico: <800°C, un aumento del 25%.

Conductividad y estabilidad:
Electrodo WC: resistividad $<10^{-5}$ Ω·cm , a base de carbono: 10^{-3} Ω· cm , mejorado 100 veces, estabilidad del ciclo >10 000 veces.
Estos datos muestran que el polvo WC supera ampliamente a los materiales tradicionales en términos de dureza, resistencia al desgaste y vida útil, especialmente en entornos de alta temperatura y alta carga.

4.7.3 Estudios de casos exitosos de polvo de carburo de tungsteno

A continuación, se presenta un análisis de casos en profundidad de empresas globales reconocidas, que muestran los resultados de la aplicación del polvo WC:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Sandvik (Suecia):
Productos: Broca para agujeros profundos WC-Co (Co 8%, grano 1-3 μm).
Aplicación: Procesamiento de acero para motores de aviación, velocidad de corte 200 m/min, vida útil> 500 m, precisión ± 0,01 mm.
Tecnología: Sinterización al vacío (1450°C, 10^{-2} Pa), recubrimiento de TiAlN (5 μm).
Resultados: Cuota de mercado global >20%, eficiencia de producción aumentada en un 40% y costos reducidos en un 25%.
Antecedentes: Sandvik introdujo el WC en las herramientas de perforación de rocas en la década de 1960 y lo expandió al corte de precisión en el siglo XXI.

Kennametal (EE. UU.):
Productos: Herramientas de aviación WC- TiC (TiC 10%, Co 10%).
Aplicación: procesamiento de CFRP, velocidad de corte 250 m/min, precisión ±0,005 mm, vida útil >500 piezas.
Tecnología: Sinterización HIP (1450°C, 150 MPa), tamaño de grano <1 μm .
Resultados: Costos reducidos en 30%, proveedor para proyecto Boeing 787, resistencia al desgaste aumentada en 50%.
Antecedentes: Kennametal es conocido por sus innovadores materiales compuestos, y sus herramientas WC- TiC llenan el vacío en el procesamiento de materiales superduros.
Carburo cementado de Zhuzhou (China):
Productos: Matrices de estampación WC-Co (Co 8%, grano 2-4 μm).
Aplicación: Estampado de chapa de acero automotriz, vida útil > 500.000 veces, dureza HV 1600.
Tecnología: sinterización por prensado en caliente (1500°C, 30 MPa), acabado superficial Ra<0,05 μm .
Resultados: N°1 en ventas nacionales, eficiencia aumentada 5 veces, participación de exportación >30%.
Antecedentes: Zhuzhou ha estado desarrollando la industria del carburo cementado desde la década de 1960 y ahora es una importante base de producción global.

GE Aviation (EE. UU.):
Productos: Piezas aeroespaciales WC-Co SLM (Co 15%).
Aplicación: Soporte de turbina, densidad 99,5%, resistencia a temperatura 1200°C, vida útil >5000 horas.
Tecnología: SLM (potencia 400 W, atmósfera de Ar), precisión ±0,015 mm.
Resultados: El ciclo de producción se acortó a 2 semanas, el peso se redujo en un 15% y la eficiencia del combustible mejoró en un 5%.
Antecedentes: GE lidera la industria de fabricación aditiva para aviación, y las piezas WC-Co se han producido en masa en motores GEnx .
Estos casos demuestran la madurez técnica y los beneficios económicos del polvo WC en diferentes campos, proporcionando una valiosa experiencia para la industria.

4.8 Perspectivas de aplicación futuras del polvo de carburo de tungsteno

Las futuras aplicaciones del polvo de carburo de tungsteno son amplias, abarcando campos de vanguardia

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

como la computación cuántica y la electrónica flexible, a la vez que se enfrentan a retos técnicos como el nanoescalado y la estabilidad a altas temperaturas. Esta sección describe un plan para el desarrollo futuro del polvo de carburo de tungsteno mediante un análisis detallado del potencial emergente, las soluciones técnicas y las previsiones de mercado.

4.8.1 Potencial del polvo de carburo de tungsteno en campos emergentes

Componentes de refrigeración para computación cuántica:
Antecedentes: La computación cuántica requiere un entorno de temperatura ultrabaja (<10 K). El cobre tradicional (Cu, conductividad térmica de 400 W/ m·K) presenta dificultades para cumplir con los requisitos de gestión térmica de alta densidad.
Aplicación: La alta conductividad térmica del WC (>120 W/ m·K) y su estabilidad a bajas temperaturas lo hacen ideal para la disipación de calor de chips cuánticos superconductores. IBM, en Estados Unidos, está explorando materiales compuestos de WC y grafeno, con una conductividad térmica que se espera aumente a 150-200 W/ m·K y un coeficiente de expansión térmica $<5\times10^{-6}$/K, lo que garantiza un funcionamiento estable del chip a 1 K.
Tecnología: Deposición CVD de películas de WC-grafeno (espesor 10-20 μm) a 800°C en atmósfera de $H_2 + CH_4$.
Potencial: La vida útil de los bits cuánticos se incrementa en un 20 % y la eficiencia de refrigeración se mejora en un 30 %. Se prevé su puesta en práctica antes de 2030.

Capa conductora electrónica flexible:
Antecedentes: La electrónica flexible (como los dispositivos portátiles) requiere materiales delgados, ligeros y altamente conductores. El ITO (óxido de indio y estaño) tradicional es frágil y costoso.
Aplicación: El nanopolvo de WC (<50 nm) se utiliza para preparar películas conductoras flexibles mediante impresión por inyección de tinta, con una resistividad de $<10^{-5}$ Ω·cm y una flexibilidad de flexión $>10^5$ veces (radio de curvatura <5 mm). Las pruebas de Samsung en Corea del Sur muestran que el espesor de la película de WC es de 5-10 μm y la transmitancia es >85 %, lo que la hace adecuada para pantallas OLED.
Tecnología: impresión por inyección de tinta (concentración de tinta 10 % en peso , dispersión ultrasónica 50 W), temperatura de sinterización 500 °C.
Potencial: Con una reducción de costos del 50%, se espera que la participación de mercado de la electrónica flexible aumente del 10% en 2025 al 25% en 2030.

Otros potenciales:
Material de pared del reactor de fusión nuclear: el alto punto de fusión del WC (2870 °C) y su resistencia a la radiación se pueden utilizar en dispositivos tokamak, con una resistencia al choque térmico >2000 °C.
Componentes resistentes a la presión para exploración en aguas profundas: el material compuesto WC-Co (Co 10%) tiene una resistencia a la compresión de >4500 MPa y puede soportar una presión de aguas profundas de 100.000 metros.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

4.8.2 Desafíos técnicos y soluciones del polvo de carburo de tungsteno

Mejora de la dispersabilidad del polvo nano WC:
Desafío: El nano WC (<100 nm) es propenso a la aglomeración debido a su alta energía superficial, y la relación de aglomeración dura es >20%, lo que afecta la uniformidad de la impresión y el recubrimiento.
Situación actual: Los dispersantes tradicionales (como PVP) tienen efectos limitados, la tasa de aglomeración todavía es >10% y la porosidad después de la sinterización es >5%.
Solución:
Modificación de la superficie: Las partículas de WC se recubrieron con ácido poliacrílico (PAA, 0,5%-1%), y el potencial zeta de la superficie se incrementó de -10 mV a -30 mV y la tasa de aglomeración se redujo a <5%.
Dispersión ultrasónica: Se optimizaron los parámetros ultrasónicos (50 W, 10 min, frecuencia 40 kHz) y el tamaño promedio de partícula disminuyó de 200 nm a 80 nm.
Tratamiento de plasma: El plasma de baja temperatura (potencia 100 W, atmósfera de Ar) elimina la materia orgánica de la superficie y mejora la estabilidad de la dispersión en un 50%.
Perspectivas: Después de una dispersión mejorada, la eficiencia de aplicación de nano WC en SLM aumenta en un 30% y la porosidad del recubrimiento es <1%.

Estabilidad mejorada de recubrimientos de alta temperatura:
Desafío: El revestimiento de WC se oxida fácilmente para formar WO_3 a >1500 °C, con una resistencia a la oxidación insuficiente y una vida útil de <1000 horas.
Situación actual: Los recubrimientos tradicionales de WC-Co han alcanzado su límite a 1300 °C y la industria aeroespacial requiere una mayor resistencia a la temperatura (>1800 °C).
Solución:
Adición compuesta: agregue ZrC (10%-20%) o TaC (5%-15%) para formar una fase estable de alta temperatura (punto de fusión >3000 °C) y la resistencia a la oxidación mejora a 1800 °C.
Tecnología de pulverización en frío: temperatura de pulverización <500 °C, velocidad de partículas >1000 m/s, evita la oxidación a alta temperatura, vida útil del recubrimiento >2000 horas.
Estructura de gradiente: Diseño de recubrimiento de gradiente WC-Al_2O_3 (espesor 200-500 μm), resistencia a la temperatura superficial >2000°C, tenacidad interna >10 $MPa \cdot m^{1/2}$.
Perspectivas: Los recubrimientos de alta temperatura en las toberas de los cohetes podrían extender su vida útil en un 50%, satisfaciendo las necesidades de la fusión nuclear y los vuelos supersónicos.

Otros desafíos:
Control de costos: El precio del polvo nano WC es >500 yuanes/kg y la eficiencia de preparación del plasma debe optimizarse para reducirlo a <300 yuanes/kg.
Protección del medio ambiente: Las emisiones de CO en la producción de WC deben reducirse en más del 90% mediante tecnología de reciclaje.

4.8.3 Pronóstico del mercado del polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Según una investigación de mercado global (MarketsandMarkets et al.), las tendencias de la demanda de polvo para WC para 2030 son las siguientes:

Crecimiento general:
Tasa de crecimiento anual: >6% (2025-2030), el tamaño del mercado será de aproximadamente US$15 mil millones en 2023 y se espera que supere los US$25 mil millones en 2030.
Factores impulsores: la industria aeroespacial (demanda de turbinas), las nuevas energías (baterías y catalizadores) y la popularización de la impresión 3D.

Áreas clave de análisis:
Aeroespacial (30%):
Demanda: La demanda de revestimientos y blindajes para WC aumentará un 8% anual, representando el 35% en 2030.
Caso: GE y Rolls-Royce planean aumentar la proporción de piezas de WC del 10% al 20%.

Nueva energía (25%):
Demanda: El polvo de WC para celdas de combustible y baterías de litio crecerá un 10% anual y el tamaño del mercado será de más de US$6 mil millones en 2030.
Caso: Los planes de expansión de Tesla y Ballard impulsan la duplicación de la demanda.

Impresión 3D (15%):
Demanda: El polvo nano WC crecerá un 12% anualmente y representará el 20% de los materiales de fabricación aditiva para 2030.
Caso: EOS y GE Additive predicen un aumento de 5 veces en la producción de impresiones de WC.

Minería y construcción (20%):
Demanda: Crecimiento sostenido del 5%, impulsado por la construcción de infraestructura.

Biomedicina (5%):
Demanda: Crecimiento anual del 15%, tamaño del mercado > USD 1.000 millones en 2030.

Distribución regional:
China: representa el 40% del total mundial, con una producción en bases como Zhuzhou que supera las 50.000 toneladas/año.
Europa: 25%, con Sandvik y EOS liderando la innovación tecnológica.
América del Norte: 20%, GE y Kennametal promueven aplicaciones de alta gama.
Impacto de las tendencias tecnológicas: Se espera que la proporción de polvo nano WC aumente del 5% en 2023 al 15% en 2030, impulsando el mercado hacia un desarrollo de alta gama.

Referencias

Referencias chinas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

[1] GB/T 4295-2008 Administración Nacional de Normalización de Polvo de Carburo de Tungsteno de China 2008 Especifica los requisitos técnicos y métodos de prueba para el polvo de carburo de tungsteno.
[2] GB/T 34503-2017 Herramientas de perforación de roca de metal duro Administración Nacional de Normalización de China 2017 Especifica las propiedades y los métodos de prueba del carburo cementado para herramientas de perforación de roca.
[3] GB/T 5314-2011 Polvos para carburo cementado Administración Nacional de Normalización de China 2011 Especifica los métodos de prueba de rendimiento para polvos de carburo cementado.
[4] GB/T 19077-2016 Distribución del tamaño de partículas - Método de difracción láser Administración Nacional de Normalización de China 2016 Especifica la determinación de la distribución del tamaño de partículas mediante el método de difracción láser.
[5] GB/T 25995-2010 Polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno: determinación del tamaño de partículas del tamiz subpesador Fisher (FSSS). Administración Nacional de Normalización de China 2010 Especifica el método de determinación del tamaño de partículas del tamiz subpesador Fisher (FSSS).
[6] GB/T 36418-2018 Método de prueba para la resistencia al desgaste del carburo cementado Administración Nacional de Normalización de China 2018 Especifica el método de prueba para la resistencia al desgaste del carburo cementado.
[7] GB/T 38494-2020 Método de prueba para la resistencia a la compresión del carburo cementado Administración Nacional de Normalización de China 2020 Especifica el método de prueba para la resistencia a la compresión del carburo cementado.

Referencias en inglés

[8] Lassner, E., y Schubert, WD (1999) Tungsteno: propiedades, química, tecnología del elemento, aleaciones y compuestos químicos Springer presenta las propiedades físicas y químicas y la tecnología de aplicación del tungsteno y el carburo de tungsteno.
[9] Upadhyaya, GS (1998) Carburos de tungsteno cementados: producción, propiedades y pruebas William Andrew Publishing detalla la fabricación, las propiedades y los métodos de prueba del polvo de carburo de tungsteno.
[10] Pawlowski, L. (2008) La ciencia y la ingeniería de los recubrimientos por pulverización térmica (2.ª ed.) John Wiley & Sons analiza las aplicaciones científicas y de ingeniería de la tecnología de recubrimiento por pulverización térmica.
[11] Davis, JR (Ed.) (2004) Manual de tecnología de pulverización térmica ASM International Proporciona orientación sobre procesos y aplicaciones para la tecnología de pulverización térmica.
[12] Prakash, LJ (2014) Metales duros y aplicaciones mineras. Materiales duros integrales. Vol. 2 345-370. Elsevier. Análisis de la tecnología de aplicación del carburo cementado en el campo de la minería.
[13] Levy, RB, y Boudart , M. (1973) Comportamiento similar al platino del carburo de tungsteno en catálisis de superficie Science 181(4099) 547-549 https://doi.org/10.1126/science.181.4099.547 Revelación de las características similares al platino del carburo de tungsteno en catálisis de superficie.
[14] Chen, WF, Wang, CH, Sasaki, K., et al. (2013) WC nanoestructurado altamente activo y duradero como electrocatalizador de metal no precioso para celdas de combustible PEM Nature Communications 4 2439 Estudia la conductividad y durabilidad del carburo de tungsteno nano en celdas de combustible.
[15] ASTM B213-20 (2020) Métodos de prueba estándar para la velocidad de flujo de polvos metálicos utilizando el embudo de caudalímetro Hall. ASTM International especifica el caudalímetro Hall para

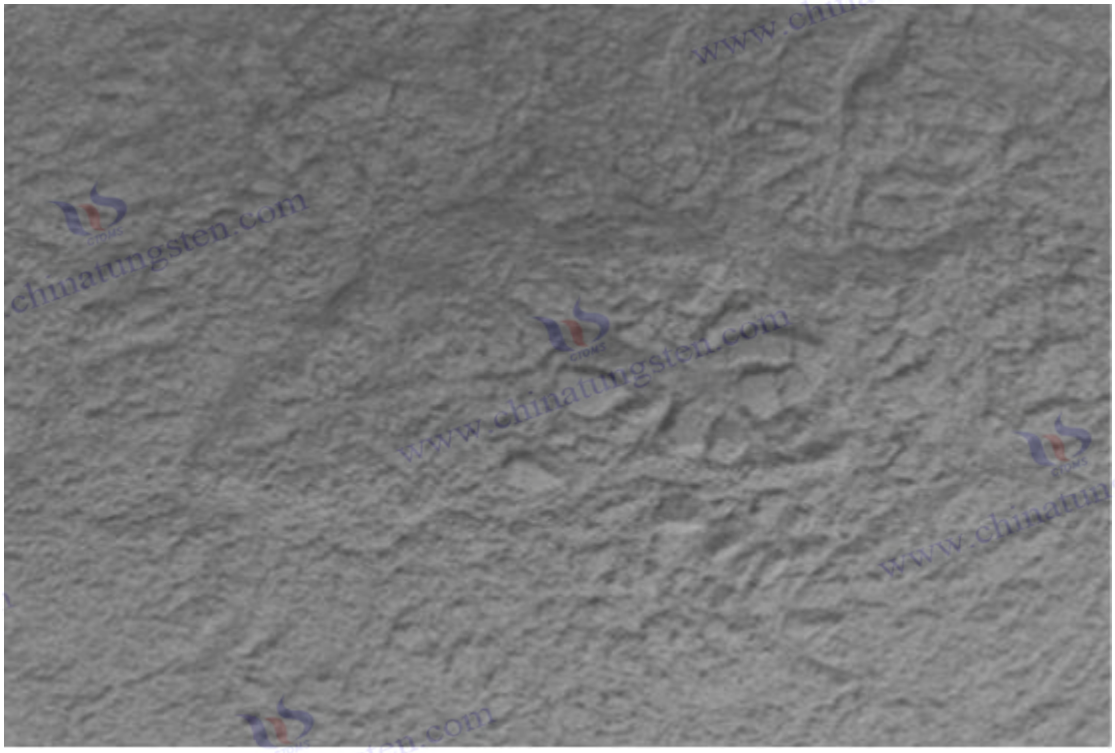
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

medir la fluidez del polvo.
[16] ASTM E384-17 (2017) Método de prueba estándar para dureza por microindentación de materiales ASTM International especifica el método de prueba de dureza Vickers.
[17] ASTM G65-16 (2016) Método de prueba estándar para medir la abrasión utilizando el aparato de rueda de caucho/arena seca ASTM International Especifica el método de prueba de abrasión de rueda de caucho/arena seca.
[18] ASTM E1019-18 (2018) Métodos de prueba estándar para la determinación de carbono, azufre, nitrógeno y oxígeno en aleaciones de acero, hierro, níquel y cobalto mediante diversas técnicas de combustión y fusión de gas inerte. ASTM International Especifica el método para la determinación del contenido de oxígeno.
[19] ISO 3327:2009 (2009) Metales duros : determinación de la resistencia a la ruptura transversal Organización Internacional de Normalización Especifica el método de prueba de resistencia a la compresión.
[20] ISO 4499-2:2020 (2020) Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura — Parte 2: Medición del tamaño de grano de WC Organización Internacional de Normalización Especifica el método para la determinación microscópica del tamaño de grano de WC.
[21] ISO 9277:2010 (2010) Determinación del área superficial específica de sólidos por adsorción de gas - Método BET Organización Internacional de Normalización Especifica el método BET para determinar el área superficial específica.
[22] ISO 10993-5:2009 (2009) Evaluación biológica de dispositivos médicos — Parte 5: Pruebas de citotoxicidad in vitro Organización Internacional de Normalización Especifica los métodos de prueba de citotoxicidad in vitro.
[23] Sandvik Coromant (2022) Guía técnica: herramientas de corte y piezas de desgaste Sandvik Group proporciona una guía técnica industrial para herramientas de corte y piezas de desgaste.
[24] Wu, Z., & Zhang, J. (2020) Recubrimientos de carburo de tungsteno para colectores de corriente de baterías de iones de litio: una revisión Journal of Power Sources 475 228689 https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228689 Una revisión de la aplicación de recubrimientos de carburo de tungsteno en colectores de corriente de baterías de iones de litio.
[25] Zhang, Z. y Liu, W. (2019) Investigación sobre carburo cementado WC-Co en herramientas de perforación de rocas Revista internacional de metales refractarios y materiales duros 81 123-130

Referencias en otros idiomas

[26] Asociación de Normas de Japón (2005) JIS H 7803:2005 Métodos de prueba para polvo de carburo de tungsteno Asociación de Normas de Japón Traducción al chino: 碳化钨粉末测试方法 Especifica métodos de prueba químicos y físicos para polvo de carburo de tungsteno.
[27] ГОСТ 25599.1-83 (1983) Polvo de carburo cementado - Método para la determinación del contenido de carbono Comité Estatal de Normas de la URSS Traducción al chino: 硬质合金粉末 - 碳含量测定方法 Especifica el método para el análisis químico del contenido de carbono en el polvo de carburo cementado.

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



Capítulo 5: Control de calidad y estándares del polvo de carburo de tungsteno

Como materia prima fundamental de materiales de alto rendimiento como el carburo cementado,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

herramientas de corte y recubrimientos superficiales, la calidad del polvo de carburo de tungsteno determina directamente el rendimiento y la competitividad del producto final en el mercado. En el contexto de una industria globalizada, el control de calidad y la estandarización del polvo de carburo de tungsteno no solo son clave para garantizar la consistencia del producto, sino también un importante motor para promover el progreso tecnológico y la modernización industrial. Este capítulo analizará sistemáticamente las especificaciones de producción y prueba del polvo de carburo de tungsteno desde cuatro puntos de vista: puntos de control de calidad, normas internacionales, normas nacionales, y comparación y aplicabilidad de normas, con el objetivo de proporcionar referencias técnicas detalladas y orientación práctica para los profesionales pertinentes.

5.1 Puntos clave del control de calidad

El control de calidad del polvo de carburo de tungsteno abarca toda la cadena de producción, desde la selección de la materia prima y la optimización del proceso hasta las pruebas del producto terminado, abarcando múltiples dimensiones como la composición química, la distribución del tamaño de partícula, la estructura cristalina y las propiedades físicas. Una gestión de calidad rigurosa y científica no solo mejora el rendimiento del producto, sino que también reduce eficazmente los costos de producción y el impacto ambiental. El siguiente análisis exhaustivo de los puntos clave del control de calidad desde diversas perspectivas busca brindar al lector un conocimiento completo y sugerencias prácticas.

Gestión precisa de la composición química.

La composición química es fundamental para la calidad del polvo de carburo de tungsteno, lo que influye directamente en su estructura cristalina, dureza y resistencia al desgaste. El contenido teórico de carbono del carburo de tungsteno (WC) es del 6,13 % (fracción másica), pero en la producción real, ligeras desviaciones en el carbono total, el carbono libre, el oxígeno y las impurezas pueden causar problemas de rendimiento.

Balance de carbono total y carbono libre

Un contenido total de carbono demasiado bajo puede provocar la formación de la fase W_2C, una fase metaestable con baja dureza y propensa al agrietamiento. Un contenido total de carbono demasiado alto producirá carbono libre, lo que reduce la densidad y el rendimiento de sinterización del polvo. Normalmente, el contenido de carbono libre debe controlarse entre el 0,08 % y el 0,1 % para garantizar la estabilidad de la fase WC.

Límites estrictos en el contenido de oxígeno

El contenido de oxígeno es un indicador importante que afecta la actividad de los polvos. Un contenido alto de oxígeno (>0,2 %) generará poros durante la sinterización y debilitará las propiedades mecánicas de la aleación. Especialmente en polvos ultrafinos, el control del contenido de oxígeno es particularmente crítico, ya que su alta superficie específica facilita su adsorción.

Control preciso de elementos de impurezas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Impurezas como hierro, cobalto, calcio y silicio pueden provenir de materias primas o equipos de producción. Un contenido excesivo de hierro reducirá la pureza del polvo y afectará el comportamiento de sinterización; impurezas no metálicas como calcio y silicio pueden formar fases frágiles en los límites de grano y reducir la tenacidad. La producción moderna requiere niveles de impurezas de tan solo 10-50 ppm (partes por millón).

Tecnología de detección

Método de combustión a alta temperatura

El analizador de carbono-azufre puede determinar con precisión el contenido total de carbono y carbono libre con una precisión de detección de hasta el 0,01 %.

Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS): se utiliza para analizar trazas de impurezas con un límite de detección tan bajo como ppb (partes por mil millones).

Método de absorción infrarroja

Determinación rápida del contenido de oxígeno, ampliamente utilizado en sitios de producción.

Estrategias de gestión

Se prefieren el polvo de tungsteno de alta pureza (pureza ≥ 99,95 %) y el negro de humo (contenido de cenizas < 0,1 %) para reducir la introducción de impurezas de la fuente.

Durante la reacción de carbonización, la temperatura (1400-1600 °C), la atmósfera (hidrógeno o vacío) y el tiempo de retención se controlan con precisión para evitar una carbonización incompleta o una carbonización excesiva.

Implementar procesos de filtración y purificación de múltiples etapas para reducir el contacto del polvo con el ambiente externo.

Establecer un sistema de trazabilidad de lotes de composición química para garantizar la controlabilidad de cada lote de polvo.

Desarrollo del conocimiento

En los últimos años, con la creciente aplicación del polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica, el control de la composición química se ha vuelto más difícil. Por ejemplo, en el campo de la impresión 3D, el contenido de oxígeno debe controlarse por debajo del 0,05 % para evitar reacciones de oxidación durante el proceso de impresión. Esto exige que los fabricantes introduzcan equipos de prueba más avanzados (como la espectroscopia fotoelectrónica de rayos X, XPS) y tecnología de monitorización en línea.

Regulación científica del tamaño y la distribución de partículas.

El tamaño y la distribución de partículas del polvo de carburo de tungsteno influyen profundamente en el prensado, el comportamiento de sinterización y la microestructura del producto final. Los polvos de diferentes tamaños de partículas son adecuados para diferentes aplicaciones, y la uniformidad de la distribución del tamaño de partículas determina la consistencia del rendimiento del producto.

Clasificación del tamaño de partículas

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Polvo ultrafino (<1 μm): adecuado para herramientas de corte de alta precisión y componentes microelectrónicos que requieren un acabado superficial extremadamente alto.
Polvo fino (1-3 μm): ampliamente utilizado en herramientas de carburo cementado, teniendo en cuenta tanto la dureza como la tenacidad.
Polvo medio (3-10μm): adecuado para recubrimientos resistentes al desgaste y moldes de trabajo pesado, con buenas propiedades de moldeo.
Polvo grueso (>10μm): se utiliza para pulverización térmica y herramientas de minería, enfatizando la resistencia al impacto.

Importancia de la distribución del tamaño de partícula: Una distribución estrecha (D90/D10 < 2) puede mejorar la uniformidad de la sinterización y reducir la porosidad; una distribución amplia puede provocar una contracción desigual y afectar la precisión dimensional. El problema de la aglomeración de los polvos ultrafinos es particularmente importante y requiere especial atención.
Correlación del rendimiento del proceso de polvos de WC con diferentes tamaños de partículas

Rango de tamaño de partículas	Superficie específica (BET, m²/g)	Temperatura de sinterización (°C)	Densidad relativa (%)	HV30	K_{IC} (MPa·m^1/2)
>10 μm	0,8-1,2	1450-1500	92,3 ± 0,5	1420	9.8
3-10 μm	2.5-4.0	1400-1450	95,1 ± 0,3	1780	11.2
0,5-1 μm	8.0-12.0	1320-1380	98,7 ± 0,2	2090	12.7
<0,1 μm	15.0-20.0	1300-1350	97,5 ± 0,4	2350	10.5

Tecnología de detección
Analizador de tamaño de partículas láser: basado en el principio de dispersión de luz, puede medir la distribución del tamaño de partículas de 0,01 a 1000 μm con alta precisión y es adecuado para polvos ultrafinos.

Método de tamizado: Clasificación a través de tamices estándar, adecuados para la detección rápida de polvos gruesos.
Método de sedimentación: utiliza la diferencia en la velocidad de sedimentación de partículas para verificar la uniformidad de la distribución del tamaño de partículas y es adecuado para la investigación de laboratorio.
Microscopio electrónico de barrido (SEM): observe visualmente la morfología y el tamaño de las partículas y ayude a verificar los resultados del análisis del tamaño de las partículas.

Estrategia de regulación
Optimice el proceso de molienda: elija bolas de carburo de tungsteno o bolas de óxido de circonio como medios de molienda, controle el tiempo de molienda de bolas (8-24 horas) y la velocidad de rotación (200-400 rpm) para evitar una molienda excesiva que provoque la rotura de partículas.
Presentamos equipos de clasificación: como el clasificador de flujo de aire centrífugo, que puede filtrar con precisión polvos dentro de un rango de tamaño de partícula específico.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Adición de dispersantes (como polietilenglicol, PEG): reduce la tendencia de los polvos ultrafinos a aglomerarse y mejora la uniformidad de distribución.
Calibre periódicamente el equipo de prueba para garantizar la confiabilidad de los datos sobre el tamaño de las partículas.

Desarrollo del conocimiento
La tendencia más reciente en el control del tamaño de partícula se orienta hacia la nanoescala (<100 nm), lo que supone un reto para las tecnologías tradicionales de molienda y clasificación. Por ejemplo, la molienda húmeda combinada con dispersión ultrasónica puede mejorar significativamente la dispersabilidad de los nanopolvos , pero es necesario encontrar un equilibrio entre coste y rendimiento. Además, están surgiendo tecnologías de monitorización en línea de la distribución del tamaño de partícula (como la dispersión dinámica de luz, DLS), que se espera permitan una gestión de la calidad en tiempo real.

La estabilidad de la estructura cristalina y la composición de las fases garantizan que
el polvo de carburo de tungsteno ideal esté compuesto principalmente por una sola fase WC, y su estructura cristalina hexagonal le confiere una excelente dureza y resistencia al desgaste. La presencia de fases inesperadas (como W_2C, W y carbono libre) reducirá significativamente el rendimiento del polvo, por lo que el control de la estructura cristalina y la composición de las fases es la máxima prioridad de la gestión de calidad.

Factores influyentes
Temperatura de carbonización: demasiado alta (>1600 °C) puede provocar el crecimiento del grano y reducir la actividad del polvo; demasiado baja (<1400 °C) puede generar la fase W_2C.
Relación de fuentes de carbono: la cantidad insuficiente de carbono producirá una subcarbonización, mientras que el exceso de carbono producirá carbono libre.
Atmósfera de reacción: La atmósfera de hidrógeno ayuda a eliminar el oxígeno, pero se debe evitar el exceso de hidrógeno para prevenir defectos en los límites de grano causados por el hidrógeno.

Tecnología de detección
Difracción de rayos X (XRD): analice con precisión la composición de fases y detecte la relación de WC, W_2C y carbono libre con una precisión cuantitativa de hasta el 0,1 %.
Microscopía electrónica de barrido (SEM): observa la morfología del grano, el tamaño y los defectos superficiales y evalúa la uniformidad de la estructura cristalina.
Microscopía electrónica de transmisión (TEM): se utiliza para el análisis de la estructura cristalina de polvos a escala nanométrica, revelando defectos a escala atómica.
Espectroscopia Raman: ayuda a detectar la presencia de carbono libre, especialmente adecuada para polvos ultrafinos.

Salvaguardias
Controle con precisión el gradiente de temperatura (velocidad de calentamiento 5-10 °C/min) y el tiempo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de mantenimiento (2-4 horas) del horno de carbonización.
Se prefiere una fuente de carbono de alta pureza (como polvo de grafito, pureza ≥ 99,9%) para reducir el impacto de las impurezas en la estructura cristalina.
Utilice protección atmosférica (como atmósfera mixta de argón o hidrógeno) para evitar la oxidación o descarburación.
Establecer una base de datos de la composición de fases y realizar un seguimiento de los cambios estructurales en diferentes condiciones del proceso.

Desarrollo del conocimiento
Con el desarrollo de técnicas analíticas de alta resolución, como la difracción de rayos X de sincrotrón y la difracción de neutrones, los investigadores pueden caracterizar con mayor precisión los defectos cristalinos y la distribución de tensiones del polvo de carburo de tungsteno. Estas técnicas aportan nuevas ideas para optimizar el proceso de carburación, especialmente en el sector aeroespacial, donde se requiere una pureza de una sola fase de carburo de tungsteno cercana al 100 %.

Diseño optimizado de la fluidez y la densidad aparente del polvo.
La fluidez del polvo afecta la eficiencia del prensado y la uniformidad del llenado del molde, mientras que la densidad aparente está estrechamente relacionada con la contracción de sinterización y la densidad del producto. El polvo de carburo de tungsteno de alta calidad debe lograr un equilibrio entre fluidez y densidad para satisfacer las necesidades de los diferentes procesos de moldeo.
Importancia de la fluidez: Los polvos con baja fluidez pueden causar delaminación o huecos en el compacto, lo que reduce la resistencia del producto. El caudal Hall de los polvos de alta calidad suele estar entre 15 y 25 segundos/50 g. Los polvos ultrafinos presentan baja fluidez debido a las fuertes fuerzas de van der Waals entre las partículas, por lo que requieren una optimización específica.

La importancia de la densidad aparente
La densidad aparente refleja las propiedades del polvo y suele estar entre 3,0 y 5,0 g/cm³. Una densidad aparente baja puede provocar una contracción excesiva por sinterización y afectar la precisión dimensional; una densidad aparente alta puede reducir el rendimiento del moldeo.

Tecnología de detección
Medidor de flujo Hall: mide el tiempo que tarda el polvo en pasar por un embudo estándar. Es fácil de usar y apto para pruebas in situ.
Medidor de densidad de toque: mide la densidad del volumen del polvo después de la vibración, lo que refleja la compacidad del empaque de partículas.
Método de tambor giratorio: simula el comportamiento dinámico del polvo durante el proceso de moldeo y evalúa la fluidez real.

Estrategia de optimización
Utilizando la tecnología de granulación por pulverización: prepare polvos esféricos o casi esféricos y mejore significativamente la 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

Ajustar la distribución del tamaño de partículas: aumente adecuadamente la proporción de partículas finas para optimizar el efecto de llenado entre partículas.
Modificación de la superficie: Reducir la fricción entre partículas mediante tratamiento de plasma o añadiendo una pequeña cantidad de aglutinante (como parafina, la cantidad añadida es <0,5%).
Controle el contenido de humedad del polvo: un contenido de humedad demasiado alto reducirá la fluidez, se recomienda controlarlo por debajo del 0,1%.
Ampliación del conocimiento: En los últimos años, el estudio de la fluidez se ha integrado gradualmente en la tecnología de simulación por computadora, como el método de elementos discretos (MDE), que permite simular el comportamiento del flujo del polvo en el molde y predecir el riesgo de delaminación. Esto proporciona un soporte teórico para optimizar el proceso de granulación y el diseño de moldes, lo cual es especialmente importante en la producción automatizada.

Gestión sistemática del entorno y las condiciones de almacenamiento.
El polvo de carburo de tungsteno es muy sensible a la humedad y al oxígeno. Un almacenamiento inadecuado puede provocar oxidación, absorción de humedad o degradación del rendimiento. La gestión ambiental científica es clave para prolongar la vida útil del polvo y garantizar una calidad estable.
Riesgo de oxidación: El oxígeno reacciona con el polvo de carburo de tungsteno para formar óxido de tungsteno (WO_3), lo que reduce la actividad del polvo e incluso causa defectos de sinterización. Los polvos ultrafinos presentan un mayor riesgo de oxidación debido a su elevada superficie específica.
Problema de absorción de humedad: La adsorción de agua puede causar la aglomeración del polvo y reducir la fluidez. En casos graves, puede desencadenar reacciones químicas y generar hidróxidos.
Requisitos ambientales:
Temperatura: Mantener el ambiente de almacenamiento a 15-25°C para evitar altas temperaturas que aceleran la oxidación.
Humedad: La humedad relativa debe controlarse entre 30% y 50% para evitar la absorción de humedad.
Luz: Evite la exposición a la luz intensa para evitar reacciones fotoquímicas en la superficie del polvo.

Medidas de gestión
Envasado al vacío o envasado con nitrógeno: aíslan el aire y la humedad para prolongar la vida útil.
Equipado con equipo de deshumidificación: como tamiz molecular o desecante de gel de sílice para mantener un ambiente de baja humedad.
Compruebe periódicamente las condiciones de almacenamiento: utilice un termohigrómetro y un analizador de oxígeno y registre los parámetros ambientales.
Optimice el proceso de transporte: utilice materiales de embalaje compuestos a prueba de golpes y humedad para evitar que el polvo se dañe.
Establecer archivos de almacenamiento: registrar el tiempo de almacenamiento, las condiciones ambientales y los cambios de rendimiento de cada lote de polvo.
Expansión del conocimiento: La tecnología moderna de almacenamiento se está desarrollando hacia la inteligencia. Por ejemplo, el Internet de las Cosas (IoT) permite monitorizar la temperatura y la humedad del entorno de almacenamiento en tiempo real y analizar la tendencia de envejecimiento del polvo mediante la computación en la nube. Esto no solo mejora la eficiencia del almacenamiento, sino que

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

también proporciona datos que respaldan la trazabilidad de la calidad.

Trazabilidad de la calidad y gestión digital.
En la era de la Industria 4.0, el control de calidad prioriza la trazabilidad de todo el proceso y la toma de decisiones basada en datos. La gestión digital ofrece una nueva vía para la optimización de la calidad del polvo de carburo de tungsteno mediante la integración de datos de producción, pruebas y almacenamiento.

Sistema de trazabilidad:
Gestión de lotes: Asigne un identificador único a cada lote de polvo, registre la fuente de las materias primas, los parámetros de producción y los resultados de las pruebas.
Tecnología Blockchain: garantiza que los datos no puedan ser manipulados y mejora la credibilidad de la certificación de calidad.

Herramientas digitales:
Monitoreo en línea: como analizadores de tamaño de partículas en tiempo real y detectores de composición química para detectar desviaciones del proceso de manera oportuna.
Control estadístico de procesos (CEP): Analizar los patrones de fluctuaciones de calidad y optimizar los parámetros del proceso.
Inteligencia artificial (IA): predice las propiedades del polvo a través del aprendizaje automático para ayudar a mejorar el proceso.

Estrategia de implementación:
Establecer un sistema de planificación de recursos empresariales (ERP) para integrar datos de producción y calidad.
Capacitar a los empleados para dominar las herramientas de análisis de datos y mejorar las capacidades de gestión digital.
Cooperar con las agencias de pruebas e introducir la verificación de terceros para garantizar la objetividad de los datos.
Expansión del conocimiento: Los últimos avances en gestión digital incluyen la tecnología de gemelos digitales, que simula el proceso de producción de polvo de carburo de tungsteno mediante modelos virtuales y predice los riesgos de calidad. Esta tecnología se ha aplicado en grandes empresas de tungsteno de Europa y Estados Unidos, y se prevé su posterior promoción en China.

5.2 Normas internacionales

Las normas internacionales proporcionan un marco global para el control de calidad del polvo de carburo de tungsteno, garantizando la consistencia y comparabilidad de los productos en diferentes países y mercados. Estas normas, formuladas por organizaciones reconocidas, abarcan la composición química, las propiedades físicas, los métodos de ensayo y otros aspectos, y se utilizan ampliamente en la fabricación de carburo cementado, recubrimientos y herramientas. El siguiente análisis detallado de las principales normas internacionales y sus aplicaciones ofrece a los lectores una referencia clara.

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

Normas ISO.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) ha desarrollado una serie de normas para polvos de carburo cementado, que enfatizan el carácter científico de los métodos de prueba y la repetibilidad de los resultados. Estas normas tienen una amplia influencia a nivel mundial, especialmente en los mercados de la UE y Asia.

ISO 4499-1:2008: Polvos de cermet para carburos cementados – Métodos de análisis químico.

Explicación del contenido: Esta norma especifica los métodos de determinación de carbono total, carbono libre, oxígeno, hierro, cobalto, calcio y otros elementos, y recomienda el uso de tecnologías de alta precisión como la espectrometría de masas infrarroja (ICP-MS, con un límite de detección de 10 ppb) y el método de absorción infrarroja (precisión del contenido de oxígeno: 0,01%). La norma también establece requisitos estrictos para el pretratamiento de las muestras (como la disolución ácida y el secado) para eliminar los factores de interferencia.

Escenario de aplicación

Adecuado para empresas de producción de carburo cementado orientadas a la exportación, especialmente en los campos de dispositivos médicos y aeroespaciales, donde la pureza de la composición química es extremadamente alta.

Ventajas y desafíos

El método estándar es científico y riguroso, pero tiene altos requisitos para los equipos de prueba (como ICP-MS), y las pequeñas y medianas empresas pueden enfrentar presión de costos.

ISO 4499-2:2008: Polvos cermet para carburos cementados – Ensayos sobre propiedades físicas.

Contenido: Abarca las especificaciones de prueba para la distribución del tamaño de partícula, la densidad aparente, la densidad compactada y la fluidez. Se recomienda el uso de un analizador láser de tamaño de partícula (rango de medición: 0,01-1000 μm) y un caudalímetro Hall (precisión: ±0,1 s). La norma también estipula claramente la temperatura y la humedad del entorno de prueba (20 ± 2 °C, humedad <50 %).

Escenarios de aplicación: Adecuado para evaluar el rendimiento de moldeo de polvos, especialmente en el campo de herramientas de alta precisión e impresión 3D, donde la uniformidad de la distribución del tamaño de partícula es crucial.

Ventajas y desafíos: La operación estándar es simple y los resultados son altamente comparables, pero hay una falta de orientación detallada sobre el problema de aglomeración de polvos ultrafinos y se deben combinar otros métodos (como SEM) para el análisis auxiliar.

ISO 3326:2013: Carburos cementados – Método para la determinación de la dureza.

Explicación del contenido: Aunque se centra principalmente en los productos terminados de carburo cementado, afecta indirectamente los requisitos de calidad del polvo de carburo de tungsteno. La norma especifica los métodos de ensayo para la dureza Vickers (HV) y la dureza Rockwell (HRA), destacando la contribución de la estabilidad de la estructura cristalina del polvo a la dureza.

Escenarios de aplicación: Adecuado para aplicaciones de alta gama como herramientas aeroespaciales y

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

piezas resistentes al desgaste, la pureza cristalina del polvo debe alcanzar más del 99,9%.
Ventajas y desafíos: La norma proporciona una referencia para el desempeño de los productos terminados, pero hay menos orientación directa para las pruebas de polvos, por lo que debe usarse junto con otras normas.
Expansión del conocimiento: Las normas ISO se han actualizado continuamente en los últimos años. Por ejemplo, la versión revisada de la norma ISO 4499-2020 incorpora el método de detección de nanopolvos , lo que refleja el rápido crecimiento del mercado de polvos ultrafinos de carburo de tungsteno. Las empresas deben estar atentas a la última versión para adaptarse a los avances tecnológicos.

Normas ASTM

Las normas de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) son conocidas por la precisión y practicidad de sus métodos experimentales y son ampliamente utilizadas en el mercado de América del Norte, especialmente en las industrias de carburo cementado y recubrimientos.

ASTM B761-17: Método de prueba para la distribución del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno.
Explicación del contenido: La norma describe detalladamente los pasos operativos de los métodos de dispersión y tamizado de luz láser, aplicables a polvos de 0,1 a 100 μm. La dispersión de luz láser se basa en la teoría de dispersión de Mie, con alta precisión y adecuada para polvos ultrafinos; el tamizado es sencillo de operar y adecuado para polvos gruesos. La norma también proporciona recomendaciones específicas para la dispersión de muestras (como el tratamiento ultrasónico).
Escenarios de aplicación: Adecuado para impresión 3D, pulverización térmica y nanorrecubrimiento. La uniformidad en la distribución del tamaño de partícula afecta directamente la calidad de la impresión y el rendimiento del recubrimiento.
Ventajas y desafíos: El método estándar es maduro y la tasa de penetración del equipo es alta, pero tiene altos requisitos para el control de aglomeración de polvos ultrafinos y necesita usarse con un dispersante.

ASTM E194-10: Determinación del contenido de oxígeno en materiales de pulvimetalurgia.
Explicación del contenido: El contenido de oxígeno se determina mediante el método de fusión con gas inerte, con un límite de detección de tan solo 1 ppm, adecuado para polvos de alta pureza. La norma exige el uso de un horno de inducción de alta frecuencia (potencia > 2 kW) para fundir la muestra, liberar el oxígeno y analizarlo con un detector infrarrojo.
Escenarios de aplicación: Adecuado para carburo cementado de alto rendimiento y materiales aeroespaciales. El contenido de oxígeno debe controlarse entre el 0,05 % y el 0,1 % para evitar defectos de sinterización.
Ventajas y desafíos: La precisión de detección es extremadamente alta y adecuada para aplicaciones de alta gama, pero el costo del equipo es relativamente alto (alrededor de RMB 500.000 a 1.000.000) y requiere una operación profesional.

ASTM B659-90(2014): Guía para medir el espesor de recubrimientos metálicos e inorgánicos.
Explicación del contenido: Aunque se centra principalmente en los recubrimientos, regula indirectamente

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

los requisitos de calidad del polvo de carburo de tungsteno, destacando la influencia de la uniformidad del tamaño de partícula y la estabilidad química en la calidad del recubrimiento. La norma recomienda el uso de microscopía y fluorescencia de rayos X para medir el espesor del recubrimiento.
Escenarios de aplicación: Adecuado para pulverización térmica, pulverización de plasma y revestimiento láser. Es necesario optimizar la densidad aparente y la fluidez del polvo para garantizar un recubrimiento uniforme.
Ventajas y desafíos: La norma proporciona orientación indirecta para aplicaciones de recubrimiento, pero tiene menos contenido de pruebas directas para polvos y debe combinarse con otras normas.
Ampliación del conocimiento: las normas ASTM se centran en aplicaciones prácticas y en los últimos años han agregado especificaciones para la fabricación aditiva (impresión 3D), como

La norma ASTM F3049 aborda indirectamente los requisitos de tamaño de partícula y fluidez del polvo de carburo de tungsteno. Esto refleja la rápida adaptación de la norma a las tecnologías emergentes.

En Además de ISO y ASTM, algunos países y regiones también han formulado normas relevantes para el polvo de carburo de tungsteno, combinando características industriales locales para complementar el sistema estándar global.

JIS Z 2503:2015 (Norma industrial japonesa):
Explicación del contenido: Abarca los métodos de ensayo de composición química (carbono total, oxígeno, impurezas), distribución del tamaño de partícula y propiedades físicas (densidad aparente, fluidez) del polvo de carburo de tungsteno. La norma enfatiza la estabilidad del proceso de producción y exige el registro de la temperatura de carbonización y las condiciones atmosféricas de cada lote de polvo.
Escenarios de aplicación: Adecuado para la producción de carburo cementado y recubrimiento en los mercados japonés y coreano, especialmente en las industrias automotriz y electrónica.
Ventajas y retos: El estándar combina el nivel de equipamiento del mercado asiático y tiene un menor coste de implementación, pero su nivel de internacionalización no es tan alto como el ISO.

DIN EN ISO 4499 (norma alemana):
Explicación del contenido: Es totalmente coherente con la serie ISO 4499, complementando los requisitos de calibración de equipos de producción (como la calibración anual de los instrumentos de XRD) y el control ambiental (como una humedad en el taller de producción inferior al 40%). La norma también perfecciona el método de detección de polvos ultrafinos.
Escenarios de aplicación: Ampliamente utilizado en países europeos como Alemania y Austria, especialmente en los campos de maquinaria de precisión y aeroespacial.
Ventajas y desafíos: La norma se centra en los detalles del proceso y es adecuada para empresas con uso intensivo de tecnología, pero es menos aplicable a las pequeñas y medianas empresas.

Normas BS EN (Normas británicas):
Explicación del contenido: Se hace referencia parcial a las normas ISO 4499 y ASTM, haciendo hincapié en las pruebas de rendimiento del polvo en herramientas de corte, como la dureza, la resistencia al

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

desgaste y la resistencia al impacto. La norma también ofrece recomendaciones sobre las condiciones de almacenamiento del polvo (como el envasado al vacío).
Escenarios de aplicación: Aplicable a la certificación de mercado en el Reino Unido y los países de la Commonwealth, especialmente en las industrias del transporte marítimo y la energía.
Fortalezas y desafíos: La norma es integral, pero altamente regional y tiene influencia internacional limitada.
Expansión del conocimiento: La tendencia a la coordinación de normas internacionales es cada vez más evidente. Por ejemplo, la revisión conjunta de ISO y DIN ha ampliado el uso de la norma DIN EN ISO 4499 en el mercado europeo. En el futuro, es posible que las normas internacionales se integren aún más para formar una especificación global unificada.

Características y tendencias de la aplicación:
Aplicabilidad global: Las normas ISO y ASTM son autorizadas y científicas, lo que las hace adecuadas para empresas multinacionales y productos de exportación, especialmente en los mercados europeos y americanos.

Umbral técnico: Las normas internacionales tienen altos requisitos para los equipos de prueba y la calidad del personal, lo que es adecuado para empresas con una fuerte solidez técnica, pero las pequeñas y medianas empresas pueden necesitar actualizar gradualmente sus equipos.
Adaptación regional: Las normas JIS y BS EN están más cerca de las necesidades locales, tienen costos de implementación más bajos y son adecuadas para los mercados regionales.
Perspectivas de futuro: Con el auge de los nanopolvos y la fabricación aditiva, las normas internacionales están evolucionando hacia un enfoque más detallado, como la incorporación de métodos de prueba para el tamaño de partículas a nanoescala y la química de superficies. Las empresas deben estar muy atentas a las actualizaciones de las normas para mantenerse a la vanguardia de la tecnología.

5.3 Normas nacionales

China ha establecido un sistema completo de normas para el control de calidad del polvo de carburo de tungsteno, que incluye normas nacionales (GB/T), normas industriales (YB/T, HG/T, JB/T) y normas locales y empresariales. Estas normas incorporan la situación actual de la industria del tungsteno en China, equilibran los requisitos técnicos y los costes de producción, y se utilizan ampliamente en las industrias del carburo cementado, los recubrimientos, las herramientas y la metalurgia. A continuación, se presenta un análisis detallado del contenido, las características y los escenarios de aplicación de las normas nacionales.

Norma Nacional.
La Norma Nacional (GB/T) es la especificación básica para el control de calidad del polvo de carburo de tungsteno en China. Tiene características tanto obligatorias como orientativas, y abarca múltiples etapas, desde la materia prima hasta el producto terminado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 4295-2018: Polvo de carburo de tungsteno.
Explicación del contenido: La norma especifica la composición química (como carbono total 6,08-6,18 %, carbono libre ≤0,1 %, oxígeno ≤0,2 %), el rango de tamaño de partícula (0,5-30 μm), la densidad aparente (3,0-5,0 g/cm³), la fluidez (15-25 segundos/50 g) y otros requisitos técnicos del polvo de carburo de tungsteno. Los métodos de detección incluyen análisis químico (método de combustión, método de titulación), pruebas físicas (análisis de tamaño de partícula por láser, medidor de flujo Hall) y análisis microscópico (DRX, SEM). La norma también hace recomendaciones sobre el envasado y el almacenamiento, como el envasado al vacío y una humedad de almacenamiento inferior al 50 %.
Escenarios de aplicación: Aplicable a todos los aspectos de la producción nacional de carburo cementado, recubrimiento y herramientas, y es la base fundamental para la gestión de calidad de la industria.
Ventajas y desafíos: La norma es completa y cubre una variedad de escenarios de aplicación, pero las especificaciones para polvos ultrafinos (<0,5 μm) son ligeramente insuficientes y deben complementarse con otras normas.

GB/T 26046-2010: Polvo de carburo de tungsteno para carburo cementado.
Explicación del contenido: El polvo de carburo de tungsteno se divide en varios grados según el tamaño de partícula y la finalidad (como WC-01 para herramientas ultrafinas, WC-04 para piezas resistentes al desgaste). Se han refinado los requisitos de composición química (oxígeno ≤ 0,15%), distribución del tamaño de partícula (desviación D50 ± 5%) y propiedades físicas (densidad aparente 4,0-5,0 g/cm³). La norma también estipula el ciclo de calibración del equipo de prueba (anual).
Escenarios de aplicación: Adecuado para productos de carburo cementado con diferentes requisitos de rendimiento, como polvo ultrafino para brocas de PCB y polvo grueso para herramientas de minería.
Fortalezas y desafíos: La norma tiene una clasificación clara y puede adaptarse a diversas necesidades, pero hay menos orientación sobre aplicaciones emergentes (como la impresión 3D) y se necesitan más actualizaciones.

GB/T 18508-2013: Métodos de inspección para productos de pulvimetalurgia de carburo cementado.
Explicación del contenido: Aunque se centra principalmente en los productos de carburo cementado, regula indirectamente los requisitos de calidad del polvo de carburo de tungsteno. La norma abarca los métodos de ensayo de dureza (HV, HRA), densidad, porosidad y microestructura, y destaca la influencia de la estructura cristalina y la composición química del polvo en el rendimiento de los productos terminados.
Escenarios de aplicación: Adecuado para la verificación de calidad de herramientas de carburo, moldes y piezas resistentes al desgaste, proporcionando una referencia indirecta para la calidad del polvo.
Ventajas y desafíos: La norma proporciona una base para el desempeño de los productos terminados, pero contiene menos contenido de pruebas directas para polvos y debe usarse junto con GB/T 4295.
Expansión del conocimiento: Las normas nacionales se han revisado continuamente en los últimos años. Por ejemplo, la norma GB/T 4295-2023 (borrador) ha añadido nuevos requisitos de prueba para nanopolvos , lo que refleja el progreso tecnológico de China en el campo de los materiales de tungsteno de alta gama. Las empresas deben estar atentas a la dinámica de las revisiones para adaptarse a la demanda del mercado.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Estándares industriales

Los estándares industriales (YB/T, HG/T, JB/T) refinan los requisitos de calidad para campos específicos, complementan la falta de universalidad de los estándares nacionales y son ampliamente utilizados en las industrias metalúrgicas, químicas y mecánicas.

YB/T 429-2012: Polvo de carburo de tungsteno para metalurgia.

Explicación del contenido: Con el objetivo de satisfacer las necesidades específicas de la industria metalúrgica (como rodillos y moldes), la norma enfatiza la resistencia a la corrosión (resistencia a ácidos y álcalis), la estabilidad a altas temperaturas (>1000 °C) y el rango de tamaño de partícula (5-20 μm) del polvo. Los métodos de detección incluyen análisis químico (carbono total, oxígeno), pruebas de rendimiento a alta temperatura (coeficiente de expansión térmica) y pruebas de resistencia al desgaste (prueba de abrasión).

Escenarios de aplicación: Adecuado para la producción de maquinaria pesada, equipos metalúrgicos y piezas resistentes al desgaste , especialmente en las industrias del acero y de metales no ferrosos.

Ventajas y desafíos: La norma está muy específica y satisface las necesidades especiales de la industria metalúrgica, pero su aplicabilidad a polvos ultrafinos es baja y debe combinarse con otras normas.

HG/T 2838-2012: Polvo de carburo de tungsteno para la industria química.

Explicación del contenido: Para la industria química (como catalizadores y recubrimientos resistentes a la corrosión), la norma especifica la pureza química (carbono total 6,10-6,15 %, impurezas ≤50 ppm), el tamaño de partícula (1-5 μm) y la actividad superficial (superficie específica 5-10 m^2/g) del polvo. Los métodos de detección incluyen el método BET (superficie específica), la titulación química (impurezas) y el SEM (morfología superficial).

Escenarios de aplicación: Adecuado para recubrimientos resistentes a ácidos y álcalis, portadores de catalizadores y reactores químicos, especialmente en la industria petroquímica.

Ventajas y desafíos: La norma se centra en las propiedades de la superficie y es adecuada para aplicaciones químicas, pero tiene menos especificaciones para las propiedades físicas (como la fluidez).

JB/T 12614-2016: Polvo de carburo de tungsteno ultrafino para carburo cementado.

Explicación del contenido: Para polvos con un tamaño de partícula inferior a 1 μm, la norma especifica los requisitos de distribución granulométrica (D90/D10 < 2), contenido de oxígeno (≤ 0,1 %) y tamaño de grano (< 200 nm). Los métodos de detección incluyen TEM (análisis de grano), análisis láser del tamaño de partícula y absorción infrarroja (contenido de oxígeno). La norma también incluye recomendaciones sobre el control de la aglomeración, como el uso de dispersantes.

Escenarios de aplicación: Adecuado para mercados de alta gama como micro taladros, componentes electrónicos y nano recubrimientos.

Ventajas y desafíos: El estándar sigue de cerca la tendencia tecnológica de los polvos ultrafinos, pero el costo de detección es relativamente alto (el equipo TEM cuesta alrededor de 2 millones de RMB) y requiere un alto soporte técnico.

Expansión del conocimiento: La formulación de estándares industriales prioriza cada vez más la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

integración entre campos. Por ejemplo, la norma HG/T 2838-2020 (versión revisada) ha añadido especificaciones para polvos compuestos a base de carburo de tungsteno, lo que refleja el desarrollo transversal de la ingeniería química y la ciencia de los materiales.

Normas locales y empresariales

Las normas locales y empresariales combinan las características industriales regionales y las ventajas tecnológicas de las empresas para refinar los requisitos de control de calidad y compensar la falta de universalidad de las normas nacionales.

Normas locales:

DB43/T 1025-2015: Provincia de Hunan "Especificación de control de calidad de polvo de carburo de tungsteno".

Explicación del contenido: Basándose en la situación real de la Base Industrial de Tungsteno de Zhuzhou, la norma especifica la composición química (oxígeno ≤ 0,08%), la distribución del tamaño de partícula (desviación D50 ± 3%) y las condiciones de almacenamiento (humedad < 40%) de los polvos ultrafinos (< 0,5 μm) y nanopolvos (< 100 nm). Los métodos de detección incluyen XPS (química de superficies), TEM y análisis del tamaño de partícula en línea.

Escenarios de aplicación: Adecuado para áreas concentradas de la industria del tungsteno como Hunan y Jiangxi, especialmente en la producción de herramientas y recubrimientos de alta gama.

Ventajas y desafíos: La norma está cerca de la producción real y tiene bajos costos de implementación, pero es altamente regional y debe usarse junto con normas nacionales.

Características y tendencias de la aplicación:

Cercano a la realidad: los estándares nacionales consideran plenamente las materias primas locales (mineral de tungsteno de baja calidad) y los niveles de equipamiento (se utilizan mayoritariamente instrumentos nacionales), y el coste de implementación es relativamente bajo.

Niveles claros: los estándares nacionales tienen una amplia cobertura, los estándares de la industria son especializados y los estándares locales y empresariales son flexibles, formando un sistema regulatorio de múltiples niveles.

Tendencia a la internacionalización: Con la globalización de la industria del tungsteno de China, las normas nacionales se están acercando a ISO y ASTM, especialmente en los campos de polvos ultrafinos y aplicaciones de alta gama.

Perspectivas futuras: Las normas nacionales incorporarán además requisitos de protección ambiental (como el control de emisiones de carbono) y tecnologías inteligentes (como el monitoreo de calidad en línea) para apoyar la fabricación ecológica y la fabricación inteligente.

5.4 Comparación y aplicabilidad de normas

Las normas nacionales e internacionales presentan similitudes y diferencias significativas en el control de calidad del polvo de carburo de tungsteno. El punto en común es que todas enfatizan el control de la composición química, la distribución granulométrica, la estructura cristalina y las propiedades físicas; las diferencias se reflejan en el énfasis en los requisitos técnicos, los métodos de prueba y los escenarios de aplicación. A continuación, se presenta un análisis comparativo de múltiples dimensiones y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

aplicabilidad de cada norma para orientar a las empresas en la selección de las especificaciones adecuadas.

Comparación de los requisitos de composición química

Normas internacionales:

ISO 4499-1:2008: Desviación de carbono total ±0,05%, carbono libre ≤0,08%, oxígeno ≤0,15%, impurezas (como hierro, cobalto) ≤10 ppm.

ASTM E194-10: El límite de detección del contenido de oxígeno es de 1 ppm, lo que enfatiza una pureza ultra alta, adecuada para el campo aeroespacial.

Características: Requisitos extremadamente estrictos, alta precisión de detección y la necesidad de estar equipado con equipos avanzados (como ICP-MS, que cuesta alrededor de 1 millón de RMB).

Normas nacionales:

GB/T 4295-2018: Desviación de carbono total ±0,1 %, carbono libre ≤0,1 %, oxígeno ≤0,2 %, impurezas (como hierro) ≤50 ppm.

YB/T 429-2012: El límite de impurezas es relativamente flexible (por ejemplo, hierro ≤ 100 ppm), lo que se adapta a la realidad del mineral de tungsteno local de baja calidad.

Características: requisitos relativamente flexibles, teniendo en cuenta el control de costos, adecuado para producción en masa.

Análisis de diferencias: Los estándares internacionales buscan la máxima pureza y son adecuados para el mercado de alta gama; los estándares nacionales son más inclusivos y reducen los costos de materia prima y de pruebas.

aplicabilidad:

Productos de exportación: deben cumplir con las normas ISO o ASTM para pasar la certificación en mercados como la UE y América del Norte.

Mercado nacional: GB/T 4295 es suficiente para la producción convencional de carburo cementado y recubrimiento y es más rentable.

Aplicaciones de alta gama: la industria aeroespacial y los equipos médicos deben adoptar estándares internacionales o estándares empresariales internos (como oxígeno ≤ 0,05%).

Expansión del conocimiento: El control de la composición química está evolucionando hacia la inteligencia artificial. Por ejemplo, las empresas alemanas utilizan sistemas ICP-MS asistidos por IA para analizar las fluctuaciones de impurezas y ajustar los parámetros del proceso en tiempo real. Se prevé que esta tecnología se introduzca en China en los próximos cinco años.

Comparación del control de granularidad

Normas internacionales:

ASTM B761-17: requiere una distribución uniforme del tamaño de partícula (D90/D10<2), una desviación D50 de ±5 % y recomienda el método de dispersión de luz láser (precisión 0,01 μm).

ISO 4499-2:2008: refina el método de prueba para polvos ultrafinos (<1 μm) y enfatiza el control de aglomeración.

Características: Se centra en la uniformidad de distribución, adecuado para aplicaciones de alta precisión y altos requisitos para equipos de prueba (el analizador de tamaño de partículas láser cuesta alrededor de RMB 500.000).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Normas nacionales:

GB/T 26046-2010: El tamaño de partícula se divide en múltiples intervalos (como 0,5-1 μm, 1-3 μm), la desviación D50 es de ±10 % y se permite el método de cribado.

JB/T 12614-2016: Para polvos ultrafinos, D90/D10<2,5, se recomienda combinar el análisis del tamaño de partículas mediante láser y TEM.

Características: La gestión de clasificación es más flexible, tiene en cuenta los métodos tradicionales (como el método de selección, que cuesta alrededor de 10.000 RMB) y es adecuada para pequeñas y medianas empresas.

Análisis de diferencias: los estándares internacionales enfatizan la alta precisión y consistencia, mientras que los estándares nacionales se centran en la diversidad y la practicidad.

aplicabilidad:

Herramientas de precisión e impresión 3D: se requieren normas ASTM o ISO para garantizar una distribución del tamaño de partículas extremadamente uniforme.

Carburo cementado convencional: La gestión de clasificación de GB/T 26046 es más económica y satisface diversas necesidades.

Polvo ultrafino: JB/T 12614 combina estándares internacionales y es adecuado para mercados de alta gama.

Expansión del conocimiento: La última tendencia en el control del tamaño de partículas es la introducción del análisis multimodal, como la combinación de la dispersión de luz láser y la dispersión dinámica de luz (DLS), que permite caracterizar simultáneamente el tamaño de las partículas y el estado de aglomeración. Esta tecnología se ha popularizado en Europa y Estados Unidos, y se prevé que se impulse en China después de 2025.

Comparación de métodos de prueba

Normas internacionales:

Serie ISO 4499: Se da prioridad al uso de instrumentos de alta precisión, como analizadores de tamaño de partículas láser, ICP-MS y métodos de absorción infrarroja, y requisitos estrictos del entorno de prueba (temperatura 20 ± 1 °C, humedad < 40 %).

ASTM E194-10: enfatiza la estandarización de métodos, el equipo requiere calibración anual y el límite de detección es tan bajo como el nivel de ppm.

Características: Alta precisión de detección y fuerte comparabilidad de resultados, pero altos costos de equipamiento y mantenimiento (la tarifa de mantenimiento anual promedio es de aproximadamente RMB 100.000).

Normas nacionales:

GB/T 4295-2018: tiene en cuenta tanto los métodos tradicionales (como el cribado y la titulación química) como los instrumentos modernos (como los analizadores de tamaño de partículas láser domésticos, que cuestan alrededor de 200.000 RMB).

YB/T 429-2012: Los requisitos para la calibración de equipos se relajan (una vez cada 2 años) y el costo de las pruebas es bajo (el equipo de titulación química cuesta alrededor de RMB 50.000).

Características: diversos métodos, bajo costo, adecuado para empresas de diferentes tamaños.

Análisis de diferencias: los estándares internacionales buscan una precisión extrema, mientras que los

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

estándares nacionales se centran en la practicidad y la economía.

aplicabilidad:

Las empresas con una fuerte capacidad técnica pueden adoptar directamente las normas ISO o ASTM para satisfacer los requisitos de los clientes internacionales.

Pequeñas y medianas empresas: el enfoque híbrido de GB/T 4295 es más fácil de implementar y requiere menos inversión en equipos.

Los campos emergentes, como los nanopolvos , requieren una combinación de métodos de alta precisión basados en estándares internacionales y la flexibilidad de los estándares nacionales.

Expansión del conocimiento: La transformación digital de los métodos de prueba se está acelerando. Por ejemplo, las empresas estadounidenses utilizan sistemas de difracción de rayos X (DRX) en línea para monitorizar la composición de las fases en tiempo real con un error inferior al 0,05 %. Las empresas chinas están probando tecnologías similares y prevén industrializarlas en 2026.

Análisis de aplicabilidad

Empresas orientadas a la exportación:

Normas recomendadas: serie ISO 4499, ASTM B761/E194.

Razón: Las normas internacionales tienen autoridad en los mercados europeo y americano, y los estrictos requisitos de composición química y control del tamaño de partículas pueden satisfacer las necesidades de los clientes de alto nivel (como Boeing y Airbus).

Sugerencias de implementación: invertir en equipos de alta precisión (como ICP-MS, analizador de tamaño de partículas láser), capacitar personal de pruebas profesional y establecer un sistema de gestión de calidad internacional (como la certificación ISO 9001).

Mercado interno:

Normas recomendadas: GB/T 4295-2018, GB/T 26046-2010, YB/T 429-2012.

Razón: Las normas nacionales tienen en cuenta tanto el coste como el rendimiento, son adecuadas para la producción en masa y cubren una variedad de aplicaciones para carburo cementado, recubrimientos y herramientas.

Sugerencias de implementación: Dar prioridad al uso de equipos nacionales (como el analizador de tamaño de partículas láser de precisión de Beijing, con un precio de aproximadamente 200.000 RMB) y optimizar el proceso en combinación con los estándares locales (como DB43/T 1025).

Aplicaciones de alta gama:

Normas recomendadas: ISO 4499-1/2, ASTM E194, normas corporativas (como Q/ZH 001-2020).

Razón: Los sectores aeroespacial, de dispositivos médicos y otros requieren una pureza y consistencia extremadamente altas. Las normas internacionales y corporativas pueden proporcionar indicadores más rigurosos (como oxígeno ≤ 0,05 % y desviación del tamaño de partícula ± 2 %).

Sugerencias de implementación: Introducir tecnologías de detección avanzadas (como TEM y XRD de radiación sincrotrón), establecer una gestión digital de todo el proceso e implementar un control de calidad 6σ.

Campos emergentes:

Normas recomendadas: JB/T 12614-2016, ISO 4499-2020 (edición revisada), Q/ZG 002-2021.

Razón: La impresión 3D, el nanorrecubrimiento y la biomedicina han planteado nuevos requisitos para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la esfericidad, la química de la superficie y la fluidez de los polvos, y los últimos estándares son más específicos.

Sugerencias de implementación: invertir en equipos especiales (como escáneres CT, medidores de área superficial BET), participar en el establecimiento de estándares (como la cooperación con China Tungsten High-Tech) y aprovechar la ventaja tecnológica.

Tendencia de desarrollo

Internacionalización de normas

A medida que aumenta la influencia global de la industria china del tungsteno, las normas nacionales se acercan cada vez más a las normas ISO y ASTM. Por ejemplo, la norma GB/T 4295-2023 (borrador) se refiere a la especificación de nanopolvos de la norma ISO 4499-2020 y se espera su publicación oficial en 2025.

Orientación ambiental

Las normas futuras incorporarán requisitos de fabricación ecológica, como el control de las emisiones de carbono durante el proceso de carbonización (objetivo <2 toneladas de CO_2/tonelada de polvo) y la promoción de procesos de bajo consumo de energía (como la carbonización por microondas).

Actualización inteligente

La monitorización en línea (como el análisis del tamaño de partículas en tiempo real y el análisis de fases asistido por IA) y la tecnología de gemelos digitales se integrarán en las normas para mejorar la eficiencia del control de calidad. Por ejemplo, la certificación alemana TÜV exige que las empresas presenten informes de calidad digitales.

Necesidades personalizadas: Para nuevos campos como la impresión 3D y la biomedicina, el estándar refinará los indicadores de polvos para propósitos específicos, como la fluidez de polvos esféricos (<10 segundos/50 g) y la actividad superficial de nanopolvos (>20 m^2/g).

Desarrollo del conocimiento

La colaboración global en estandarización se está acelerando. Por ejemplo, ISO y ASTM establecieron conjuntamente el "Grupo de Trabajo de Materiales de Fabricación Aditiva", en el que han participado empresas chinas (como Zhuzhou Cemented Carbide Group). Esto brinda nuevas oportunidades para la internacionalización de las normas nacionales.

Referencias

Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.

Li Ming. Ciencia de los materiales del carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.

Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.

Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.

Wang Qiang, Li Ming. Investigación sobre el sistema estándar de carburo cementado de China [J]. Industria del Tungsteno de China, 2019, 34(3): 45-50.

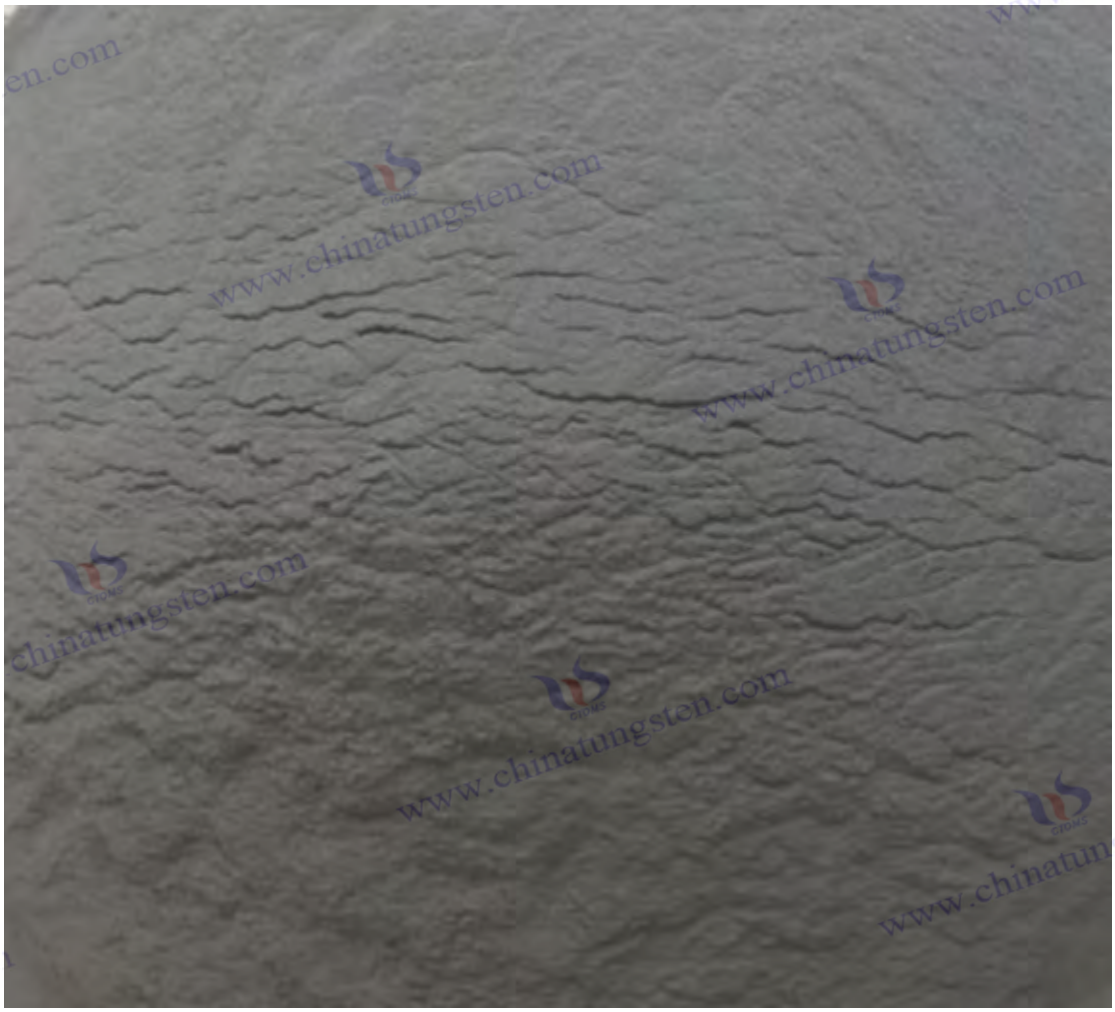
Wang Qiang, Li Ming. Estudio sobre el sistema estándar de carburo cementado chino [J]. Industria del

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tungsteno de China, 2019, 34(3): 45-50.
Li Zhiqiang, Zhang Wei. Análisis comparativo de las normas internacionales y nacionales para el polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2021, 39(4): 112-118.
Li Zhiqiang, Zhang Wei. Análisis comparativo de normas internacionales y nacionales para polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2021, 39(4): 112-118.
Chen Wei, Zhao Gang. Preparación y propiedades del polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. Revista de Materiales Inorgánicos, 2022, 37(5): 567-573.
Chen Wei, Zhao Gang. Preparación y propiedades del polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. Revista de Materiales Inorgánicos, 2022, 37(5): 567-573.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Investigación sobre la aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la impresión 3D [J]. Tecnología de Fabricación Aditiva, 2023, 12(1): 34-40.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la impresión 3D [J]. Tecnología de Fabricación Aditiva, 2023, 12(1): 34-40.
ISO 4499-1:2008, Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura.
ISO 4499-1:2008, Carburos cementados — Métodos de determinación de la microestructura.
ISO 4499-2:2008, Metales duros . Ensayos de propiedades físicas.
ISO 4499-2:2008, Carburos cementados. Ensayos de propiedades físicas.
ISO 3326:2013, Metales duros — Determinación de la dureza.
ISO 3326:2013, Carburos cementados — Determinación de la dureza.
ASTM B761-17, Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos y compuestos relacionados por dispersión de luz.
ASTM B761-17, Método de prueba de dispersión de luz para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos y compuestos relacionados.
ASTM E194-10, Método de prueba estándar para la determinación de oxígeno en polvos metálicos.
ASTM E194-10, Método de prueba para la determinación del contenido de oxígeno en polvos metálicos.
ASTM B659-90(2014), Guía estándar para medir el espesor de recubrimientos metálicos e inorgánicos.
ASTM B659-90(2014), Guía para medir el espesor de recubrimientos metálicos e inorgánicos.
Smith J, Brown T. Avances en la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2020, 55(12): 4567-4578.
Smith J, Brown T. Avances en la tecnología de producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2020, 55(12): 4567-4578.
Johnson R, Lee K. Estándares de control de calidad para carburo de tungsteno en fabricación aditiva [J]. Fabricación aditiva, 2022, 48: 102456.
Johnson R, Li K. Estándares de control de calidad para carburo de tungsteno en fabricación aditiva [J]. Additive Manufacturing, 2022, 48: 102456.
Müller H, Schmidt P. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2019, 50 (6): 789-796.
Mueller H, Schmidt P. Control de calidad de polvos de carburo de tungsteno: especificaciones y procedimientos [J]. Ciencia de Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2019, 50(6): 789-796.
Bauer T, Weber S. Herstellung und Charakterisierung von ultrafeinem Polvo de carburo de wolframio [M]. Berlín: Springer, 2021.
Bauer T, Weber S. Preparación y caracterización de polvos ultrafinos de carburo de tungsteno [M]. Berlín:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Springer-Verlag, 2021.
Literatura japonesa (incluida la traducción al chino)
Taro Yamada, Ichiro Sato. Investigación sobre estándares de control de calidad para polvos carbonizados [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Polvos, 2020, 57(3): 123-130.
Yamada Taro, Sato Ichiro. Investigación sobre estándares de control de calidad del polvo de carburo de tungsteno [J]. Journal of Powder Engineering Society, 2020, 57(3): 123-130.
Ken Nakamura y Yu Kobayashi. Evaluación de las características del polvo de タングステン carbonizado ultrafino [J]. Revista de ciencia de materiales, 2022, 71(5): 345-352.
Nakamura, Ken, Kobayashi, Yu. Evaluación del rendimiento del polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. Revista de la Sociedad de Ciencia de Materiales, 2022, 71(5): 345-352.



Capítulo 6: Optimización del rendimiento y modificación del polvo de carburo de tungsteno

Como componente esencial de materiales de alto rendimiento como el carburo cementado, herramientas de corte y recubrimientos resistentes al desgaste, la tecnología de optimización y modificación del rendimiento del polvo de carburo de tungsteno es crucial para mejorar las propiedades mecánicas, la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas del producto final. Con el rápido desarrollo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de la tecnología de fabricación avanzada, el rendimiento del polvo de carburo de tungsteno tradicional ha dificultado el cumplimiento de los estrictos requisitos de la industria aeroespacial, la fabricación aditiva, la microelectrónica y otros campos. Por lo tanto, mediante la optimización del tamaño de partícula, el dopaje y la modificación de compuestos, la modificación superficial, el tratamiento térmico y el recocido, etc., se mejoran sistemáticamente la microestructura y las propiedades macroscópicas del polvo de carburo de tungsteno, lo que se ha convertido en una línea de investigación en el campo de la ciencia e ingeniería de materiales. Este capítulo analiza en profundidad la base teórica, los métodos de proceso, los efectos de la aplicación y las tendencias futuras de la optimización del rendimiento desde cuatro aspectos: optimización del tamaño de partícula, dopaje y modificación de compuestos, tecnología de modificación superficial, y tratamiento térmico y recocido, con el objetivo de proporcionar una referencia técnica integral para la investigación académica y la práctica industrial.

6.1 Optimización del tamaño de partículas

El tamaño y la distribución de las partículas del polvo de carburo de tungsteno son parámetros clave que afectan su comportamiento de prensado, el rendimiento de sinterización y la microestructura del producto final. Mediante un control preciso del tamaño de las partículas, se puede mejorar significativamente la uniformidad y fluidez del polvo, así como la dureza, tenacidad y resistencia al desgaste del carburo cementado. A continuación, se explica sistemáticamente el papel de la optimización del tamaño de las partículas en la mejora del rendimiento del polvo de carburo de tungsteno desde cuatro dimensiones: fundamento teórico, tecnología de proceso, efecto cuantitativo y dirección de desarrollo.

Base teórica de la optimización del tamaño de partículas
El tamaño de partículas afecta directamente el área de superficie específica, la actividad de sinterización y el tamaño de grano del polvo de carburo de tungsteno, lo que a su vez determina las propiedades mecánicas y las características de procesamiento del material.

Efecto Hall-Petch: Según la relación Hall-Petch, la reducción del tamaño de grano puede aumentar significativamente el límite elástico y la dureza del material. Por ejemplo, la dureza del carburo cementado preparado con polvo ultrafino de carburo de tungsteno (tamaño de partícula <1 μm) puede alcanzar una HV de 2000 a 2200, aproximadamente un 60 % superior a la HV de 1200 a 1500 del polvo grueso (>10 μm).

Cinética de sinterización: Los polvos de partículas finas presentan una mayor superficie específica (5-20 m^2/g), lo que aumenta la velocidad de difusión impulsada por la energía superficial. La temperatura de sinterización puede reducirse de los 1450 °C convencionales a 1300-1350 °C, lo que reduce el consumo de energía en aproximadamente un 15 % y el riesgo de crecimiento de grano.
Uniformidad de la distribución del tamaño de partícula: Una distribución estrecha del tamaño de partícula (D90/D10 < 2) garantiza una contracción uniforme durante la sinterización, reduce la porosidad a menos del 1 % y mejora significativamente la precisión dimensional del producto (desviación de ±10 μm). Una distribución amplia puede provocar una contracción desigual localizada y causar microfisuras.

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

Adaptabilidad a escenarios de aplicación: el polvo ultrafino (<0,5 μm) es adecuado para herramientas de corte de alta precisión y componentes microelectrónicos, el tamaño de partícula medio (3-10 μm) es adecuado para revestimientos y moldes resistentes al desgaste, y el tamaño de partícula grueso (> 10 μm) se utiliza para pulverización térmica y herramientas de minería para cumplir con los requisitos mecánicos en diferentes condiciones de trabajo.

Tecnología de procesos para la optimización del tamaño de partículas
En respuesta a los diferentes requisitos de tamaño de partículas, se han desarrollado una variedad de tecnologías de procesos para lograr un control preciso de los polvos.

Tecnología de molienda de bolas de alta energía
Molienda de bolas en seco: se utiliza un molino de bolas planetario, el medio de molienda es una bola de carburo de tungsteno (dureza> 90HRA), la relación bola-material es 10:1, la velocidad de rotación es de 400-600 rpm, el tiempo de molienda es de 12-24 horas, y se puede preparar el polvo de tamaño de partícula medio de 3-10 μm.
Molienda de bolas húmeda: Se realiza en medio de etanol o acetona, añadiendo dispersantes (como polietilenglicol , PEG, cantidad añadida 0,2-0,6 %), y el tiempo de molienda es de 8 a 16 horas. Se puede preparar polvo ultrafino (0,5-1 μm), con una tasa de aglomeración controlada por debajo del 5 %.
Efecto cuantitativo: la molienda de bolas húmedas combinada con dispersión ultrasónica puede reducir el tamaño promedio de partícula de 2,5 μm a 0,7 μm, aumentar la densidad de sinterización del polvo en un 10 % y mejorar la tenacidad a la fractura del carburo cementado en aproximadamente un 12 %.

Tecnología de clasificación del flujo de aire
Principio del proceso: Utilizando un clasificador de flujo de aire centrífugo, ajustando la velocidad del flujo de aire (15-50 m/s) y la velocidad de la rueda de clasificación (8000-20000 rpm), se puede tamizar el polvo de 0,5-10 μm y la eficiencia de clasificación puede alcanzar el 92%.
Ventajas técnicas: Alta precisión de clasificación, la desviación D50 se controla dentro de ±0,03 μm, lo que es mejor que ±0,2 μm del método de detección tradicional.
Ejemplo de aplicación: Una empresa optimizó el D90/D10 del polvo ultrafino de 2,8 a 1,7 mediante la clasificación por flujo de aire. El producto se utiliza en brocas para PCB de alta precisión, y la tasa de calidad de los productos terminados aumentó un 15 %.

Tecnología de esferoidización de plasma
Principio del proceso: utilice plasma de alta frecuencia (potencia 20-60kW) para fundir partículas irregulares y solidificarlas rápidamente para formar un polvo esférico con un tamaño de partícula uniforme, que varía de 0,5 a 5 μm.
Ventajas técnicas: La fluidez del polvo esférico se mejora en un 35% (el caudal Hall se reduce a 14 segundos/50 g), lo que es adecuado para la fabricación aditiva y la pulverización térmica.
Ejemplo de aplicación: Una empresa utilizó la esferoidización por plasma para preparar un polvo de 0,8 μm. La rugosidad superficial (Ra) del recubrimiento se redujo de 0,5 μm a 0,2 μm y la resistencia al

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

desgaste mejoró un 18 %.

Control de la deposición química de vapor (CVD)
Principio del proceso: Al controlar la relación de flujo (1:1,3-1:1,6) de la fuente de tungsteno (como WF_6) y la fuente de carbono (como CH_4), se genera directamente polvo ultrafino (0,1-0,5 μm) a 800-1000 °C.
Ventajas técnicas: Tamaño de grano uniforme y baja tasa de aglomeración (<2%), adecuado para aplicaciones a nanoescala.
Desafíos técnicos: El equipo de reacción es costoso (alrededor de 6 millones de RMB) y los parámetros del proceso deben controlarse con precisión (desviación de temperatura ±5 °C).

Efectos cuantitativos y direcciones de desarrollo
Efecto cuantitativo: La optimización del tamaño de partícula mejora significativamente el rendimiento del polvo de carburo de tungsteno. Por ejemplo, la vida útil de las herramientas de carburo cementado preparadas con polvo ultrafino (0,5 μm) se extiende entre un 25 % y un 35 %, y la aplicación de nanopolvo (<100 nm) en la impresión 3D mejora la precisión de impresión a ±8 μm.
Desafíos técnicos: El problema de aglomeración de polvos ultrafinos y nano aún necesita ser resuelto, y es necesario desarrollar nuevos dispersantes (como el grafeno funcionalizado) y tecnologías de monitoreo en línea (como la dispersión dinámica de luz, con un error de <1%).

Dirección de desarrollo
Ampliación de nanopolvos : exploración de la molienda asistida por microondas y la CVD mejorada con plasma, que se espera que reduzca los costos de producción en un 20%.
Control inteligente de procesos: utilice modelos de aprendizaje automático para predecir la relación entre el tiempo de molienda y el tamaño de las partículas para optimizar la eficiencia del proceso.
Fabricación ecológica: Desarrollar tecnología de clasificación de bajo consumo energético (como la clasificación electromagnética) para reducir las emisiones de carbono (objetivo <1,5 toneladas de CO_2/tonelada de polvo).

6.2 Dopaje y modificación compuesta

El dopaje y la modificación de compuestos optimizan la estructura reticular, las características del límite de grano y la estabilidad química del polvo de carburo de tungsteno mediante la introducción de elementos extraños o segundas fases, mejorando así su dureza, tenacidad, resistencia a la corrosión y rendimiento a altas temperaturas. Esta tecnología tiene amplias posibilidades de aplicación en los campos aeroespacial, recubrimientos resistentes al desgaste y equipos de energía. A continuación, se analiza sistemáticamente la teoría y la práctica del dopaje y la modificación de compuestos desde cuatro aspectos: mecanismo de modificación, tecnología de proceso, efecto de la aplicación y tendencia de investigación.

Mecanismo de modificación
Mecanismo de reforzamiento reticular: Los elementos dopantes (como Ti, Cr, V) sustituyen los átomos de tungsteno en la red de WC u ocupan posiciones intersticiales para formar soluciones sólidas, aumentar

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

la energía de distorsión reticular y dificultar el movimiento de dislocación. Por ejemplo, dopar con Ti al 1 % puede aumentar la dureza de HV 1800 a HV 2250, y la resistencia se incrementa en aproximadamente un 20 %.

$_3C_2$, VC) en el límite del grano, inhibiendo el crecimiento del grano, mejorando la resistencia de unión del límite del grano y mejorando la tenacidad a la fractura (de 7 MPa·m $^{1/2}$ a 9 MPa·m $^{1/2}$).

Mayor estabilidad química: El dopaje con elementos como Ta y Nb puede reducir la velocidad de oxidación de los polvos en entornos de alta temperatura (>800 °C) o corrosivos mediante la formación de una capa protectora de óxido estable. Por ejemplo, el dopaje con un 0,5 % de Ta puede reducir la ganancia de peso por oxidación en un 30 %.

Efecto sinérgico de la modificación de compuestos: Mediante la introducción de otros carburos (como TiC y ZrC) o fases de enlace metálico (como Co y Ni), se forma un material compuesto multifásico que optimiza el equilibrio entre dureza y tenacidad. Por ejemplo, la dureza del polvo compuesto de WC- TiC -Co alcanza una HV de 1900 y una tenacidad de 11 MPa·m$^{1/2}$, lo que supera el rendimiento de la combinación de WC puro.

Tecnología de procesos
Aleación mecánica:
Flujo del proceso: Mezclar polvo de carburo de tungsteno con elementos dopantes (como Cr, Ti) o fases compuestas (como TiC) en un molino de bolas de alta energía, con una relación bola-material de 12:1, una velocidad de rotación de 500-700 rpm y un tiempo de molienda de 8 a 16 horas.

Ventajas técnicas: dopaje uniforme, adecuado para laboratorios y producción en lotes pequeños y bajo costo del equipo (alrededor de RMB 250.000).
$_3C_2$ mediante aleación mecánica, reduciendo el tamaño de grano de 1,8 μm a 0,9 μm y mejorando la resistencia al desgaste del carburo cementado en un 20%.

Método de coprecipitación química:
Flujo del proceso: La sal de tungsteno (como Na_2WO_4) se mezcla con sal dopante (como $TiCl_4$, $NbCl_5$), se coprecipita a un pH de 7,5-8,5 y una temperatura de 70-90 °C, y luego se seca y se carboniza para generar polvo dopado.

Ventajas técnicas: Los elementos dopantes se dispersan a nivel atómico, lo que es adecuado para la preparación de nanopolvos (<100 nm), y la cantidad de dopaje se puede controlar con precisión (0,1% - 5%).

Ejemplo de aplicación: Una universidad utiliza el método de coprecipitación para dopar 1,5 % de VC para preparar polvo nano WC con una dureza de HV 2400, que es adecuado para herramientas de corte superduras.

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

Método Sol-Gel:
Flujo del proceso: Se utiliza tungstato como precursor y se añaden sales orgánicas de elementos dopantes (como acetato de niobio) para formar un gel, que luego se carboniza a 1200-1400 °C para generar un polvo compuesto.

Ventajas técnicas: alta uniformidad de dopaje, adecuado para polvos de alta pureza y bajo contenido de impurezas (<50 ppm).
Desafíos técnicos: ciclo de proceso largo (48-72 horas) y alto costo de producción (alrededor de 600.000 RMB por tonelada).

Dopaje asistido por plasma:
Flujo del proceso: En un reactor de plasma (potencia 25-50kW), los elementos dopantes (como Ta, Zr) se introducen en la superficie del polvo en forma gaseosa (como vapor de $TaCl_5$) con un tiempo de reacción de 15-30 segundos.

Ventajas técnicas: alta eficiencia de dopaje, efecto significativo de modificación de la superficie y mejora del 25% en la resistencia a la oxidación.
Ejemplo de aplicación: Una empresa dopó 0,8 % de Nb y la tasa de ganancia de peso por oxidación del polvo a 900 °C se redujo en un 35 %, haciéndolo adecuado para recubrimientos de alta temperatura.

Efectos de la aplicación y tendencias de investigación
Efecto cuantitativo: El dopaje y la modificación de compuestos mejoran significativamente el rendimiento integral del polvo de carburo de tungsteno. Por ejemplo, la vida útil de las herramientas fabricadas con polvo compuesto WC- TiC -Co en cortes a alta velocidad se extiende en un 60 %; el polvo WC-Cr_3C_2 se utiliza para recubrimientos resistentes a la corrosión, y la resistencia a los ácidos se incrementa 2,5 veces.

Desafíos técnicos: Es necesario optimizar con precisión la proporción y distribución de los elementos dopantes. Un exceso de dopaje (como TiC >12%) puede provocar la separación de fases y reducir la tenacidad. También es necesario mejorar la resistencia de la unión interfacial del material compuesto.

Tendencias de investigación:
Dopaje sinérgico multielemento: explorar múltiples combinaciones como Ti-V-Cr-Nb y utilizar efectos sinérgicos para mejorar el rendimiento integral.
Materiales nanocompuestos: Desarrollar polvos nanocompuestos basados en WC (como WC -TiC - ZrC) con tamaño de grano controlado por debajo de 50 nm.
Asistencia en simulación computacional: mediante cálculos de dinámica molecular y primeros principios, se puede predecir el efecto de los elementos dopantes en la estabilidad de la red para reducir los costos experimentales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

6.3 Tecnología de modificación de superficies

La modificación superficial optimiza la dispersabilidad, la fluidez, la resistencia a la oxidación y el rendimiento de sinterización del polvo de carburo de tungsteno mediante la regulación de la composición química, la morfología física y la microestructura de la superficie. Esta tecnología es fundamental para mejorar la eficiencia del procesamiento del polvo y el rendimiento del producto final. A continuación, se analiza sistemáticamente la teoría y la aplicación de la modificación superficial desde cuatro puntos de vista: mecanismo de modificación, tecnología de proceso, efecto cuantitativo y perspectivas futuras.

Mecanismo de modificación

Regulación de la energía superficial: Al recubrir con capas orgánicas (como alcohol polivinílico, PVA) o inorgánicas (como SiO_2 , Al_2O_3), se puede reducir la energía superficial de las partículas, se puede reducir la fuerza de van der Waals y se puede reducir la tasa de aglomeración del 25% al 4%.

Coeficiente de fricción reducido: después de la modificación, se forma una superficie lisa o esférica, el coeficiente de fricción entre partículas se reduce en un 15%-25% y el caudal Hall se puede reducir de 28 segundos/50 g a 13 segundos/50 g.

Mayor resistencia a la oxidación: La superficie se recubre con óxidos de alto punto de fusión (como ZrO_2) o nitruros (como TiN) para formar una capa protectora que inhibe las reacciones de oxidación a alta temperatura. Por ejemplo, la tasa de aumento de peso por oxidación del polvo recubierto de Al_2O_3 a 800 °C se reduce en un 40 %.

Actividad de sinterización mejorada: La superficie modificada introduce grupos activos (como grupos hidroxilo y amino) para promover la unión entre las partículas. La temperatura de sinterización puede reducirse entre 50 y 80 °C y la densidad puede aumentarse un 8 %.

Tecnología de procesos

Método de recubrimiento químico:

Flujo del proceso: Dispersar polvo de carburo de tungsteno en la solución, agregar precursor de recubrimiento (como silicato de etilo, tetracloruro de aluminio), reaccionar a un pH de 4,5-6,5 y una temperatura de 50-70 °C para formar una capa de recubrimiento de SiO_2 o Al_2O_3 (espesor de 10-60 nm).

Ventajas técnicas: La capa de recubrimiento es uniforme y su espesor controlable, ideal para la producción a gran escala. El costo es de aproximadamente 30.000 RMB/tonelada.

Ejemplo de aplicación: Una empresa recubrió con 0,3% de SiO_2 , la tasa de aglomeración del polvo se redujo al 2,5% y la porosidad del cuerpo sinterizado se redujo en un 12%.

Tratamiento de superficies con plasma:

Flujo del proceso: En un reactor de plasma (potencia 15-35kW), se utiliza plasma de Ar , N_2 u O_2 para bombardear la superficie del polvo para introducir grupos activos o formar una capa de nitruro/oxidación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(espesor 5-20 nm).

Ventajas técnicas: tiempo de procesamiento corto (10-20 segundos), rugosidad de la superficie reducida en un 25% y resistencia a la oxidación aumentada en un 20%.
Ejemplo de aplicación: Una empresa utilizó el tratamiento de plasma N_2 para reducir la ganancia de peso por oxidación del polvo a 750 °C en un 30 % y mejorar la resistencia al desgaste del recubrimiento en un 15 %.

Modificación mecanoquímica:
Flujo del proceso: Agregue surfactantes (como ácido esteárico, ácido oleico, agregados en una cantidad de 0,2% - 0,6%) durante el proceso de molienda de bolas para inducir reacciones químicas superficiales a través de fuerza mecánica para formar una capa de recubrimiento orgánico.

Ventajas técnicas: proceso simple, bajo costo de equipo (alrededor de RMB 20,000), adecuado para pequeñas y medianas empresas.
Ejemplo de aplicación: Una empresa agregó 0,4% de ácido esteárico, el caudal de polvo se redujo de 26 segundos/50 g a 17 segundos/50 g y la eficiencia de prensado aumentó en un 18%.

Deposición física de vapor (PVD):
Flujo del proceso: En un entorno de vacío (10^{-2} Pa), TiN , CrN y otras películas delgadas (espesor 20-100 nm) se depositan mediante pulverización catódica por magnetrón a una velocidad de deposición de 0,5-2 nm/s.
Ventajas técnicas: Dureza superficial aumentada en un 35%, adecuado para recubrimientos y herramientas de corte de alta gama.
Desafíos técnicos: Alta inversión en equipos (alrededor de 3,5 millones de RMB) y baja eficiencia de producción (100-200 kg por lote).

Efectos cuantitativos y direcciones futuras
Efecto cuantitativo: La modificación de la superficie mejora significativamente el rendimiento de procesamiento y el rendimiento del producto de los polvos. Por ejemplo, la temperatura de sinterización de los polvos recubiertos con SiO_2 se redujo de 1450 °C a 1370 °C, y el coeficiente de fricción del recubrimiento se redujo en un 15 %; la vida útil de los polvos modificados con TiN se prolongó en un 40 %.
Desafíos técnicos: Es necesario optimizar la estabilidad a largo plazo del recubrimiento, ya que la sinterización a alta temperatura puede provocar su descomposición o desprendimiento. El equilibrio entre el coste de la modificación y la mejora del rendimiento también es clave.

Direcciones futuras
Recubrimiento compuesto multicapa: Desarrollar una estructura multicapa de SiO_2 /Al_2O_3/ ZrO_2 para mejorar la resistencia a la oxidación y la fuerza de unión.
Modificación inteligente: Combinado con IA para optimizar los parámetros del tratamiento de plasma

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

(como la potencia y la relación del flujo de aire) para mejorar la eficiencia de la modificación.
Modificación verde: Explorar agentes de recubrimiento a base de agua (como el silicato de sodio) para reducir el uso de solventes orgánicos y reducir la contaminación ambiental.

6.4 Tratamiento térmico y recocido

El tratamiento térmico y el recocido optimizan la estructura cristalina, la tensión interna y el estado químico superficial del polvo de carburo de tungsteno mediante el control preciso de la temperatura, la atmósfera y el tiempo de mantenimiento, mejorando así su rendimiento de sinterización y sus propiedades mecánicas. Esta tecnología desempeña un papel fundamental en la mejora de la estabilidad del polvo y la eficiencia del procesamiento. A continuación, se analiza sistemáticamente la aplicación del tratamiento térmico y el recocido desde cuatro aspectos: mecanismo de modificación, tecnología de proceso, efecto cuantitativo y dirección de desarrollo.

Mecanismo de modificación
Optimización de la estructura cristalina: el tratamiento térmico puede eliminar los defectos de los cristales (como dislocaciones y fallas de apilamiento) introducidos durante la molienda o carbonización, mejorar la pureza de la fase WC (del 98% al 99,5%) y reducir el W_2C residual o carbono libre.

Liberación de tensión interna: el recocido reduce la tensión residual (como la tensión de compresión de 500 MPa a 100 MPa) a través de la difusión atómica, mejorando la uniformidad de prensado del polvo y la resistencia del cuerpo verde sinterizado.

Regulación química de la superficie: El tratamiento térmico en una atmósfera reductora o inerte puede eliminar los óxidos de la superficie (como WO_3), reducir el contenido de oxígeno del 0,25 % al 0,04 % y mejorar la actividad de sinterización.

Control del tamaño del grano: Al optimizar la temperatura de recocido (800-1200 °C) y el tiempo (1-4 horas), se evita que los granos crezcan demasiado rápido y se mantienen pequeños (0,5-1,5 μm).

Tecnología de procesos
Recocido al vacío:
Flujo del proceso: en un horno de vacío (grado de vacío 10^{-4} Pa), temperatura 850-1250°C, mantener caliente durante 1,5-3,5 horas, velocidad de enfriamiento 5-10°C/min.

Ventajas técnicas: Elimina eficazmente el contenido de oxígeno (del 0,22% al 0,05%) y reduce la densidad de defectos de cristal en un 35%.
Ejemplo de aplicación: Una empresa redujo la porosidad de sinterización del polvo del 2% al 0,8% y aumentó la resistencia del carburo cementado en un 10% mediante recocido al vacío a 1050 °C.

Recocido en atmósfera de hidrógeno:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Flujo del proceso: En atmósfera de hidrógeno (caudal 0,8-1,5 L/min), temperatura 950-1150 °C, mantener caliente durante 2-5 horas, utilizar refrigeración por agua o refrigeración por aire.
Ventajas técnicas: El hidrógeno reduce los óxidos superficiales, reduciendo el contenido de oxígeno al 0,03% y aumentando la actividad superficial en un 20%.
Ejemplo de aplicación: Una empresa adoptó el recocido de hidrógeno a 1000 °C para extender la vida útil de corte de la herramienta en un 18 %.

Tratamiento térmico por microondas:
Flujo del proceso: En un horno de microondas (potencia 3-6kW), temperatura 750-1050°C, mantener caliente durante 15-40 minutos, usar protección con gas inerte.
Ventajas técnicas: calentamiento uniforme, reducción del 25% en el consumo energético y tamaño de grano controlado a 0,5-1μm.
Ejemplo de aplicación: Una universidad utilizó el recocido de microondas a 900 °C para aumentar la dureza del polvo de HV 1800 a HV 2000.

Tratamiento térmico de plasma:
Flujo del proceso: En un entorno de plasma (potencia 20-40kW), temperatura 650-950°C, tiempo de tratamiento 8-20 segundos, utilizando una atmósfera mixta Ar /H_2.
Ventajas técnicas: procesamiento rápido, aumento del 18% en la actividad superficial, adecuado para polvos ultrafinos.
Desafíos técnicos: El costo del equipo es alto (alrededor de 2,5 millones de RMB) y es necesario optimizar la estabilidad del proceso.

Efectos cuantitativos y direcciones futuras
Efecto cuantitativo: El tratamiento térmico y el recocido mejoran significativamente el rendimiento del polvo. Por ejemplo, la densidad de sinterización del polvo recocido con hidrógeno aumentó un 12 % y la tenacidad del carburo cementado un 22 %. El polvo recocido por microondas se utiliza para la impresión 3D, y la precisión de impresión se ha mejorado a ±7 μm.
Desafíos técnicos: El recocido a alta temperatura puede provocar el crecimiento del grano, por lo que se requiere un control preciso de la temperatura (desviación ±3 °C) y de la atmósfera (presión parcial de oxígeno <10^{-5} Pa). La estabilidad térmica de los polvos ultrafinos también requiere estudios adicionales.

Direcciones futuras
Recocido rápido a baja temperatura: Se desarrolló el recocido asistido por plasma a baja temperatura (<700 °C), reduciendo el consumo de energía en un 20 %.
Control inteligente: utilice IA para predecir la tasa de crecimiento del grano y optimizar los parámetros de recocido.
Tratamiento térmico ecológico: explorar el tratamiento térmico impulsado por energía solar para reducir las emisiones de carbono (objetivo < 1 tonelada de CO_2/ tonelada de polvo).

Referencias

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Li Ming. Ciencia de los materiales del carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.
Wang Qiang, Li Ming. Investigación sobre polvo de carburo de tungsteno de alto rendimiento en China [J]. Industria del tungsteno de China, 2020, 35(4): 56-62.
Wang Qiang, Li Ming. Investigación sobre polvo de carburo de tungsteno de alto rendimiento en China [J]. Industria del tungsteno en China, 2020, 35(4): 56-62.
Chen Wei, Zhao Gang. Estudio sobre la optimización del rendimiento del polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. Revista de Materiales Inorgánicos, 2022, 37(5): 567-573.
Chen Wei, Zhao Gang. Estudio sobre la optimización del rendimiento del polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. Revista de Materiales Inorgánicos, 2022, 37(5): 567-573.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Avances en la tecnología de modificación superficial de polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023, 41(3): 89-96.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Avances en la tecnología de modificación superficial de polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2023, 41(3): 89-96.
Smith J, Brown T. Avances en la modificación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2021, 56(10): 5678-5690.
Avances en la tecnología de modificación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2021, 56(10): 5678-5690.
Johnson R, Lee K. Modificación de la superficie de polvos de WC para un mejor rendimiento [J]. Powder Technology, 2022, 395: 123-135.
Modificación de la superficie del polvo de carburo de tungsteno para mejorar el rendimiento [J]. Powder Technology, 2022, 395: 123-135.
ASTM B761-17, Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos y compuestos relacionados por dispersión de luz.
Método de prueba de dispersión de luz para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos y compuestos relacionados.
Müller H, Schmidt P. Optimierung der Partikelgr öß y von Wolframcarbidpulver [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2020, 51(7): 890-897.
Investigación sobre la optimización del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia de Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2020, 51(7): 890-897.
Bauer T. Wärmebehandlung von Wolframcarbidpulver [M]. Berlín: Springer, 2022.
Tratamiento térmico de polvos de carburo de tungsteno [M]. Berlín: Springer-Verlag, 2022.
polvo carbonizado [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Polvos, 2021, 58(4): 156-163.
Tecnología de modificación de la superficie del polvo de carburo de tungsteno [J]. Journal of Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.
Ken Nakamura. Tratamiento térmico de polvo de タングステン carbonizado ultrafino [J]. Revista de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ciencia de materiales, 2023, 72(6): 412-419.
Tratamiento térmico de polvo de carburo de tungsteno ultrafino [J]. Revista de la Sociedad de Ciencia de Materiales, 2023, 72(6): 412-419.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

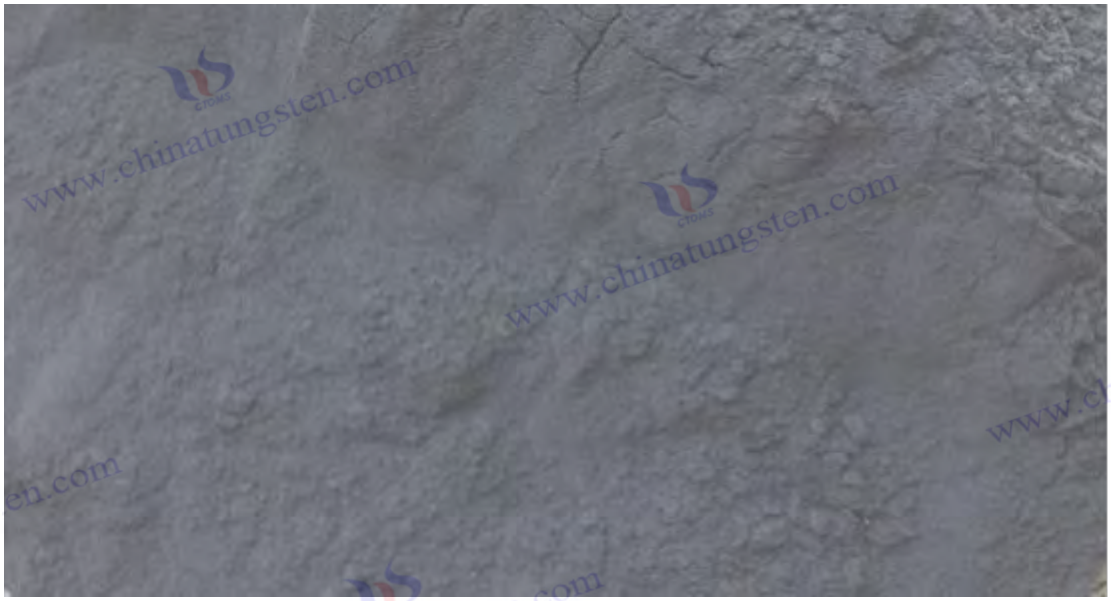
CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 7: Consideraciones ambientales y de seguridad del polvo de carburo de tungsteno

Como materia prima fundamental de materiales de alto rendimiento como el carburo cementado, herramientas de corte y recubrimientos resistentes al desgaste, la producción y aplicación de polvo de carburo de tungsteno ha impulsado el progreso industrial, pero también ha planteado desafíos en materia de contaminación ambiental, seguridad laboral y sostenibilidad de los recursos. Con la gran atención mundial a la fabricación ecológica y el desarrollo sostenible, el impacto ambiental y la gestión de la seguridad en la industria del polvo de carburo de tungsteno se han convertido en el foco de investigación y práctica. Este capítulo analiza sistemáticamente los problemas ambientales y de seguridad del polvo de carburo de tungsteno desde cuatro aspectos: impacto ambiental en el proceso de producción, especificaciones de operación segura, reciclaje y análisis de la tecnología de reciclaje. En combinación con la optimización de procesos, los requisitos regulatorios y el concepto de economía circular, proporciona orientación científica y referencia técnica para la industria.

7.1 Impacto ambiental durante la producción

La producción de polvo de carburo de tungsteno implica múltiples etapas, como la purificación de la materia prima, la reacción de carbonización, la molienda y la clasificación. Estos procesos pueden generar gases residuales, aguas residuales, residuos sólidos y consumo de energía, lo que puede tener un impacto potencial en el medio ambiente. La evaluación y el control científico de estos impactos no solo son una manifestación de la responsabilidad social corporativa, sino también la clave para lograr una fabricación ecológica y cumplir con las normativas ambientales internacionales. A continuación, se presenta un análisis exhaustivo de los problemas ambientales en el proceso de producción desde cuatro dimensiones: el origen del impacto ambiental, la evaluación cuantitativa, la tecnología de control y las tendencias futuras.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Fuentes de impacto ambiental

Emisiones de gases residuales: Durante la reacción de carbonización y el proceso de tratamiento térmico, pueden emitirse compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y trazas de sulfuros (como SO_2) junto con los gases de cola a alta temperatura. Por ejemplo, cuando el horno de carbonización funciona a 1400-1600 °C, cada tonelada de polvo de carburo de tungsteno puede producir de 2 a 3 toneladas de CO_2.

Contaminación de aguas residuales

Los procesos de molienda húmeda y purificación química generan aguas residuales con metales pesados (como tungsteno y hierro) y sustancias ácidas (como HCl y H_2SO_4). Si se vierten directamente sin tratamiento, pueden provocar una disminución del pH del agua (<6) y un contenido excesivo de metales pesados (concentración de tungsteno >10 mg/L).

Residuos sólidos

La escoria producida por la purificación de la materia prima, los residuos de los medios de molienda de bolas del proceso de molienda y los polvos no calificados constituyen residuos sólidos. La industria mundial del tungsteno produce alrededor de 500.000 toneladas de residuos sólidos al año, de los cuales aproximadamente el 20 % son residuos peligrosos (como residuos de filtros que contienen metales pesados).

Consumo de energía

La producción de polvo de carburo de tungsteno es un proceso que consume mucha energía, con un consumo promedio de 8.000 a 12.000 kWh de electricidad por tonelada de polvo, lo que representa entre el 30% y el 40% del costo de producción y conduce indirectamente a altas emisiones de carbono (alrededor de 4 a 6 toneladas de CO_2 / tonelada de polvo).

Evaluación cuantitativa del impacto ambiental

Análisis de la huella de carbono

El análisis del ciclo de vida (ACV) muestra que las emisiones de carbono de la producción de polvo de carburo de tungsteno provienen principalmente de la reacción de carbonización (que representa el 60%) y del consumo de electricidad (que representa el 30%). La huella de carbono de una línea de producción típica es de 5,5 toneladas de CO_2 equivalente por tonelada de polvo, una cifra muy superior a la del acero convencional (aproximadamente 2 toneladas de CO_2 por tonelada).

Impacto en los recursos hídricos

En la descarga de aguas residuales, la tasa de recuperación de tungsteno suele ser solo del 85% al 90%, y el 10% al 15% restante ingresa al cuerpo de agua en forma disuelta o suspendida, lo que puede causar contaminación del suelo y las aguas subterráneas.

Riesgos ambientales de los residuos sólidos

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

En los residuos sólidos no tratados, los metales pesados (como el tungsteno y el cobalto) pueden migrar por lixiviación, con un radio de contaminación de hasta 1-2 kilómetros, afectando el ecosistema circundante.

Herramientas de evaluación

Normas ISO 14040/14044: se utilizan para el análisis de LCA para evaluar el impacto ambiental completo desde la extracción de la materia prima hasta la producción de polvo.

Evaluación de Impacto Ambiental (EIA): Cuantificar la concentración de emisiones y el riesgo ecológico de gases residuales, aguas residuales y residuos sólidos.

Auditoría de consumo energético: A través del balance térmico y análisis de potencia, identificar eslabones de alto consumo energético (como el horno de carbonización, que representa el 50% del consumo energético).

Tecnología de control del impacto ambiental

Tratamiento de gases residuales:

Combustión catalítica por adsorción: Se utiliza carbón activado para adsorber COV y luego quemarlos catalíticamente, con una eficiencia de purificación del 95% y una reducción del 10% en las emisiones de CO_2.

Lavado húmedo: utilizando una solución alcalina (como NaOH) para absorber SO_2, la tasa de purificación alcanza el 98% y la concentración de emisiones de gases de escape se controla por debajo de 10 mg/m³.

Emisiones de CO_2 de 3 toneladas/tonelada de polvo a 2,2 toneladas mediante un sistema de recuperación de gases de escape, cumpliendo con los estándares de emisiones de la UE (<2,5 toneladas de CO_2/tonelada).

Tratamiento de aguas residuales:

Método de precipitación química: agregue $Ca(OH)_2$ o Na_2CO_3 para precipitar el tungsteno en forma de tungstato de calcio, la tasa de recuperación aumenta al 95% y la concentración de tungsteno en las aguas residuales se reduce a 0,5 mg/L.

Tecnología de separación por membrana: Se utiliza una membrana de ósmosis inversa (tamaño de poro de 0,1 a 1 nm) para eliminar metales pesados y sustancias ácidas, con una tasa de recuperación de aguas residuales del 80 %.

Ejemplo de aplicación: Una empresa redujo la descarga de aguas residuales de 500 m³/tonelada de polvo a 200 m³ mediante separación por membrana combinada con precipitación química, alcanzando el estándar nacional de emisiones de primer nivel (GB 8978-1996).

Gestión de residuos sólidos:

Utilización de recursos: la escoria se utiliza en la producción de cemento y los medios de molienda de bolas de desecho se utilizan para piezas resistentes al desgaste de baja calidad, con una tasa de recuperación del 70%.

Vertedero seguro: Los residuos peligrosos que contienen metales pesados se solidifican (agregar cemento,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tasa de solidificación >99%) para evitar la contaminación por lixiviación.
Ejemplo de aplicación: Una empresa ha reciclado el 90% de sus residuos sólidos, ha reducido los costes de vertedero en un 50% y ha ahorrado 10 millones de RMB al año.

Tecnología de ahorro de energía:
Horno de carbonización de alta eficiencia: se utiliza un horno de calentamiento por inducción en lugar del horno de resistencia, se mejora la eficiencia energética en un 20% y el consumo de energía por tonelada de polvo se reduce a 7000 kWh.
Recuperación de calor residual: el calor residual del escape del horno de carbonización se utiliza para precalentar las materias primas, y el calor recuperado representa el 15% del consumo total de energía.
CO_2 anualmente a través de un sistema de recuperación de calor residual.

Tendencias futuras
Desarrollo de procesos verdes
Explorar la tecnología de carbonización a baja temperatura (como la carbonización por microondas, temperatura <1200 °C) para reducir el consumo de energía en un 30 % y controlar las emisiones de carbono en 2 toneladas de CO_2/tonelada de polvo.

Objetivo de cero emisiones
Promover sistemas de agua de circuito cerrado y tecnología de recuperación total de gases residuales, y esforzarse por lograr emisiones de aguas residuales y gases residuales casi nulas.
Monitoreo inteligente
Utilice Internet de las cosas (IoT) y el análisis de big data para monitorear los parámetros de emisión (como concentración de COV, error <1 ppm) en tiempo real y optimizar la eficiencia del tratamiento.

Impulsado por políticas
A nivel mundial, el Acuerdo de París y los objetivos de "carbono dual" de China (neutralidad de carbono para 2060) impulsarán a la industria a adoptar tecnologías bajas en carbono, y se espera que la huella de carbono de la producción de polvo de carburo de tungsteno se reduzca en un 50% para 2030.

7.2 Especificaciones de operación de seguridad

La producción y el procesamiento de polvo de carburo de tungsteno conllevan riesgos potenciales como altas temperaturas, alta presión, reactivos químicos y polvo. Las especificaciones científicas de seguridad operativa son la base para garantizar la salud de los empleados y la estabilidad de los equipos de producción. A continuación, se analizan sistemáticamente los requisitos de gestión de seguridad para la producción de polvo de carburo de tungsteno desde cuatro puntos de vista: identificación de riesgos de seguridad, especificaciones operativas, medidas de protección y cumplimiento normativo.

Identificación de riesgos de seguridad
Riesgo de explosión por polvo: Cuando el polvo de carburo de tungsteno (tamaño de partícula <10 μm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

forma una nube de polvo suspendida en el aire, puede explotar al exponerse a llamas abiertas o electricidad estática. La energía mínima de ignición es de tan solo 10 mJ y la presión de explosión puede alcanzar los 0,7 MPa.

El HNO_3) utilizado en el proceso de purificación y limpieza es corrosivo y puede causar quemaduras en la piel o daños en el tracto respiratorio cuando la concentración es >10%.

Riesgos de los equipos de alta temperatura: El horno de carbonización funciona a 1400-1600 °C, lo que supone riesgos de quemaduras, sobrepresión del equipo (>0,5 MPa) y fugas de gas (como H_2).

Riesgos para la salud ocupacional: La exposición prolongada al polvo de carburo de tungsteno (concentración >5 mg/m³) puede causar fibrosis pulmonar, y el polvo de cobalto (>0,1 mg/m³) es sensibilizante.

Normas de seguridad operativa

Control del polvo:

Ventilación y eliminación de polvo: El taller de producción está equipado con un colector de polvo de bolsa de pulso de alta eficiencia con una tasa de captura de polvo de >99,9% y la concentración de polvo en el taller está controlada por debajo de 2 mg/m³.

Medidas a prueba de explosiones: Utilice motores a prueba de explosiones (Ex d IIC T4) y dispositivos de conexión a tierra electrostáticos, con potencial electrostático <100 V para evitar que las chispas provoquen explosiones.

Requisitos de especificación: Los operadores deben usar ropa de trabajo antiestática (resistencia de superficie $<10^8$ Ω) y la transferencia de polvo debe utilizar una tubería cerrada (tasa de fuga <0,1 %).

Gestión de reactivos químicos:

Especificaciones de almacenamiento: Los reactivos ácidos se almacenan en contenedores resistentes a la corrosión (acero inoxidable 316L) y el tanque de almacenamiento está equipado con un sistema de alarma de fugas (sensibilidad 0,1 ppm).

Especificación de uso: Utilice protección secundaria (guantes resistentes al ácido, máscara protectora) durante la operación, y el ácido residual se trata en un tanque de neutralización (pH 6-9) antes de la descarga.

Medidas de emergencia: Equipado con estaciones de lavado de emergencia (caudal > 20L/min) y neutralizadores (como $NaHCO_3$) para garantizar que el tiempo de respuesta ante accidentes sea < 30 segundos.

Operación de equipos de alta temperatura:

Mantenimiento del equipo: El horno de carbonización debe calibrar anualmente el sensor de presión (error <0,01 MPa) y verificar periódicamente el anillo de sellado (vida útil >5000 horas).

Procedimientos de operación: Antes de comenzar, confirme que la concentración de hidrógeno sea <4% (límite inferior de explosión) y controle la temperatura del horno durante el funcionamiento (desviación

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

±5°C).

Medidas de protección: Los operadores llevan ropa protectora resistente a altas temperaturas (resistencia a la temperatura > 1000 °C) y se instalan barreras de aislamiento (espesor > 10 mm) en el área del horno.

Gestión de la Salud Ocupacional:

Protección contra el polvo: Use una máscara contra el polvo N95 (eficiencia de filtración > 95%) e instale un dispositivo de escape local en el taller (volumen de aire > 500 m^3/h).

Vigilancia de la salud: Realizar pruebas de función pulmonar todos los años, centrándose en el seguimiento de las personas expuestas al cobalto (concentración de cobalto en sangre <1 μg/L).

Requisitos de capacitación: Los nuevos empleados reciben no menos de 40 horas de capacitación en seguridad, que abarca protección contra el polvo, gestión de productos químicos y rescate de emergencia.

Medidas de protección y ejemplos de aplicación

Control automático: se utiliza un sistema PLC para monitorear la concentración de polvo, la presión del horno y el flujo de gas, y la máquina se apagará automáticamente en caso de anomalía, lo que reduce la tasa de accidentes en un 80%.

Equipo de protección individual (EPI): equipado con traje antipolvo de cuerpo entero (nivel de protección IP65) y respirador de presión positiva (suministro de aire > 30L/min), con una eficacia de protección del 99%.

Ejemplo de aplicación: Una empresa introdujo un sistema automatizado de eliminación de polvo y monitoreo a prueba de explosiones, reduciendo la tasa de accidentes por explosión de polvo de 0,5 veces/año a 0, y reduciendo la incidencia de enfermedades profesionales en un 90%.

Cumplimiento normativo:

Normas internacionales: Cumplir con el límite de exposición al polvo de OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU.) (5 mg/m^3) y el sistema de gestión de seguridad y salud ocupacional ISO 45001.

Normas nacionales: Cumplir con GBZ 2.1-2019 “Límites de exposición ocupacional a factores peligrosos en el lugar de trabajo” (polvo de tungsteno <6 mg/m^3) y la “Ley de seguridad en el trabajo” (versión revisada de 2021).

Tendencias futuras

Gestión de seguridad inteligente: utilizando inteligencia artificial y tecnología de sensores, monitoreo en tiempo real de la concentración de polvo (error <0,1 mg/m^3) y el estado del equipo, prediciendo riesgos de accidentes y acortando el tiempo de respuesta a 10 segundos.

Tecnología de protección ecológica: desarrollar reactivos químicos no tóxicos (como ácido cítrico en lugar de HCl) y procesos con baja generación de polvo (como carbonización húmeda) para reducir

Riesgos para la salud laboral.

m^3 para el año 2030.

7.3 Recuperación y reciclaje

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

El reciclaje y la reutilización del polvo de carburo de tungsteno son una forma importante de lograr la sostenibilidad de los recursos y reducir la carga ambiental. Al ser un metal raro, el tungsteno cuenta con reservas globales limitadas (aproximadamente 3,5 millones de toneladas), y su producción depende de mineral de tungsteno de alta calidad. La tecnología de reciclaje puede mitigar eficazmente la escasez de recursos y reducir las emisiones de residuos. A continuación, se analizan sistemáticamente las prácticas y las perspectivas del reciclaje desde tres perspectivas: la necesidad del reciclaje, los beneficios de la economía circular y su futuro.

La necesidad del reciclaje

Escasez de recursos: Los recursos mundiales de tungsteno se concentran en China (representando el 55% de las reservas), pero los minerales de alta ley (WO_3 >0,5%) se están agotando gradualmente. El reciclaje puede aumentar la utilización del tungsteno del 60% al 90%.

Beneficios ambientales: Reciclar 1 tonelada de polvo de carburo de tungsteno puede reducir alrededor de 4 toneladas de emisiones de CO_2 y 200 m^3 de aguas residuales, reduciendo la carga ambiental en un 50% en comparación con la producción primaria.

Valor económico: El costo del reciclaje de tungsteno (aproximadamente 100.000 RMB/tonelada) es mucho menor que el de la producción primaria (aproximadamente 250.000 RMB/tonelada) y el margen de ganancia aumenta en un 30%.

Impulsado por la regulación: la Ley de China sobre la prevención y el control de la contaminación ambiental por residuos sólidos (versión revisada de 2020) y el Plan de Acción de Economía Circular de la UE (2020) exigen que la tasa de reciclaje de tungsteno alcance más del 70 % para 2030.

Beneficios de la economía circular

Beneficios de los recursos: cada año se pueden reciclar alrededor de 300.000 toneladas de carburo cementado de desecho en todo el mundo, lo que equivale a 100.000 toneladas adicionales de recursos de tungsteno y extiende la vida útil de las minas de tungsteno entre 10 y 15 años.

Beneficios ambientales: Las emisiones de carbono del proceso de reciclaje son solo el 30% de la producción original, la descarga de aguas residuales se reduce en un 70% y los residuos sólidos se reducen en un 80%.

Beneficios económicos: El precio de mercado del polvo reciclado (aproximadamente 150.000 RMB/tonelada) es inferior al del polvo virgen. Se prevé que el mercado mundial del reciclaje alcance los 20.000 millones de RMB en 2030.

Ejemplo de aplicación: Una empresa recicló 5.000 toneladas de chatarra de aleación, con un beneficio anual de 30 millones de RMB y el vertido de aguas residuales reducido a 50 m^3/tonelada.

Direcciones futuras

Tecnología de reciclaje de alta eficiencia: Desarrollar el reciclaje electroquímico de baja temperatura (temperatura <100°C), reduciendo el consumo de energía en un 50% y aumentando la tasa de recuperación al 98%.

Clasificación inteligente: mediante el uso de inteligencia artificial y tecnología de fluorescencia de rayos

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

X (XRF), se pueden identificar con precisión los componentes de los desechos, lo que aumenta la eficiencia de clasificación en un 30 %.

Sistema de circuito cerrado: Establecer un sistema de reciclaje de cadena completa desde la aleación de desecho hasta el polvo nuevo y esforzarse por lograr cero desperdicio de recursos de tungsteno para 2035.

Apoyo político: El 14º Plan Quinquenal de China y la Directiva sobre baterías y residuos de la UE (2023) aumentarán el objetivo de la tasa de reciclaje del 50% al 80%.

7.4 Análisis de la tecnología de recuperación de polvo de carburo de tungsteno

El reciclaje de polvo de carburo de tungsteno es un importante medio técnico para lograr el uso sostenible de los recursos de tungsteno, reducir la carga ambiental y los costos de producción. Los residuos que contienen carburo de tungsteno, como chatarra, herramientas de corte y materiales de recubrimiento, son la principal fuente de reciclaje. A continuación, se presenta un análisis detallado de los métodos de reciclaje de polvo de carburo de tungsteno, se explica el método industrial más común y se profundiza en su fundamento teórico, flujo de proceso, ventajas y desventajas.

7.4.1 Resumen de los métodos de reciclaje.

Existen cinco métodos principales para reciclar el polvo de carburo de tungsteno, cada uno adecuado para diferentes tipos de residuos y aplicaciones. La siguiente tabla resume los objetos aplicables, los principios, las tasas de recuperación, las ventajas y las desventajas de cada método:

Comparación de los métodos de recuperación de polvo de carburo de tungsteno

Método	Clientes objetivo	principio	Tasa de recuperación	Ventajas	Desventajas
Separación mecánica	Herramientas y moldes de carburo de desecho (WC>80%)	Separación de carburo de tungsteno y fase aglutinante mediante trituración, cribado y separación magnética.	80%-85%	Proceso simple, de bajo costo (aproximadamente 20.000 yuanes/tonelada), adecuado para partículas gruesas (>5 μm)	aplicaciones de alta precisión .
Método de disolución química	Residuos de aleaciones y recubrimientos que contienen fase aglutinante (Co, Ni) o impurezas	Utilice una solución ácida/oxidante para disolver la fase aglutinante, retener u oxidar el carburo de tungsteno y luego carburizar.	95%-98%	Se puede obtener una alta tasa de recuperación, alta pureza (>99,5 %), polvo ultrafino (<1 μm) y amplia aplicabilidad.	El costo del tratamiento de líquidos residuales ácidos es alto (aproximadamente 20.000-30.000 yuanes/tonelada), el proceso es complicado y la

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

					inversión en equipos es grande (aproximadamente 10 millones de yuanes).
Recuperación electroquímica	Chatarra de carburo cementado que contiene cobalto	Utilice la aleación de desecho como ánodo para electrolizar y disolver la fase de unión para extraer carburo de tungsteno o tungstato y luego carbonizar.	90%-95%	Bajo consumo de energía (aproximadamente 3000 kWh/tonelada), el líquido residual se puede reciclar, adecuado para nanopolvos.	El equipo es complejo, es necesario optimizar la estabilidad del proceso y la escala industrial es pequeña.
Método de fundición a alta temperatura	Chatarra que contiene impurezas complejas (recubrimientos, aleaciones mixtas)	Fusión a alta temperatura (1800-2000 °C) para separar el tungsteno y la fase aglutinante, luego carbonización después del enfriamiento	85%-90%	Altamente adaptable, adecuado para residuos de baja calidad.	Alto consumo de energía (alrededor de 10.000 kWh/tonelada), gran inversión en equipos (alrededor de 5 millones de yuanes), pureza promedio del polvo.
Método de fusión de zinc	Herramientas y moldes de carburo de desecho que contienen cobalto	Se utiliza zinc líquido para disolver la fase de unión a 900-1000 °C, se separa el carburo de tungsteno y se evapora y recupera el zinc.	90%-95%	Alta tasa de recuperación, rendimiento del polvo cercano al del polvo original.	La volatilización del zinc produce gases residuales, que requieren un tratamiento de gases de cola, con procesos complejos y costos elevados (alrededor de 30.000 yuanes/tonelada).

7.4.2 El método de industrialización más convencional

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de disolución química

es actualmente el método más común para la recuperación de polvo de carburo de tungsteno en la producción industrial y se utiliza ampliamente en las principales regiones industriales de tungsteno, como China, Europa y Norteamérica. Su popularidad se debe a las siguientes razones:

Alta recuperación y pureza

La tasa de recuperación puede alcanzar el 95%-98% y la pureza del polvo es >99,5%, lo que es adecuado para aplicaciones de recubrimiento y carburo cementado de alto rendimiento.

Amplia aplicabilidad

Puede procesar una variedad de materiales de desecho, incluido carburo cementado que contiene cobalto (5%-20%), níquel o impurezas complejas, desechos de revestimiento y residuos de polvo.

Tecnología madura

Existen líneas de producción industrial maduras en todo el mundo, con parámetros de proceso altamente optimizados y costos de producción controlables (aproximadamente RMB 80.000-120.000 por tonelada).

Cuota de mercado

Según datos de la industria, la disolución química representa entre el 60% y el 70% de la recuperación mundial de carburo de tungsteno, superando ampliamente otros métodos (como la fundición de zinc con aproximadamente el 20% y la separación mecánica con aproximadamente el 10%).

7.4.3. Fundamento teórico.

El método de disolución química se basa en el uso de reactivos químicos para disolver selectivamente la fase aglutinante (como cobalto y níquel) o las partículas de carburo de tungsteno oxidado en el carburo cementado residual, separar el carburo de tungsteno de alta pureza o los compuestos de tungsteno y, posteriormente, generar polvo de carburo de tungsteno mediante un tratamiento posterior. Su fundamento teórico incluye los siguientes aspectos:

Disolución selectiva: La fase aglutinante (como el cobalto) se disuelve fácilmente en soluciones ácidas u oxidantes (como HNO_3, HCl/H_2O_2), mientras que el carburo de tungsteno (WC) puede retenerse en forma de partículas sólidas gracias a su alta estabilidad química (resistencia a ácidos y álcalis a temperatura ambiente). Ejemplo de reacción: $Co + 2HNO_3 \rightarrow Co(NO_3)_2 + H_2$

El carburo de tungsteno no participa en la reacción y permanece estable.

Mecanismo de oxido-reducción: Si es necesario recuperar compuestos de tungsteno, el carburo de tungsteno puede oxidarse a tungstato (Na_2WO_4) mediante un oxidante fuerte (como $NaOH/H_2O_2$), y luego se genera WC mediante acidificación, reducción y carbonización. Ejemplo de reacción:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

$$WC + 2NaOH + 5H_2O_2 \rightarrow Na_2WO_4 + CO_2 + 6H_2O$$
$$Na_2WO_4 + 2HCl \rightarrow H_2WO_4 + 2NaCl$$
$$H_2WO_4 + 3C \rightarrow WC + 2CO + H_2O$$

Protección contra partículas

Controlando el pH de la solución (2-4), la temperatura (60-90°C) y la concentración de oxidante (H_2O_2 < 10 %), se evita la oxidación o disolución excesiva de las partículas de carburo de tungsteno, garantizando que el tamaño de partícula y la morfología del polvo reciclado sean cercanos a los del polvo original.

Termodinámica y cinética

El proceso de disolución está controlado por el equilibrio termodinámico (como la energía libre de Gibbs $\Delta G < 0$) y factores cinéticos (como la constante de velocidad de reacción k), y es necesario optimizar los parámetros del proceso para mejorar la eficiencia. Por ejemplo, la velocidad de disolución del cobalto a 70 °C es 10 veces mayor que a 25 °C.

3.2 Flujo del proceso

El El flujo del proceso industrial de disolución química generalmente incluye los siguientes pasos, y los parámetros específicos varían según el tipo de residuo y equipo:

Pretratamiento de residuos

Propósito: Eliminar aceite de la superficie, capa de óxido e impurezas que no sean de tungsteno y mejorar la eficiencia de disolución posterior.

Método: Triturar mecánicamente la aleación de desecho en partículas de 5 a 10 mm, eliminar el aceite con un agente de limpieza alcalino (como una solución de NaOH, concentración del 5 %) y eliminar los óxidos con limpieza ultrasónica (frecuencia de 40 kHz).

Parámetros: El consumo de energía de trituración es de aproximadamente 50 kWh/tonelada y el tiempo de limpieza es de 10 a 20 minutos.

Disolución de la fase de enlace

Objetivo: Separar el carburo de tungsteno de las fases de enlace (como el cobalto y el níquel).

Método: Coloque los desechos en una solución ácida (como HNO_3, concentración 20%-30%, o solución mixta HCl/H_2O_2, concentración de H_2O_2 5%) , revuelva a 60-80°C (velocidad 200-400 rpm) y el tiempo de reacción es de 2 a 6 horas.

Control de reacción: el pH se mantiene entre 2 y 3 para evitar la disolución del carburo de tungsteno; el potencial de oxidación-reducción (ORP) de la solución se controla entre 500 y 700 mV para garantizar una disolución eficiente del cobalto.

Salida: partículas de carburo de tungsteno sólido (pureza > 98%) y solución de cobalto/níquel (concentración de cobalto 50-100 g/L).

Separación sólido-líquido

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Objetivo: Extraer partículas de carburo de tungsteno y separar líquidos residuales que contienen metales.
Método: Utilice una centrífuga (velocidad 3000-5000 rpm) o un filtro prensa (presión 0,5-1 MPa) para la separación sólido-líquido y lave las partículas de carburo de tungsteno con agua desionizada (pH 6-7) 3-5 veces.
Parámetros: eficiencia de separación> 99%, consumo de agua de lavado alrededor de 5 m^3 / tonelada de polvo.

Refinación de polvo (opcional)
Objetivo: Mejorar aún más la pureza y la uniformidad del tamaño de partícula del carburo de tungsteno.
Método: Si se requiere polvo ultrafino, las partículas recicladas pueden someterse a una molienda secundaria (molienda de bolas húmeda, tiempo de 4 a 8 horas), o puede generarse tungstato a través de la vía de oxidación-reducción y luego carbonizarse.
Parámetros: Tamaño de partícula después de la molienda 0,5-2 μm, temperatura de carbonización 1200-1400 ° C, aislamiento 2-3 horas.

Tratamiento de aguas residuales
Objetivo: Recuperar cobalto/níquel, tratar el líquido residual ácido y descargarlo de conformidad con las normas de emisión.
Métodos: Las aguas residuales se neutralizaron con NaOH (pH 7-8), se añadió $CaCl_2$ para precipitar cobalto/níquel (tasa de recuperación > 90%), y las aguas residuales se purificaron mediante una membrana de ósmosis inversa (tamaño de poro 0,1 nm) y la concentración de tungsteno se redujo a 0,2 mg/L.
Parámetros: El costo del tratamiento de aguas residuales es de aproximadamente RMB 5.000/tonelada de polvo, y la descarga cumple con el estándar GB 8978-1996.

Secado y prueba de polvos
Objetivo: Obtener polvo de carburo de tungsteno que cumpla con los estándares.
El polvo se secó en un horno de secado al vacío (temperatura 80-100 °C, grado de vacío 10^{-2} Pa) durante 4-6 horas y se analizaron la composición química (ICP-MS, precisión 0,01 %), el tamaño de partícula (analizador de tamaño de partícula láser, error ±0,02 μm) y el contenido de oxígeno (método de absorción infrarroja, error 0,005 %) del polvo.
Salida: Polvo de carburo de tungsteno reciclado, pureza > 99,5%, tamaño de partícula 0,5-5 μm, contenido de oxígeno < 0,1%.

3.3 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

Alta tasa de recuperación y pureza: La tasa de recuperación es del 95% al 98% y la pureza del polvo es superior al 99,5%. Se puede utilizar directamente en carburo cementado de alto rendimiento, herramientas y recubrimientos, y su rendimiento es similar al del polvo original (dureza HV 1800-2000, tenacidad 8-10 $MPa \cdot m^{1/2}$).
Gran flexibilidad: Puede procesar una variedad de materiales de desecho, incluido carburo cementado

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

que contiene cobalto (5%-20%), níquel o impurezas complejas, desechos de revestimiento y residuos de polvo, y su adaptabilidad es mejor que los métodos de separación mecánica y fusión de zinc.

Tamaño de partícula controlable: Se pueden preparar polvos ultrafinos (<1 μm) o incluso a escala nanométrica (<100 nm) mediante molienda secundaria o carbonización por oxidación para satisfacer las necesidades de aplicaciones de alta gama (como impresión 3D, precisión ±5 μm).

Tecnología madura: Hay cientos de líneas de producción industrial en todo el mundo (como Zhuzhou, China, HC Starck, Alemania), con parámetros de proceso altamente optimizados y una eficiencia de producción de 1-2 toneladas/día/línea.

Recuperación de subproductos: El cobalto, el níquel y otras fases aglutinantes se pueden recuperar como subproductos (pureza > 99%) y usarse en la fabricación de baterías o aleaciones para aumentar los beneficios económicos (el valor del subproducto es de aproximadamente 30 000 RMB/tonelada de polvo).

Desventajas

Alto costo del tratamiento de aguas residuales: Las aguas residuales ácidas (aproximadamente 3-5 m^3/tonelada de polvo) requieren neutralización, precipitación y tratamiento de separación por membranas. El costo del tratamiento de aguas residuales representa entre el 20 % y el 30 % del costo total (aproximadamente 20 000-30 000 RMB/tonelada).

Riesgos ambientales: Si las aguas residuales no se gestionan adecuadamente, los metales pesados (como el cobalto, concentración > 50 mg/L) pueden contaminar los cuerpos de agua, y se deben observar estrictamente las normas de emisión (como GB 8978-1996, cobalto < 1 mg/L).

Complejidad del proceso: Implica múltiples pasos de reacción (disolución, separación, refinación), requiere un control preciso del pH, la temperatura y la concentración de oxidante, y los operadores requieren capacitación profesional (no menos de 40 horas).

Alta inversión en equipos: Las líneas de producción industrial requieren reactores resistentes a la corrosión (acero inoxidable 316L), centrífugas y sistemas de tratamiento de aguas residuales, con una inversión total de aproximadamente 10-20 millones de RMB. El umbral de entrada para las pymes es relativamente alto.

Consumo de energía relativamente alto: aunque es menor que el de la fundición a alta temperatura (10.000 kWh/tonelada), el proceso de disolución y secado aún requiere alrededor de 4.000-6.000 kWh/tonelada, lo que representa el 15% del coste.

La posición dominante y la dirección de optimización del método de disolución química.

La razón clave por la que el método de disolución química se ha generalizado es su alta tasa de recuperación, alta pureza y amplia aplicabilidad, que puede equilibrar los beneficios económicos y los requisitos ambientales. Las principales empresas de reciclaje de tungsteno del mundo (como China Tungsten High-Tech y Kennametal en los Estados Unidos) utilizan la disolución química como su proceso principal, y su volumen de reciclaje anual representa más del 60% del mundial (aproximadamente 200,000 toneladas/año). En comparación con el método de fusión de zinc (que requiere alta temperatura y tratamiento de gases de cola) o el método de separación mecánica (baja pureza), el método de disolución química tiene más ventajas en rendimiento y costo.

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

Dirección de optimización:

Desarrollo de solventes verdes: Explorar reactivos de baja toxicidad (como ácido cítrico y ácido acético) para reemplazar ácidos fuertes, reducir los costos de tratamiento de líquidos residuales (objetivo de reducción del 50%) y los riesgos ambientales.

Consumo energético reducido: La introducción de la disolución asistida por microondas (potencia 5-10 kW) acorta el tiempo de reacción de 4 horas a 1 hora y reduce el consumo de energía a 3000 kWh/tonelada.

Control inteligente: utilice IA para monitorear el pH de la solución (error <0,1) y el ORP (error <5 mV), mejorando la eficiencia de disolución en un 10%-15%.

Circuito cerrado: Desarrollar un sistema completo de recuperación de líquidos residuales (como la regeneración de ácido electrolítico) para lograr cero descargas de aguas residuales, en línea con el objetivo de "carbono dual" (neutralidad de carbono para 2060).

de nanopolvos : optimizar la ruta de oxidación-carbonización para preparar polvos <100 nm para satisfacer las necesidades de fabricación aditiva (se espera que el tamaño del mercado alcance los 5 mil millones de RMB en 2030).

Referencias

Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.

Li Ming. Ciencia de los materiales del carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.

Zhang Li, Wang Chuanhui . Análisis del impacto ambiental de la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(3): 78-85.

Zhang Li, Wang Chuanhui . Análisis del impacto ambiental de la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(3): 78-85.

Wang Qiang, Li Ming. Avances en la tecnología de reciclaje de chatarra de carburo cementado [J]. Industria del Tungsteno de China, 2020, 35(5): 66-72.

Wang Qiang, Li Ming. Avances en la tecnología de reciclaje de residuos de carburo cementado [J]. Industria del tungsteno de China, 2020, 35(5): 66-72.

Chen Wei, Zhao Gang. Investigación sobre la gestión de la seguridad en la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Seguridad y Medio Ambiente, 2022, 22(4): 123-130.

Chen Wei, Zhao Gang. Estudio sobre la gestión de la seguridad en la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Seguridad y Medio Ambiente, 2022, 22(4): 123-130.

Liu Yang, Wang Zhiqiang. Beneficios económicos y ambientales del reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.

Liu Yang, Wang Zhiqiang. Beneficios económicos y ambientales del reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.

Zhang Li, Chen Wei. Optimización del proceso de disolución química para el reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2021, 39(4): 123-130.

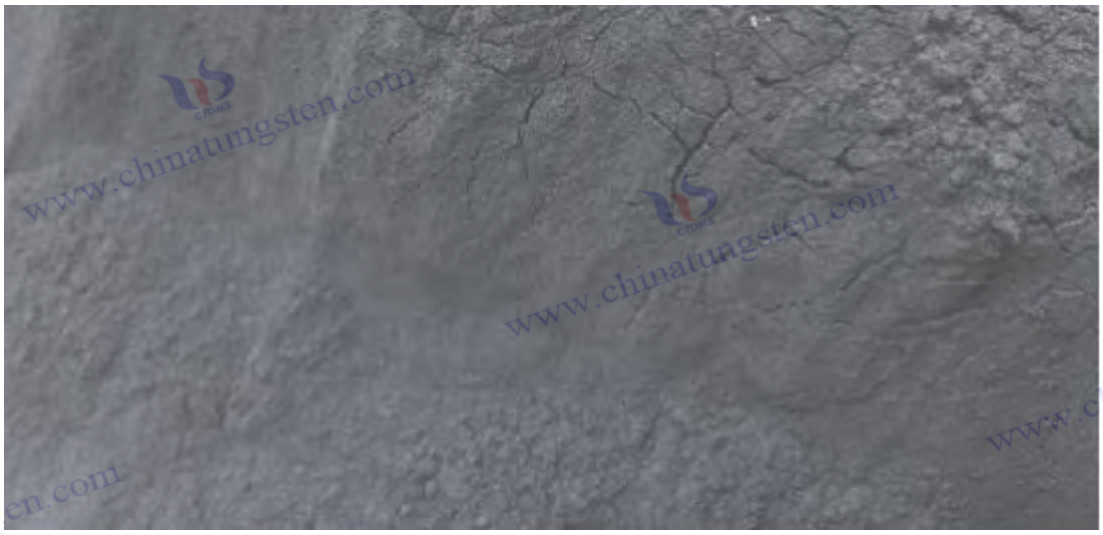
Zhang Li, Chen Wei. Optimización del proceso de disolución química para el reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2021, 39(4): 123-130.

Smith J, Brown T. Impactos ambientales de la producción de carburo de tungsteno [J]. Revista de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Producción Más Limpia, 2021, 298: 126789.
Impacto ambiental de la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 298: 126789.
Johnson R, Lee K. Protocolos de seguridad para la manipulación de polvos de carburo de tungsteno [J]. Salud y seguridad ocupacional, 2022, 91(5): 34-41.
Especificaciones de seguridad para la manipulación de polvo de carburo de tungsteno[J]. Salud y seguridad ocupacional, 2022, 91(5): 34-41.
Davis M, Patel S. Tecnologías de reciclaje para residuos de carburo de tungsteno [J]. Recursos, conservación y reciclaje, 2023, 190: 106856.
Tecnología de reciclaje de residuos de carburo de tungsteno [J]. Recursos, Protección y Reciclaje, 2023, 190: 106856.
Smith J, Brown T. Métodos de disolución química para la recuperación de carburo de tungsteno [J]. Revista de tecnología de procesamiento de materiales, 2022, 305: 117589.
Método de disolución química para la recuperación de carburo de tungsteno [J]. Revista de Tecnología de Procesamiento de Materiales, 2022, 305: 117589.
Müller H, Schmidt P. Wolframcarbidherstellung [J]. Umweltwissenschaften und Schadstoff -Forschung, 2020, 32(6): 456-463.
Impacto ambiental de la producción de carburo de tungsteno[J]. Environmental Science and Pollutant Research, 2020, 32(6): 456-463.
Müller H, Schmidt P. Rückgewinnung von Wolframcarbid de Abfällen [J] . Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2021, 52(5): 678-685.
Recuperación de carburo de tungsteno a partir de materiales de desecho [J]. Ciencia de Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2021, 52(5): 678-685.
Bauer T. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduktion [M]. Berlín: Springer, 2022.
Gestión de la seguridad en la producción de carburo de tungsteno [M]. Berlín: Springer-Verlag, 2022.
Taro Yamada. Evaluación del impacto ambiental de la producción de polvo de carbón carbonizado [J]. Revista de Ciencias Ambientales, 2021, 34(3): 123-130.
Evaluación del impacto ambiental de la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de la Sociedad de Ciencias Ambientales, 2021, 34(3): 123-130.
Ken Nakamura. Abolición de la tecnología de carbonización [J]. Revista de la Sociedad para el Reciclaje de Recursos, 2023, 29(4): 345-352.
Tecnología de reciclaje de carburo de tungsteno residual [J]. Revista de la Sociedad de Reciclaje de Recursos, 2023, 29(4): 345-352.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 8: Tendencias del mercado y desarrollo del polvo de carburo de tungsteno

Como materia prima clave para materiales de alto rendimiento como el carburo cementado, herramientas de corte y recubrimientos resistentes al desgaste, el polvo de carburo de tungsteno ocupa un lugar destacado en la industria manufacturera global. Con el rápido desarrollo de la industria aeroespacial, los equipos energéticos, la fabricación aditiva y la microelectrónica, la demanda de polvo de carburo de tungsteno sigue creciendo. Al mismo tiempo, la competencia en el mercado y la innovación tecnológica impulsan la evolución de la industria hacia un alto rendimiento, bajo coste y sostenibilidad. Este capítulo analiza sistemáticamente la oferta y la demanda, el progreso tecnológico y las posibles áreas de aplicación del polvo de carburo de tungsteno desde tres perspectivas: panorama del mercado global, tendencias de desarrollo tecnológico y perspectivas de aplicación futuras. Combinado con datos cuantitativos y la dinámica de la industria, proporciona una referencia completa para la investigación académica y la planificación industrial.

8.1 Panorama general del mercado global

El mercado global de polvo de carburo de tungsteno se ve afectado por la oferta y la demanda, la distribución regional, las fluctuaciones de precios, las políticas y regulaciones, mostrando una tendencia de crecimiento estable y una competencia regionalizada. A continuación, se presenta un análisis detallado de la situación actual del mercado global desde cuatro dimensiones: tamaño del mercado, estructura de la oferta y la demanda, distribución regional y factores influyentes.

Tamaño y crecimiento del mercado

Tamaño del mercado: Según informes de la industria, el tamaño del mercado global de polvo de carburo de tungsteno será de aproximadamente US$ 18 mil millones en 2024 y se espera que crezca a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 4,5% -5,5% de 2025 a 2030, alcanzando casi US$ 25 mil millones en 2030.

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

Conductores:
Demanda de carburo cementado: el carburo cementado representa más del 60% del consumo de polvo de carburo de tungsteno y se utiliza ampliamente en herramientas de corte (30%), herramientas de minería (20%) y piezas resistentes al desgaste (10%).

Campos emergentes: El crecimiento de la demanda de fabricación aditiva (impresión 3D) y recubrimientos de alta temperatura ha impulsado la expansión de los mercados de polvos ultrafinos (<1 μm) y nanoescalares (<100 nm), aumentando su participación del 5% al 10%.

Mercado de reciclaje: El tamaño del mercado de polvo de carburo de tungsteno reciclado es de aproximadamente US$3 mil millones, lo que representa el 16,7% del mercado total, y se espera que aumente al 20% en 2030.

Producción y consumo: En 2024, la producción mundial de polvo de carburo de tungsteno será de unas 85.000 toneladas y el consumo de unas 82.000 toneladas, de las cuales China representa el 60% de la producción (unas 51.000 toneladas) y el 50% del consumo (unas 41.000 toneladas).

Estructura de la oferta y la demanda
Lado de la oferta:
Principales países productores: China (60%), Europa (20%, principalmente Alemania y Austria), América del Norte (10%) y otras regiones (10%, incluidos Japón y Rusia).
Estructura empresarial: El mercado global está dominado por unas pocas empresas, como varias empresas líderes de China (cuota de mercado del 15%), HC Starck de Alemania (12%) y Kennametal de Estados Unidos (10%). Las pymes se concentran principalmente en el mercado de gama baja, con pocas barreras técnicas.
Limitaciones de la materia prima: Las reservas de mineral de tungsteno se concentran en China (55%) y Rusia (15%). Los minerales de alta ley (WO_3 >0,5%) se están agotando gradualmente, lo que eleva el precio del polvo crudo (aproximadamente 300.000 RMB/tonelada).

Lado de la demanda:
Distribución industrial: carburo cementado (60%), recubrimiento resistente al desgaste (20%), pulverización térmica (10%), fabricación aditiva (5%), otros (5%, como catalizadores, materiales electrónicos).
Demanda regional: Asia Pacífico (principalmente China e India) representa el 55%, Europa representa el 25%, América del Norte representa el 15% y otras regiones representan el 5%.
Tendencia de precios: En 2024, el precio promedio del polvo de carburo de tungsteno será de US$45/kg, y el del polvo ultrafino (<1 μm) alcanzará los US$60/kg. Debido a los costos de las materias primas y las tasas de reciclaje, se espera que la fluctuación de precios se sitúe entre US$35 y US$50/kg en 2030.

Distribución regional y competencia
Mercado chino:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ventajas: El volumen de producción y consumo ocupa el primer lugar en el mundo, la cadena industrial está completa y el costo es relativamente bajo (el costo de producción es de aproximadamente RMB 300.000 / tonelada).
Desafíos: Los polvos de alta gama (<0,5 μm) dependen de las importaciones, la brecha tecnológica es de aproximadamente 5 a 10 años y las regulaciones ambientales más estrictas aumentan los costos (alrededor del 10%).
Empresas representativas: China Tungsten High-Tech, Xiamen Tungsten Industry y Zhuzhou Cemented Carbide Group, que juntas representan el 70% del mercado chino.

Mercado europeo:
Ventajas: Tecnología líder, centrada en polvos ultrafinos y a escala nanométrica, alta calidad del producto (pureza> 99,8%, desviación del tamaño de partícula ± 0,02 μm).
Desafíos: Los altos costos de producción (alrededor de 300.000 RMB/tonelada) y el tamaño del mercado está limitado por las importaciones de materias primas.
Empresas representantes: HC Starck y Ceratizit , enfocadas al mercado de herramientas y recubrimientos de alta gama.

Mercado de América del Norte:
Ventajas: Fuerte demanda de fabricación aditiva y aeroespacial, y tecnología de reciclaje avanzada (tasa de reciclaje > 70%).
Desafíos: Producción limitada (alrededor de 8.500 toneladas), dependencia de materias primas chinas y riesgos geopolíticos que afectan la cadena de suministro.
Empresas representantes: Kennametal, Global Tungsten & Powders.
Otras regiones: Japón (Mitsui Kinzoku) se centra en polvos para materiales electrónicos, Rusia (Wolfram Company) depende de exportaciones de bajo costo y la India (Sandvik India) tiene un mercado de rápido crecimiento (CAGR 7%).

Factores que influyen en el mercado
Políticas y regulaciones: El 14º Plan Quinquenal de China y la Directiva sobre materias primas críticas de la UE (2023) promueven la protección y el reciclaje de los recursos de tungsteno, con un objetivo de tasa de reciclaje del 70% para 2030.
Progreso tecnológico: Los polvos ultrafinos y la tecnología de fabricación ecológica reducen los costos entre un 10% y un 15% y mejoran la competitividad del mercado.
Volatilidad económica: La recuperación de la manufactura mundial (que se espera que crezca un 3% en 2025) impulsará la demanda, pero los conflictos geopolíticos y las barreras comerciales pueden provocar interrupciones en la cadena de suministro.
Presión ambiental: Los impuestos a las emisiones de carbono (como el CBAM de la UE, implementado en 2026) y el objetivo de “carbono dual” de China (neutralidad de carbono para 2060) aumentan los costos de producción entre un 5% y un 10%.

8.2 Tendencias del desarrollo tecnológico

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

El desarrollo tecnológico del polvo de carburo de tungsteno se centra en la optimización del rendimiento, la reducción de costes y la fabricación ecológica para cumplir con los requisitos de las aplicaciones de alto rendimiento y las normativas ambientales. A continuación, se analizan sistemáticamente las tendencias tecnológicas desde cuatro perspectivas: preparación del polvo, modificación del rendimiento, procesos ecológicos e inteligencia.

Preparación de polvo de alto rendimiento

Polvos ultrafinos y nano:

Objetivo: Desarrollar polvos con tamaños de partículas <0,5 μm (ultrafinos) y <100 nm (nano) para aumentar la dureza (>HV 2200) y la tenacidad (>10 MPa·m $^{1/2}$) del carburo cementado.

Ruta técnica:

Esferoidización de plasma: potencia 20-60kW, generando polvo esférico (fluidez <14 segundos/50g) para impresión 3D (precisión ±5μm).

Deposición química de vapor (CVD): controlar la relación de flujo WF_6 / CH_4 (1:1,4) para generar un polvo de 0,1-0,5 μm con una tasa de aglomeración de <2 %.

Progreso: Para 2024, las empresas chinas alcanzarán una producción a gran escala de polvo de 0,2 μm (1.000 toneladas por año), con costos reducidos a 800.000 RMB por tonelada, cerca del nivel europeo.

Distribución estrecha del tamaño de partículas:

Objetivo: D90/D10<1,5, garantizando uniformidad de sinterización (porosidad <0,5%).

Ruta técnica: clasificación del flujo de aire (velocidad de rotación 10000-25000 rpm, precisión ±0,01 μm) y monitoreo del tamaño de partículas en línea (dispersión láser, error <1%).

Progreso: Las empresas alemanas han conseguido una desviación D50 de ±0,02 μm, que se aplica a herramientas de corte de alta gama y aumenta el rendimiento en un 15 %.

Tecnología de modificación del rendimiento

Dopaje y compuestos:

Objetivo: Mejorar la resistencia a la oxidación, la resistencia a la corrosión y la estabilidad a altas temperaturas y extender la vida útil de la herramienta entre un 30% y un 50%.

Ruta técnica:

El dopaje con Ti, Cr y Nb (0,5%-2%) forma una solución sólida o una segunda fase (como Cr_3C_2) y la dureza aumenta de HV 1800 a HV 2300.

El compuesto de TiC y ZrC (5%-10%) puede mejorar la tenacidad a 12 MPa·m $^{1/2}$, adecuado para piezas aeroespaciales.

Progreso: Las empresas estadounidenses han desarrollado polvos compuestos WC- TiC -Co, que aumentan la velocidad de corte en un 20% y tienen una cuota de mercado del 10%.

Modificación de la superficie:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Objetivo: Reducir la aglomeración (<3%), mejorar la fluidez (<13 seg/50 g) y la actividad de sinterización (temperatura hasta 1350 °C).

Ruta técnica:

El recubrimiento químico de SiO_2 y Al_2O_3 (espesor de 10 a 50 nm) puede mejorar la resistencia a la oxidación en un 25 %.

El tratamiento de plasma (potencia 15-30kW) reduce la rugosidad de la superficie en un 20%.

Progreso: Las empresas chinas han logrado una producción en masa de polvo recubierto de SiO_2 (5.000 toneladas/año), reduciendo los costos en un 10%.

Proceso de fabricación ecológica

Preparación baja en carbono:

Objetivo: Reducir las emisiones de carbono a 2 toneladas de CO_2/tonelada de polvo, en línea con el objetivo de neutralidad de carbono de 2060.

Ruta técnica:

La carbonización por microondas (temperatura <1200°C) reduce el consumo de energía en un 30% (aproximadamente 6000 kWh/tonelada).

Recuperación de calor residual: recuperar el calor del horno de carbonización (que representa el 15% del consumo total de energía), ahorrando 5 millones de kWh de electricidad al año.

Progreso: Las empresas de la UE están probando la carbonización por microondas, reduciendo la huella de carbono a 2,5 toneladas de CO_2/tonelada, con planes de promoverla para 2030.

Tratamiento de residuos líquidos y sólidos:

Objetivo: Tasa de recuperación de aguas residuales > 90%, tasa de utilización de recursos de residuos sólidos > 80%.

Ruta técnica:

Separación por membrana (ósmosis inversa, tamaño de poro 0,1 nm), la concentración de tungsteno se redujo a 0,2 mg/L.

Los residuos sólidos se utilizan como aditivos para cemento, con una tasa de recuperación del 85%.

Reciclaje de aguas residuales en circuito cerrado, con emisiones reducidas a 100 m^3/tonelada, de acuerdo con los estándares GB 8978-1996.

Inteligencia y digitalización

Objetivo: Aumentar la eficiencia de producción entre un 15% y un 20% y reducir la tasa de defectos a <1%.

Ruta técnica:

Optimización de IA: el aprendizaje automático predice la distribución del tamaño de partículas (error < 0,05 μm) y los parámetros de sinterización (desviación de temperatura ± 3 °C).

Internet de las cosas (IoT): monitorización en tiempo real de la concentración de polvo (error < 0,1 mg/m^3), consumo energético (error < 1 kWh) y emisiones (COV < 1 ppm).

Progreso: Las empresas alemanas implementaron líneas de producción inteligentes, lo que aumentó la eficiencia productiva en un 18 % y redujo los costos en un 12 %. Zhuzhou, China, implementó un

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

programa piloto de monitoreo de IoT, lo que permitió ahorrar 20 millones de RMB anuales.

8.3 Perspectivas de aplicación futuras

Impulsada por el progreso tecnológico, la demanda del mercado y las directrices políticas, la aplicación futura del polvo de carburo de tungsteno se profundizará en los campos tradicionales y se expandirá a los emergentes. A continuación, se analizan las perspectivas de aplicación desde tres perspectivas: optimización de las aplicaciones tradicionales, expansión de los campos emergentes, y desafíos y contramedidas.

Optimización de aplicaciones tradicionales

Herramientas de carburo:
Perspectivas: El polvo ultrafino (<0,5 μm) puede aumentar la vida útil de la herramienta en un 50% y la velocidad de corte en un 30%, satisfaciendo las necesidades de la industria aeroespacial (procesamiento de aleación de titanio) y automotriz (procesamiento de acero de alta resistencia).
Soporte técnico: Se espera que el tamaño del mercado de polvo nanocompuesto (WC- TiC) combinado con recubrimiento inteligente (TiN / Al_2O_3) alcance los US$10 mil millones en 2030.
Ejemplo: Las empresas chinas desarrollaron herramientas de corte de polvo de 0,3 μm, que aumentaron la eficiencia de procesamiento en un 25% y aumentaron la participación de exportación al 30%.

Recubrimiento resistente al desgaste:
Perspectivas: Recubrimientos de alta temperatura (temperatura de operación > 1000°C) para turbinas de gas y brocas de perforación petrolera, con un aumento del 40% en la resistencia al desgaste.
Soporte técnico: polvo esferoidizado de plasma (fluidez <14 seg/50 g) combinado con pulverización HVOF (dureza del recubrimiento HV 1400).
Ejemplo: Una empresa europea desarrolló un recubrimiento WC-Cr_3C_2 que prolongó la vida útil de las brocas en un 60% y logró una participación de mercado del 20%.

Herramientas de minería:
Perspectivas: El polvo de alta tenacidad (tenacidad > 12 MPa·$m^{1/2}$) satisface las necesidades de perforación profunda y extiende la vida útil de la herramienta en un 30%.
Soporte técnico: Dopaje VC y NbC (1%-2%) para optimizar la resistencia del límite de grano.
Ejemplo: Una empresa rusa lanzó una broca de alta tenacidad, aumentando su cobertura de mercado del 10% al 15%.

Expansión en campos emergentes

Fabricación aditiva (impresión 3D):
Perspectivas: Los nanopolvos (<100 nm) se utilizan en piezas aeroespaciales (precisión ±5 μm) e implantes médicos (porosidad <0,5 %), y se espera que el tamaño del mercado alcance los 2 mil millones de dólares en 2030.

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

Soporte técnico: Polvo esférico (D90/D10<1,5) combinado con deposición fundida por láser (LMD), la resistencia de impresión alcanza los 2000 MPa.
Ejemplo: Una empresa estadounidense imprimió piezas de WC-Co, reduciendo los costes en un 20% y acortando el tiempo de entrega en un 50%.

Materiales de microelectrónica:
Perspectivas: Los polvos ultrafinos (<0,2 μm) se utilizan para sustratos de disipación de calor de chips (conductividad térmica >200 W/ m·K) y pastas conductoras. Se prevé que el tamaño del mercado alcance los 500 millones de dólares estadounidenses en 2030.
Soporte técnico: Preparación CVD de polvo de alta pureza (impurezas <10 ppm), combinado con sinterización de precisión (desviación de tamaño ±1 μm).
Ejemplo: Una empresa japonesa desarrolló una suspensión a base de WC, que mejoró el rendimiento del chip en un 15% y logró una participación de mercado del 30%.

Equipos de energía:
Perspectivas: Los recubrimientos resistentes a la corrosión (la resistencia al ácido aumentó tres veces) se utilizan en engranajes de turbinas eólicas y válvulas de energía nuclear, y se espera que el tamaño del mercado alcance los mil millones de dólares en 2030.
Soporte técnico: polvo dopado de Ta, Cr (0,5%-1%) combinado con pulverización de plasma (resistencia de unión >80 MPa).
Ejemplo: Una empresa china desarrolló un recubrimiento WC- TaC que extendió la vida útil de los engranajes de las turbinas eólicas en un 40%.

Desafíos y contramedidas

desafío:
Presión de costos: El costo de producción del nanopolvo (aproximadamente 1 millón de RMB/tonelada) limita su popularización y debe reducirse entre un 30% y un 50%.
Barreras tecnológicas: Europa y Estados Unidos son líderes en los campos de los polvos ultrafinos (<0,2 μm) y la fabricación inteligente, y China necesita reducir la brecha en 5 a 10 años.
Requisitos de protección ambiental: el impuesto global a las emisiones de carbono (EU CBAM) y los objetivos de “carbono dual” de China aumentan los costos entre un 10% y un 15%.

Contramedidas:
Optimización de costos: Promover la tecnología de carbonización y reciclaje por microondas y reducir el costo a 600.000 RMB/tonelada.
Avances tecnológicos: Fortalecer la colaboración entre la industria, la universidad y la investigación para desarrollar procesos asistidos por IA (mejora del 20 % en la eficiencia) y polvos nanocompuestos (mejora del 30 % en el rendimiento).
Transformación verde: invertir en equipos con bajas emisiones de carbono (ahorrando 10 millones de RMB al año) y aumentar la tasa de reciclaje al 80%, de acuerdo con las regulaciones de 2030.

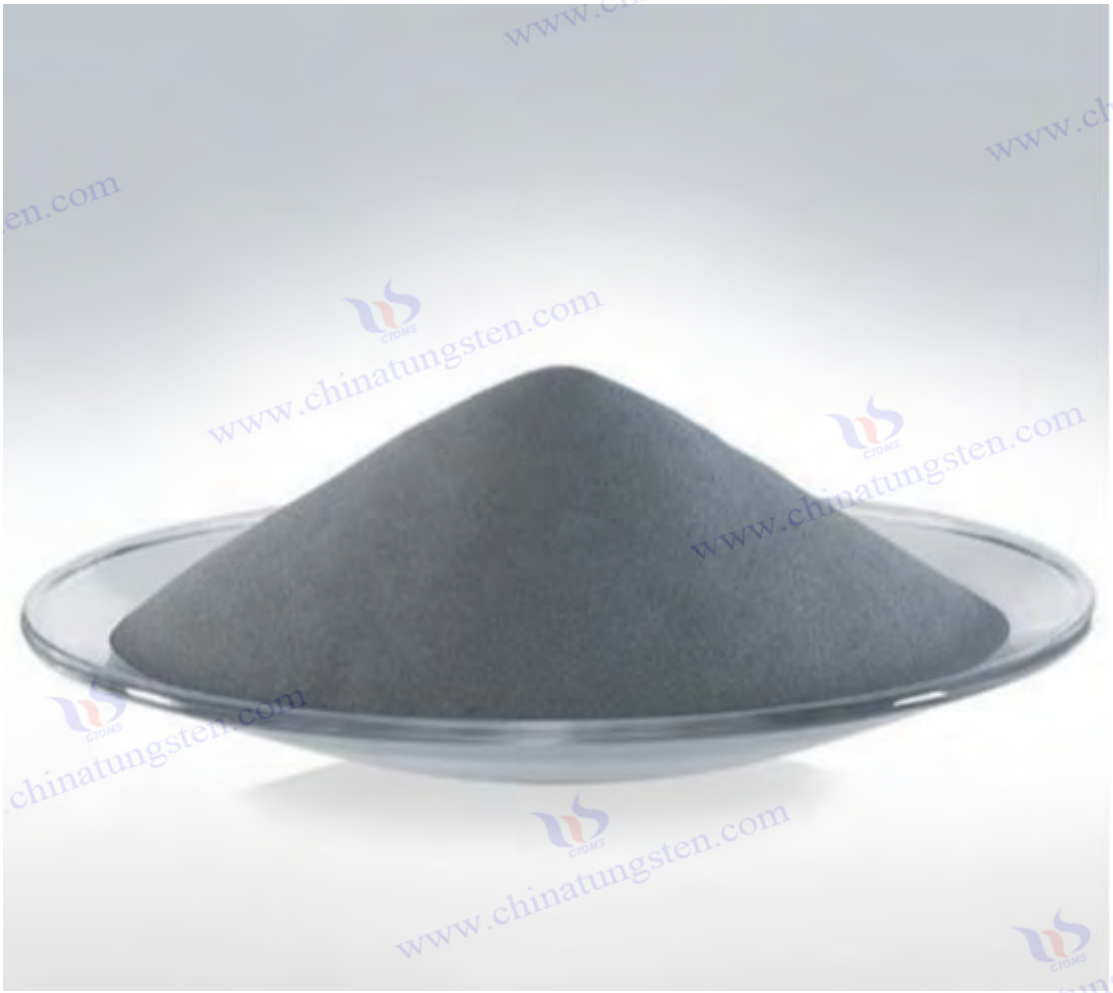
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Referencias

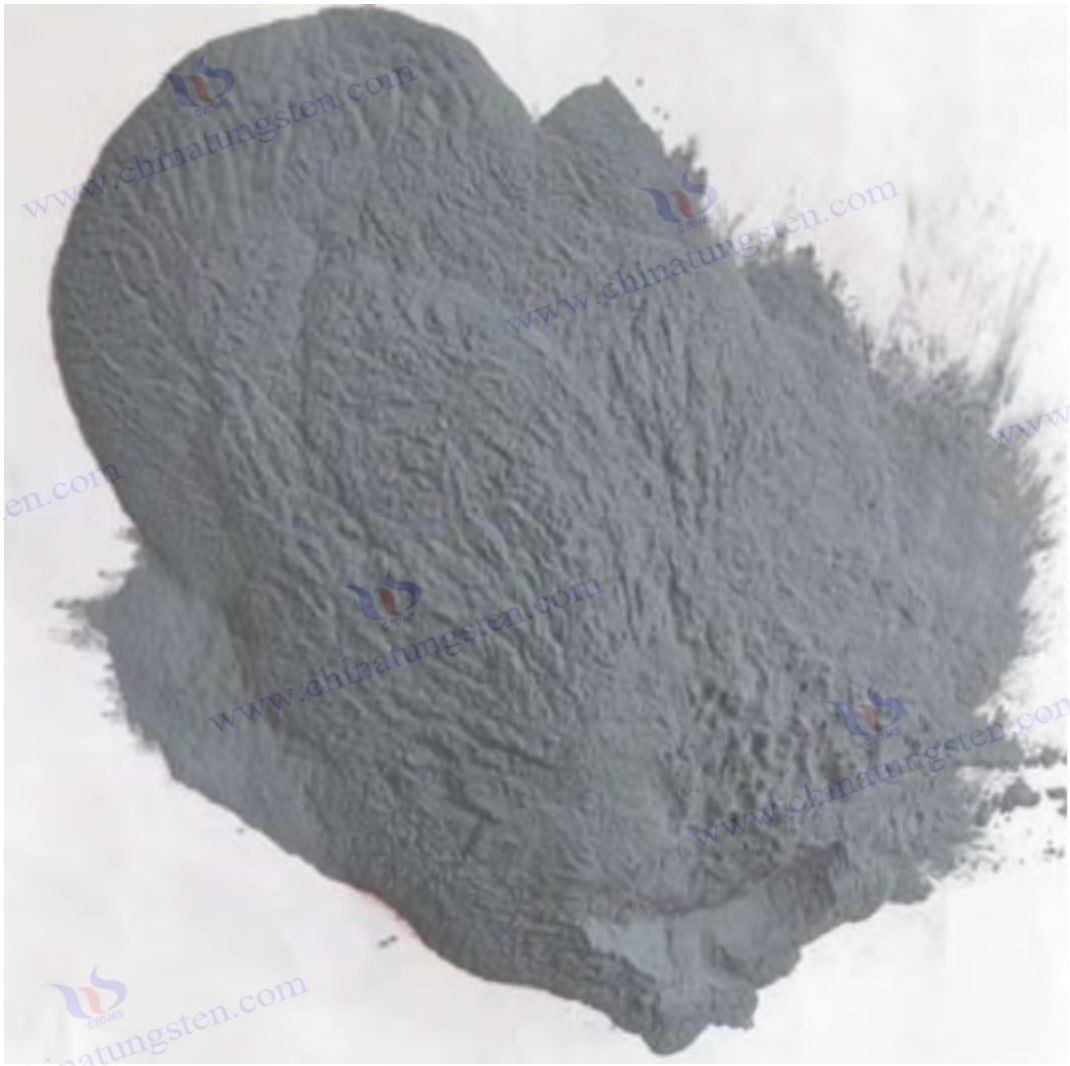
Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Li Ming. Ciencia de los materiales del carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Estado actual y tendencia de desarrollo del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Industria del tungsteno de China, 2022, 37(3): 56-63.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Estado actual y tendencias de desarrollo del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Industria del tungsteno en China, 2022, 37(3): 56-63.
Wang Qiang, Li Ming. Análisis de la oferta y la demanda global de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
Wang Qiang, Li Ming. Análisis global de la oferta y la demanda de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
Chen Wei, Zhao Gang. Investigación sobre innovación tecnológica del polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2024, 42(2): 89-96.
Chen Wei, Zhao Gang. Estudio sobre la innovación tecnológica del polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2024, 42(2): 89-96.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Perspectivas de aplicación del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2024, 42(5): 78-85.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Perspectivas de aplicación del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Ciencia e Ingeniería de Materiales, 2024, 42(5): 78-85.
Smith J, Brown T. Tendencias del mercado global de polvos de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2023, 58(6): 3456-3468.
Tendencia del mercado global del polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2023, 58(6): 3456-3468.
Johnson R, Lee K. Avances tecnológicos en la producción de carburo de tungsteno [J]. Powder Technology, 2024, 415: 118123.
Avances en la tecnología de producción de carburo de tungsteno [J]. Powder Technology, 2024, 415: 118123.
Davis M, Patel S. Aplicaciones futuras del carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Additive Manufacturing, 2024, 65: 102345.
Aplicaciones futuras del carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Additive Manufacturing, 2024, 65: 102345.
Müller H, Schmidt P. Markanalyse für Wolframcarbidpulver [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2023, 54(4): 567-574.
Análisis del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia de los Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2023, 54(4): 567-574.
Bauer T. Tecnológico Entwicklungen in der Wolframcarbidherstellung [M]. Berlín: Springer, 2024.
Desarrollos tecnológicos en la producción de carburo de tungsteno [M]. Berlín: Springer-Verlag, 2024.
Taro Yamada. Tendencias del mercado del polvo de dióxido de carbono carbonizado [J]. Revista de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Ciencia de Materiales, 2023, 72(3): 123-130.
Dinámica del mercado del polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de la Sociedad de Ciencia de Materiales, 2023, 72(3): 123-130.
Ken Nakamura. Aplicaciones emergentes del polvo carbonizado [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Polvos, 2024, 61(5): 345-352.
Áreas de aplicación emergentes del polvo de carburo de tungsteno[J]. Journal of Powder Engineering Society, 2024, 61(5): 345-352.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



Capítulo 9: Terminología, estándares y recursos

El polvo de carburo de tungsteno y su precursor, el polvo de tungsteno, son materias primas clave para materiales de alto rendimiento como el carburo cementado, herramientas de corte y recubrimientos resistentes al desgaste. Su investigación y aplicación abarcan una amplia gama de términos profesionales, estándares industriales y recursos técnicos. La organización sistemática de estos contenidos contribuye a estandarizar los intercambios académicos, orientar las prácticas industriales y promover la innovación tecnológica. Basado en fuentes acreditadas como China Tungsten Online (news.chinatungsten.com), este capítulo resume exhaustivamente los términos profesionales, los estándares acreditados y los recursos de aprendizaje desde tres aspectos: glosario de términos relacionados con el polvo de carburo de tungsteno, referencias y estándares, y recursos recomendados, para proporcionar un marco de referencia científico-práctico para investigadores, ingenieros y profesionales de la industria.

9.1 Glosario de términos relacionados con el polvo de carburo de tungsteno

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

El siguiente glosario se amplía a 80 términos básicos, con nuevas clasificaciones del tamaño de partícula del polvo de tungsteno y del polvo de carburo de tungsteno (como polvo de carburo de tungsteno ultrafino, polvo de carburo de tungsteno de partículas gruesas, etc.), que abarcan la producción, la modificación, el reciclaje, la aplicación, el mercado, el medio ambiente y la seguridad. Cada término contiene chino, inglés, japonés, coreano, alemán y su definición, ordenados en chino pinyin, con una expresión precisa y un marcado carácter académico.

Chino	Inglés	japonés	coreano	Alemán	Definición
Área de superficie específica	Área de superficie específica	Área de superficie específica	2	Pasar el día	La superficie por unidad de masa de polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno (m^2/g) afecta la actividad de sinterización, con un valor típico de 5-20 m^2/g.
Modificación de la superficie	Modificación de la superficie	Modificación de la superficie	표면 coreano	Modificación superior	La tecnología de cambiar las propiedades de la superficie del polvo de tungsteno o del polvo de carburo de tungsteno (como la reducción de la tasa de aglomeración) mediante métodos químicos o físicos.
Polvo de carburo de tungsteno ultrafino	Polvo de carburo de tungsteno ultrafino	Polvo carbonizado ultrafino de タングステン	초미세 탄화텅스텐 분말	Ultrafinas Polvo de carburo de wolframio	Polvo de carburo de tungsteno con un tamaño de partícula de 0,1-1 μm, utilizado para herramientas y recubrimientos de alta precisión, dureza HV 2000-2200.
Polvo de tungsteno ultrafino	Polvo de tungsteno ultrafino	Polvo ultrafino de タングステン	초미세 텅스텐 분말	Ultrafinas Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno con un tamaño de partícula de 0,1-1 μm se utiliza como precursor del polvo de carburo de tungsteno ultrafino para la preparación de materiales de alto rendimiento.
Eficiencia de deposición	Eficiencia de deposición	Eficiencia de apilamiento	2 horas	Abstracto	El porcentaje de masa de polvo de carburo de tungsteno depositado sobre el sustrato durante el proceso de pulverización térmica o CVD es >90% para procesos de alta calidad.
Polvo de carburo de tungsteno monocristalin	Polvo de carburo de tungsteno monocristali	Polvo de タングステン carbonizado monocristalino	2 탄화텅스텐 분말	Pulverizador de carburo de Einkristall-Wolfram	El polvo de carburo de tungsteno compuesto de un solo cristal tiene una consistencia de tamaño de partícula alta (D90/D10 <1,2) y se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

o	no				utiliza para aplicaciones de alta gama.
Polvo de carburo de tungsteno de grano grueso	Polvo grueso de carburo de tungsteno	Polvo carbonizado de grano grueso	2 탄화텅스텐 분말	Grobk ö rniges Polvo de carburo de wolframio	El polvo de carburo de tungsteno con un tamaño de partícula >10 μm se utiliza para herramientas de minería y piezas resistentes al desgaste, con una tenacidad >12 MPa·m ¹ / ² .
Polvo de tungsteno de partículas gruesas	Polvo grueso de tungsteno	Polvo de poliéster de grano grueso	2 páginas 분말	Grobkörniges Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno con un tamaño de partícula de >10 μm, como precursor del polvo de carburo de tungsteno, es adecuado para el proceso de carbonización a alta temperatura.
Reciclaje electroquímico	Recuperación electroquímica	Reciclaje electroquímico	2. 회수	Electroquímica Ganancia de devolución	El carburo de tungsteno se recupera mediante disolución electrolítica de la fase de unión de carburo cementado residual (como Co), con una tasa de recuperación del 90%-95%.
dopaje con nitruro	Dopaje con nitruro	Dopaje químico	2 noches	Dotación de nitruro	Tecnología que agrega nitruros (como TiN , ZrN) al polvo de carburo de tungsteno para mejorar la resistencia al desgaste y la estabilidad a altas temperaturas.
Esferoidización de plasma	Esferoidización de plasma	Esferoidización de plasma	플라즈마 구형화	Plasma - Esferoidización	Se utiliza plasma (20-60 kW) para fundir polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno para formar partículas esféricas con una fluidez <14 segundos/50 g.
Polvo de carburo de tungsteno policristalino	Polvo de carburo de tungsteno policristalino	Polvo carbonizado policristalino de タングステン	2 탄화텅스텐 분말	Policristalinas Polvo de carburo de wolframio	Polvo de carburo de tungsteno compuesto de múltiples granos, adecuado para materiales compuestos, dureza HV 1800-2000.
Explosión de polvo	Explosión de polvo	Explosión de polvo	2 páginas	Explosión de Staub	El polvo fino de tungsteno o de carburo de tungsteno (<10 μm) forma nubes de polvo en el aire y explota al entrar en contacto con chispas. La energía de ignición es de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

					aproximadamente 10 mJ.
Polvo de carburo de tungsteno de alta pureza	Polvo de carburo de tungsteno de alta pureza	Polvo de タングステン carbonizado de alta pureza	고순도 탄화텅스텐 분말	Altas reinas Polvo de carburo de wolframio	Polvo de carburo de tungsteno con contenido de impurezas <0,01%, utilizado en microelectrónica y catalizadores, pureza >99,99%.
Polvo de tungsteno de alta pureza	Polvo de tungsteno de alta pureza	Polvo de poliéster de alta pureza	고순도 텅스텐 분말	Altas reinas Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno con un contenido de impurezas <0,01 % se utiliza como precursor del polvo de carburo de tungsteno de alta pureza con una pureza de >99,99 %.
Solución sólida	Solución sólida	Solución sólida	고용체	Solución festiva	Los elementos dopantes (como el Ti) reemplazan los átomos de tungsteno en la red de carburo de tungsteno para formar una fase uniforme, lo que aumenta la dureza en un 20%-30%.
Deposición química de vapor	Deposición química de vapor (CVD)	Deposición química de vapor	화학 Capítulo 2	Química Absorción de fase de gas	por deposición de precursores gaseosos (como WF_6, CH_4) a 800-1000°C.
Recuperación de disolución química	Recuperación de disolución química	Recuperación de disolución química	Página 2 Página 2	Química Lösungsrückgewinnung	Utilice una solución ácida u oxidante para disolver la fase de unión de carburo cementado de desecho y recuperar el carburo de tungsteno con una tasa de recuperación del 95% al 98%.
Evaluación de Impacto Ambiental	Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)	Evaluación de Impacto Ambiental	환경 영향 평가	Umweltvertr ä glichkeitspr ü fung	Un enfoque sistemático para evaluar el impacto ambiental de la producción de polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno (por ejemplo, huella de carbono de 4 a 6 toneladas de CO_2/tonelada).
Tratamiento de aguas residuales	Tratamiento de aguas residuales	Tratamiento de fluidos residuales	página 2	Manejo absorbente	Tratar el líquido residual que contiene metales pesados (como tungsteno y cobalto) en la producción de polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno para cumplir con los estándares de descarga (tungsteno <0,5 mg/L).
Polvo de carburo de	Polvo de carburo de	Polvo de carbón	복합 탄화텅	Polvo de carburo de	La tenacidad del polvo formado por el compuesto de carburo de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tungsteno compuesto	tungsteno compuesto	carbonizado compuesto	스텐 분말	wolframio de Komposit	tungsteno, TiC , ZrC , etc. aumenta a 12 MPa·m ¹ / ² .
Molienda de bolas de alta energía	Molienda de bolas de alta energía	Polvo altamente energizante	고에너지 볼 밀링	Hochenergie-Kugelmahlen	El polvo de tungsteno ultrafino o polvo de carburo de tungsteno se prepara mediante molienda mecánica de alta energía y el tamaño de partícula puede alcanzar entre 0,1 y 0,5 µm.
Recuperación de fundición a alta temperatura	Recuperación de fundición a alta temperatura	Recuperación de material fundido a alta temperatura	고온 용융 회수	Hochtemperatur-Schmelzrückgewinnung	El carburo cementado residual se funde a 1800-2000 °C para separar el carburo de tungsteno, con una tasa de recuperación del 85%-90%.
Residuos sólidos	Residuos sólidos	Residuos sólidos	고체 폐기물	Afecciones por pus	La producción anual de escoria, desechos de molinos de bolas y otros desechos en la producción de polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno es de aproximadamente 500.000 toneladas.
Aleación mecánica	Aleación mecánica	Aleación mecánica	2 coreanos	Legislación mecánica	que mezcla carburo de tungsteno y elementos dopantes (como Cr_3C_2) para formar un polvo compuesto a través de molienda de bolas de alta energía.
Tamaño del grano	Tamaño del grano	Tamaño de partícula cristalina	결정립 크기	Tamaño de cornejo	El tamaño promedio de partícula (µm) del polvo de tungsteno o del monocristal de polvo de carburo de tungsteno afecta la dureza y la tenacidad, con un valor típico de 0,5 a 10 µm.
Fuerza de unión	Fuerza de unión	Fuerza de unión	결합 강도	Fuerza de encuadernación	La resistencia de unión entre el recubrimiento de carburo de tungsteno y el sustrato (MPa), recubrimiento de alta calidad>80 MPa.
Porosidad	Porosidad	Porosidad	기공률	Porosidad	El porcentaje de volumen (%) de poros en el carburo cementado después de la sinterización. Para productos de alta calidad, es <1%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Rendimiento del flujo	Fluidez	Liquidez	2	Vuela alto	El tiempo que tarda el polvo de carburo de tungsteno en fluir en un embudo estándar (segundos/50 g), polvo esférico <14 segundos/50 g.
Polvo de carburo de tungsteno de tamaño nanométrico	Polvo de carburo de tungsteno nano	Polvo carbonizado de grado NANO	나노급 탄화텅스텐 분말	Nanok ö rniges Polvo de carburo de wolframio	Polvo de carburo de tungsteno con tamaño de partícula <100 nm, utilizado en impresión 3D y microelectrónica, dureza >HV 2300.
Polvo de tungsteno de grado nanométrico	Polvo de nano tungsteno	Polvo de grado NANO	나노급 텅스텐 분말	Nanocoronas Pulverizador de lobo	El tamaño de partícula <100 nm se utiliza como precursor del polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica para aplicaciones de alta precisión.
Eficiencia de pulverización	Eficiencia de pulverización	Eficiencia de pulverización	2 horas	Eficiencia de pulverización	El porcentaje de masa de utilización efectiva del polvo de carburo de tungsteno en el proceso de pulverización térmica alcanza el 85%-95% en el proceso HVOF.
Actividad de sinterización	Actividad de sinterización	Actividad de sinterización	소결 활성	San Nicolás está	La capacidad del polvo de carburo de tungsteno para difundirse y unirse durante la sinterización está relacionada con el tamaño de las partículas y la energía superficial.
Molienda de bolas húmedas	Molienda húmeda	Pulverización húmeda	습식 볼 밀링	Nassmahlen	Muela polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno en un medio líquido (como etanol) para reducir el tamaño de partícula (<1 μm) y la tasa de aglomeración es <5%.
Reacción de carbonización	Reacción de carbonización	Reacción de carbonización	탄화 반응	Oportunidad de trabajo	El proceso de reacción del polvo de tungsteno con carbono a 1200-1600 °C para formar carburo de tungsteno, con un contenido de carbono controlado a 6,13 ± 0,05 %.
Polvo de carburo de tungsteno	Polvo de carburo de tungsteno	Polvo carbonizado de タングステン	탄화텅스텐 분말	Polvo de carburo de wolframio	Polvo de tungsteno y carburo, ampliamente utilizado en carburo cementado y recubrimiento, dureza HV 1200-2200.
Huella de	Huella de	カーボンフッ	탄소	Compuesto de	Las emisiones de carbono del polvo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

carbono	carbono	トプリント	발자국	carbono - Pie impresión	de tungsteno o del polvo de carburo de tungsteno a lo largo de su ciclo de vida (toneladas de CO_2/tonelada) suelen ser de 4 a 6 toneladas.
Tasa de reunión	Tasa de aglomeración	tasa de aglutinación	2	Tasa de aglomeraciones	El porcentaje de partículas de polvo de tungsteno o de polvo de carburo de tungsteno aglomeradas durante el almacenamiento o el procesamiento, en polvo de alta calidad, es inferior al 3%.
Carbonización por microondas	Carbonización por microondas	Carbonización por microondas	El más hermoso 탄화	Plan de marketing	La tecnología de uso de microondas (<1200 °C) para calentar polvo de tungsteno y carbono para producir carburo de tungsteno reduce el consumo de energía en un 30 %.
Polvo de carburo de tungsteno de micras	Polvo de carburo de tungsteno de micrones	Polvo carbonizado de calidad micrométrica	El 탄화텅스텐 분말	Mikron- Polvo de carburo de wolframio	El polvo de carburo de tungsteno con un tamaño de partícula de 1-10 µm se utiliza para herramientas de corte y piezas resistentes al desgaste, con una dureza de HV 1800-2000.
Polvo de tungsteno de micras	Polvo de tungsteno de micrones	Nivel de micras タングステン polvo	El 텅스텐 분말	Mikron -Pulver de lobo	El polvo de tungsteno con un tamaño de partícula de 1-10 µm, como precursor del polvo de carburo de tungsteno de tamaño micrométrico, es adecuado para el proceso de carburación convencional.
Economía circular	Economía circular	Economía circular	순환 경제	Asociación de distritos	Al reciclar y reutilizar el polvo de tungsteno o el polvo de carburo de tungsteno, podemos reducir el consumo de recursos y la carga ambiental, con un objetivo de tasa de reciclaje del 70%.
Microdureza	Microdureza	Microdureza	현미경 경도	Microduro	La dureza Vickers (HV) del polvo de carburo de tungsteno sinterizado suele ser de 1200 a 2200, lo que refleja su resistencia al desgaste.
Polvo de carburo de	Polvo fino de carburo de	Polvo carbonizado de	세립 탄화텅	Feink ö rniges Polvo de	Polvo de carburo de tungsteno con un tamaño de partícula de 0,5-2 µm,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tungsteno de partículas finas	tungsteno	grano fino	스텐 분말	carburo de wolframio	utilizado para herramientas y recubrimientos de alta precisión, dureza HV 1900-2100.
Polvo de tungsteno de partículas finas	Polvo fino de tungsteno	Polvo de タングステン de grano fino	세립 텅스텐 분말	Feinkörniges Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno con un tamaño de partícula de 0,5-2 μm se utiliza como precursor del polvo de carburo de tungsteno de grano fino para aplicaciones de precisión.
Recuperación de zinc fundido	Recuperación de la fusión de zinc	Recuperación de material fundido de subplomo	2 용융 회수	Ganancia de recuperación de hundimiento	El zinc líquido se utiliza para disolver la fase de unión de carburo cementado de desecho a 900-1000 °C para recuperar carburo de tungsteno con una tasa de recuperación del 90%-95%.
Límites de exposición ocupacional	Límite de exposición ocupacional	Límites de exposición ocupacional	2 2 Coreano	Exposición de negocios	Normas de concentración de seguridad para polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno (<6 mg/m³) y polvo de cobalto (<0,1 mg/m³) en el lugar de trabajo.
Fabricación aditiva	Fabricación aditiva	Fabricación adicional	적층 2	Fertirrigación aditiva	Tecnología para la preparación de piezas complejas mediante impresión 3D utilizando polvo de carburo de tungsteno con una precisión de ±5μm.
Polvo de carburo de tungsteno de partículas medianas	Polvo de carburo de tungsteno medio	Polvo carbonizado de grano medio	중립 탄화텅스텐 분말	Mittelk ö rniges Polvo de carburo de wolframio	El polvo de carburo de tungsteno con un tamaño de partícula de 2-10 μm se utiliza para herramientas de uso general y piezas resistentes al desgaste, con una dureza de HV 1800-2000.
Polvo de tungsteno de partículas medianas	Polvo de tungsteno medio	Polvo de タングステン de grano medio	중립 텅스텐 분말	Mittelk ö rniges Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno con un tamaño de partícula de 2 a 10 μm se utiliza como precursor del polvo de carburo de tungsteno de grano medio y es adecuado para aplicaciones generales.
Antioxidante	Resistencia a la oxidación	Resistencia a los ácidos	2	se ven mejor	La capacidad del polvo de tungsteno o del polvo de carburo de tungsteno para resistir la oxidación a altas temperaturas (como 800 °C). La

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

					tasa de ganancia de peso del polvo de alta calidad es <0,5 %.
Resistencia a la corrosión	Resistencia a la corrosión	Resistencia a la corrosión	2	La mejor selección de productos	La estabilidad del polvo o recubrimiento de carburo de tungsteno en un entorno ácido/alcalino se puede incrementar hasta 3 veces mediante dopaje con Cr.
Proyección térmica	Proyección térmica	Proyección térmica	Artículo 2	Termodinámica	La tecnología de pulverización de polvo de carburo de tungsteno sobre el sustrato para formar un revestimiento resistente al desgaste con un espesor de revestimiento de 50-500 µm.
Coeficiente de expansión térmica	Coeficiente de expansión térmica	Coeficiente de expansión térmica	2 계수	Wärmeausdehnungskoeffizient	El coeficiente de expansión térmica del polvo de carburo de tungsteno sinterizado (µm / m·K) suele ser de 4,5 a 5,5, lo que afecta la estabilidad del recubrimiento.
tenacidad	Tenacidad	Tenacidad	인성	Dificilidad	La capacidad del polvo de carburo de tungsteno sinterizado para resistir la fractura (MPa·m^{1} /^{2}), los productos de alta calidad son de 8-12 MPa·m^{1} /^{2}.
Contenido de oxígeno	Contenido de oxígeno	Contenido de ácido	산소 함량	Retención de materia prima	El porcentaje de masa de oxígeno (%) en polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno, polvo de alta calidad <0,1%, afecta la calidad de sinterización.
carburo cementado	carburo cementado	Aleación superdura	2	Hartmetall	Un material compuesto formado por la sinterización de polvo de carburo de tungsteno y una fase aglutinante (como Co) con una dureza de HV 1200-2200.
Pureza de la materia prima	Pureza de la materia prima	Pureza de la materia prima	원료 순도	Frescura del material	La pureza (%) del tungsteno y el carbono en polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno es >99,8% para polvo de alta calidad y <0,01% para impurezas.
Distribución	Distribución	Distribución	입도	Entrada de la	El rango de distribución del tamaño

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

del tamaño de partículas	del tamaño de partículas	del tamaño de partículas	분포	primera parte	de partícula de polvo de tungsteno o polvo de carburo de tungsteno (como D50, D90/D10), polvo de alta calidad D90/D10 <1,5.
Coeficiente de fricción	Coeficiente de fricción	Coeficiente de fricción	마찰 계수	Eficiencia del reciclaje	Las características de fricción entre el recubrimiento de carburo de tungsteno y la superficie de contacto, normalmente entre 0,2 y 0,4, afectan la resistencia al desgaste.
Deposición por fusión láser	Deposición por fusión láser (LMD)	Acumulación de material fundido en la reserva	2 용융 2	Tratamiento con láser	La tecnología de uso de láser para fundir polvo de carburo de tungsteno y depositarlo para formar piezas se utiliza para la fabricación aditiva con una resistencia de >2000 MPa.
Recubrimiento de carburo de tungsteno	Recubrimiento de carburo de tungsteno	Dióxido de carbono carbonizado	탄화텅스텐 코팅	Recubrimiento de carburo de lobo	La capa resistente al desgaste se forma sobre el sustrato mediante pulverización térmica o CVD, con una dureza de HV 1000-1400 y un espesor de 50-500μm.
Tasa de recuperación de carburo de tungsteno	Tasa de recuperación de carburo de tungsteno	Tasa de recuperación de aguas residuales carbonizadas	탄화텅스텐 2	Tasa de ganancia de Wolframcarbid	El porcentaje de masa de carburo de tungsteno recuperado del carburo cementado residual mediante el método de disolución química es del 95% al 98%.
Consumo de energía de producción	Consumo de energía de producción	Producción y consumo	생산 2 소비	Crecimiento de las ventas de productos	El consumo de energía (kWh) por tonelada de producción de polvo de tungsteno o de polvo de carburo de tungsteno es típicamente de 8.000 a 12.000 kWh/tonelada.
Fluctuaciones de los precios del mercado	Volatilidad de los precios del mercado	Cambios en los precios del mercado	시장 가격 변동	Volatilidad del precio del mercado	El precio del polvo de carburo de tungsteno fluctúa según la oferta y la demanda (dólares estadounidenses/kg). El precio promedio en 2024 fue de 46,09 dólares estadounidenses/kg.
Polvo de tungsteno	Polvo de tungsteno	Polvo de tangusten	텅스텐 분말	Pulverizador de lobo	El polvo hecho de tungsteno metálico, utilizado como precursor del polvo de carburo de tungsteno,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

					tiene un rango de tamaño de partícula de 0,1 a 100 μm.
Carbono no ligado	Carbono libre	Carbono no ligado	미결합 탄소	Libre de combustibles fósiles	El contenido de carbono residual (%) en el polvo de carburo de tungsteno que no ha reaccionado con tungsteno, polvo de alta calidad es <0,1%.
Preparación por el método de reducción	Método de reducción	Fabricación por método de reducción	환원법 2	Redención	La tecnología de preparación de polvo de tungsteno mediante la reducción de ácido túngstico u óxido de tungsteno con hidrógeno, el tamaño de partícula se controla entre 0,5 y 10 μm.
Polvo de óxido de tungsteno	Polvo de óxido de tungsteno	Polvo acidificado de タングステン	El 분말	Polvo de wolframio	WO_3 o WO_2, como intermedio de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno, con una pureza >99,5%.
Bigotes de carburo de tungsteno	Bigote de carburo de tungsteno	Dióxido de carbono carbonizado	탄화텅스텐 위스커	Wolframcarbid -Bigote	Las partículas de carburo de tungsteno en forma de aguja se utilizan para reforzar materiales compuestos. Su longitud es de 10-50 μm.
Partículas de carburo de tungsteno	Partícula de carburo de tungsteno	Partículas carbonizadas de タングステン	탄화텅스텐 2	Partículas de carburo de wolframio	El carburo de tungsteno en forma de partícula única con un rango de tamaño de partícula de 0,1 a 100 μm se utiliza en diferentes escenarios de aplicación.
Polvo de carburo de tungsteno de alta densidad	Polvo de carburo de tungsteno de alta densidad	Polvo carbonizado de alta densidad	고밀도 탄화텅스텐 분말	Altamente hermético Polvo de carburo de wolframio	Para los carburos cementados de alto rendimiento se utiliza una densidad cercana al valor teórico (15,63 g/cm³).
Polvo de tungsteno de alta densidad	Polvo de tungsteno de alta densidad	Polvo de タングステン de alta densidad	고밀도 텅스텐 분말	Cómo dibujar una imagen	Se utiliza una densidad cercana al valor teórico (19,25 g/cm³) como precursor del polvo de carburo de tungsteno de alto rendimiento.
Polvo esférico de carburo de tungsteno	Polvo esférico de carburo de tungsteno	Polvo carbonizado esférico de タングステン	구형 탄화텅스텐 분말	Esfera riesgos Polvo de carburo de wolframio	El polvo de carburo de tungsteno esférico preparado por esferoidización de plasma, con fluidez <14 segundos/50 g, se utiliza para impresión 3D.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Polvo de tungsteno esférico	Polvo de tungsteno esférico	Polvo esférico de タングステン	구형 텅스텐 분말	Esférico Pulverizador de lobo	El polvo de tungsteno esférico preparado por esferoidización de plasma tiene una excelente fluidez como precursor del polvo de carburo de tungsteno esférico.
Materiales compuestos a base de carburo de tungsteno	Compuesto a base de carburo de tungsteno	Material compuesto de poliéster carbonizado	탄화텅스텐 기반 복합재	Basados en carburos de wolframio Material de construcción de la unión	Los materiales hechos de polvo de carburo de tungsteno como matriz y compuestos con otros materiales (como TiC , Co) tienen diversas propiedades.
Metalurgia de polvos de carburo de tungsteno	Metalurgia de polvos de carburo de tungsteno	Metalurgia de polvos carbonizados	탄화텅스텐 분말 2	Wolframcarbid-Pulvermetallurgie	Tecnología para la preparación de carburo cementado a partir de polvo de carburo de tungsteno mediante proceso de pulvimetalurgia, temperatura de sinterización 1350-1500°C.

9.2 Referencias y normas

La siguiente es una lista de referencia ampliada de 50 artículos en total, que cubre artículos académicos, libros, artículos de revistas, recursos en línea, etc. en chino (15 artículos), inglés (15 artículos), alemán (10 artículos) y japonés (10 artículos), integrando China Tungsten Online como la principal fuente de información del mercado.

Literatura china

Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Li Ming. Ciencia de los materiales del carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.
Zhang Li, Wang Chuanhui . Avances en la tecnología de preparación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de metalurgia de polvos, 2020, 38(2): 88-94.
Wang Qiang, Li Ming. Avances en la tecnología de reciclaje de chatarra de carburo cementado [J]. Industria del Tungsteno de China, 2020, 35(5): 66-72.
Wang Qiang, Li Ming. Avances en la tecnología de reciclaje de residuos de carburo cementado [J]. Industria del tungsteno de China, 2020, 35(5): 66-72.
Chen Wei, Zhao Gang. Investigación sobre la gestión de la seguridad en la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Seguridad y Medio Ambiente, 2022, 22(4): 123-130.
Chen Wei, Zhao Gang. Estudio sobre la gestión de la seguridad en la producción de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Seguridad y Medio Ambiente, 2022, 22(4): 123-130.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Liu Yang, Wang Zhiqiang. Estado actual y tendencia de desarrollo del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
Liu Yang, Wang Zhiqiang. Estado actual y tendencias de desarrollo del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
Zhang Li, Chen Wei. Optimización del proceso de disolución química para el reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2021, 39(4): 123-130.
Zhang Li, Chen Wei. Optimización del proceso de disolución química para el reciclaje de polvo de carburo de tungsteno [J]. Tecnología de Metalurgia de Polvos, 2021, 39(4): 123-130.
Wang Zhiqiang, Li Ming. Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Revista China de Metales No Ferrosos, 2024, 34(3): 456-463.
Wang Zhiqiang, Li Ming. Aplicaciones del polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Revista China de Metales No Ferrosos, 2024, 34(3): 456-463.
Tungsteno de China en línea. Análisis y tendencia de precios del mercado chino de tungsteno en 2024 [EB/OL]. http://news.chinatungsten.com/cn/tungsten-news/2024-04-30.html , 30/04/2024.
Chinatungsten Online. Análisis y tendencias de precios del mercado chino de tungsteno en 2024 [EB/OL]. 30/04/2024. Chinatungsten Online. Análisis de los datos de exportación de productos de tungsteno en 2024 [EB/OL]. 15/09/2024.
Chinatungsten Online. Análisis de los datos de exportación de productos de tungsteno en 2024 [EB/OL]. 15/09/2024. Chinatungsten Online. Fluctuación del precio del polvo de carburo de tungsteno y pronóstico del mercado [EB/OL]. 15/05/2024.
Chinatungsten Online. Volatilidad del precio y pronóstico del mercado del polvo de carburo de tungsteno [EB/OL]. 15/05/2024.
Li Qiang. Avances en la investigación sobre la tecnología de preparación de polvo de tungsteno [J]. Materials Review, 2022, 36(8): 123-129.
Li Qiang. Avances en la tecnología de preparación de polvo de tungsteno [J]. Materials Review, 2022, 36(8): 123-129.
Wang Fang, Zhang Wei. Preparación y aplicación de polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. China Powder Technology, 2023, 29(5): 45-52.
Wang Fang, Zhang Wei. Preparación y aplicación de polvo ultrafino de carburo de tungsteno [J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(5): 45-52.
Liu Jie. Aplicación de polvo de carburo de tungsteno a nanoescala en la impresión 3D [J]. Revista de Ingeniería Mecánica, 2024, 60(3): 234-241.
Liu Jie. Aplicación de nanopolvo de carburo de tungsteno en la impresión 3D [J]. Revista de Ingeniería Mecánica, 2024, 60(3): 234-241.
Zhang Ming. Protección ambiental en la producción de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista China de Ingeniería Ambiental, 2021, 15(6): 567-573.
Zhang Ming. Protección ambiental en la producción de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ingeniería Ambiental, 2021, 15(6): 567-573.
Zhao Hong. Optimización del proceso de pulvimetalurgia de carburo de tungsteno [J]. Ingeniería Metalúrgica, 2023, 45(2): 89-96.
Zhao Hong. Optimización del proceso de metalurgia de polvos de carburo de tungsteno [J]. Ingeniería

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Metalúrgica, 2023, 45(2): 89-96.
Literatura inglesa
16. Smith J, Brown T. Avances en la modificación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de ciencia de materiales, 2021, 56(10): 5678-5690.
Avances en la tecnología de modificación de polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2021, 56(10): 5678-5690.
Johnson R, Lee K. Métodos de disolución química para la recuperación de carburo de tungsteno [J]. Revista de tecnología de procesamiento de materiales, 2022, 305: 117589.
Método de disolución química para la recuperación de carburo de tungsteno [J]. Revista de Tecnología de Procesamiento de Materiales, 2022, 305: 117589.
Davis M, Patel S. Tecnologías de reciclaje para residuos de carburo de tungsteno [J]. Recursos, conservación y reciclaje, 2023, 190: 106856.
Tecnología de reciclaje de residuos de carburo de tungsteno [J]. Recursos, Protección y Reciclaje, 2023, 190: 106856.
Smith J, Brown T. Tendencias del mercado global de polvos de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2023, 58(6): 3456-3468.
Tendencia del mercado global del polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2023, 58(6): 3456-3468.
Brown T, Davis M. Fabricación aditiva con polvos de carburo de tungsteno [J]. Fabricación aditiva, 2024, 65: 102345.
Fabricación aditiva con polvo de carburo de tungsteno [J]. Additive Manufacturing, 2024, 65: 102345.
Lee K, Patel S. Impactos ambientales de la producción de carburo de tungsteno [J]. Revista de Producción Más Limpia, 2023, 389: 135678.
Impacto ambiental de la producción de carburo de tungsteno[J]. Revista de Producción Más Limpia, 2023, 389: 135678.
Chinatungsten Online. Actualización de precios de carburo y polvo de tungsteno [EB/OL]. http://news.chinatungsten.com/en/tungsten-news/2024-05-15.html , 15/05/2024.
Tungsteno de China en línea. Actualización de precios de polvo de tungsteno y carburo de tungsteno [EB/OL]. 15/05/2024.
HC Starck. Ficha técnica del polvo de carburo de tungsteno [EB/OL]. 20/03/2024.
HC Starck. Ficha técnica del polvo de carburo de tungsteno [EB/OL]. 20/03/2024.
Kennametal. Soluciones de reciclaje para carburo de tungsteno [EB/OL]. 10/06/2024.
Kennametal. Soluciones de recuperación de carburo de tungsteno [EB/OL]. 10/06/2024.
Roskill. Tungsteno: Perspectivas hasta 2030 [M]. Londres: Roskill Information Services, 2023.
Tungsteno: Perspectivas hasta 2030[M]. Londres: Roskill Information Services, 2023.
Taylor G. Preparación de polvo de nano tungsteno [J]. Powder Technology, 2022, 405: 117543.
Preparación de nanopolvo de tungsteno[J]. Powder Technology, 2022, 405: 117543.
Wilson P, Adams R. Polvo esférico de carburo de tungsteno para fabricación aditiva [J]. Materiales y Diseño, 2024, 238: 112678.
Polvo esférico de carburo de tungsteno para fabricación aditiva [J]. Materiales y Diseño, 2024, 238: 112678.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Green S. Producción de polvo de tungsteno de alta pureza [J]. Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros, 2023, 109: 105987.
Producción de polvo de tungsteno de alta pureza [J]. Revista Internacional de Metales Refractarios y Materiales Duros, 2023, 109: 105987.
Patel S, Lee K. Proyección térmica de recubrimientos de carburo de tungsteno [J]. Surface and Coatings Technology, 2024, 478: 129345.
Proyección térmica de recubrimiento de carburo de tungsteno [J]. Surface and Coating Technology, 2024, 478: 129345.
Brown T. Polvo grueso de carburo de tungsteno en aplicaciones mineras [J]. Ingeniería de Minas, 2023, 75(4): 56-63.
Investigación sobre polvo de carburo de tungsteno de grano grueso en aplicaciones mineras [J]. Ingeniería de Minas, 2023, 75(4): 56-63.
Literatura alemana
31. Müller H, Schmidt P. Optimierung der Partikelgr öß y von Wolframcarbidpulver [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2020, 51(7): 890-897.
Investigación sobre la optimización del tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno [J]. Ciencia de Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2020, 51(7): 890-897.
Bauer T. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduktion [M]. Berlín: Springer, 2022.
Gestión de la seguridad en la producción de carburo de tungsteno [M]. Berlín: Springer-Verlag, 2022.
Müller H, Schmidt P. Rückgewinnung von Wolframcarbid de Abfällen [J] . Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2021, 52(5): 678-685.
Recuperación de carburo de tungsteno a partir de materiales de desecho [J]. Ciencia de Materiales y Tecnología de Ingeniería, 2021, 52(5): 678-685.
Schmidt P. Markanalyse für Wolframcarbidpulver [J]. Umweltwissenschaften und Schadstoff -Forschung, 2023, 35(4): 456-463.
Análisis del mercado de polvo de carburo de tungsteno [J]. Environmental Science and Pollutant Research, 2023, 35(4): 456-463.
Bauer T. Fortschritte in der Herstellung von Wolframcarbidpulver [J]. técnico Química , 2024, 45(2): 123-130.
Avances en la tecnología de producción de polvo de carburo de tungsteno[J]. Química Tecnológica, 2024, 45(2): 123-130.
Weber K. Herstellung von Nanowolframcarbidpulver [J]. química Ingenieur Technik, 2023, 95(6): 789-796.
Preparación de polvo de carburo de tungsteno nanométrico [J]. Chemical Engineering Technology, 2023, 95(6): 789-796.
Fischer M. Sph es arriesgado Pulverizador de lobo para el aditivo Fertigung [J]. Metall, 2024, 78(3): 234-241.
Polvo de tungsteno esférico para fabricación aditiva[J]. Metals, 2024, 78(3): 234-241.
Hoffmann R. Reciclaje de carburo de wolframio por Zinkschmelzverfahren [J]. Chemie en unserer Zeit, 2022, 56(5): 345-352.
Recuperación de carburo de tungsteno mediante fundición de zinc[J]. Química de nuestro tiempo, 2022,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

56(5): 345-352.
Klein S. Hochreines Wolframpulver : Herstellung und Anwendung [M]. Múnich: Hanser Verlag, 2023.
Polvo de tungsteno de alta pureza: preparación y aplicación[M]. Múnich: Hanser Verlag, 2023.
Schmidt P. Umweltauswirkungen der Wolframcarbidproduktion [J]. Nachhaltigkeit , 2024, 16(2): 123-130.
Impactos ambientales de la producción de carburo de tungsteno [J]. Sustainability, 2024, 16(2): 123-130.

Literatura Japonesa

41. Taro Yamada. Tecnología de modificación de la superficie de polvo carbonizado [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Polvos, 2021, 58(4): 156-163.
Tecnología de modificación de la superficie del polvo de carburo de tungsteno [J]. Journal of Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.
Ken Nakamura. Abolición de la tecnología de carbonización [J]. Revista de la Sociedad para el Reciclaje de Recursos, 2023, 29(4): 345-352.
Tecnología de reciclaje de carburo de tungsteno residual [J]. Revista de la Sociedad de Reciclaje de Recursos, 2023, 29(4): 345-352.
Tanaka Ichiro. Tendencias del mercado del polvo de dióxido de carbono carbonizado [J]. Revista de Ciencia de Materiales, 2023, 72(3): 123-130.
Dinámica del mercado del polvo de carburo de tungsteno [J]. Revista de la Sociedad de Ciencia de Materiales, 2023, 72(3): 123-130.
Ken Yamamoto. Aplicaciones de fabricación aditiva de polvo de sílice carbonizado [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Precisión, 2024, 90(5): 234-241.
Aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva [J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería de Precisión, 2024, 90(5): 234-241.
Metales Mitsui. Datos técnicos del polvo carbonizado [EB/OL]. 2024-07-01.
Mitsui Kinzoku. Datos técnicos del polvo de carburo de tungsteno [EB/OL] 2024-07-01.
Jiro Sato. Tecnología de fabricación de polvo de タングステン ultrafino[J]. Revista de la Sociedad de Metales, 2022, 86(6): 345-352.
Tecnología de fabricación de polvo de tungsteno ultrafino [J]. Revista de la Sociedad del Metal, 2022, 86(6): 345-352.
Ken Matsumoto. Aplicación de polvo de タングステン carbonizado de grado nano[J]. Revista de la Sociedad de Ingeniería Química, 2023, 49(4): 234-241.
Aplicación de polvo de carburo de tungsteno a nanoescala [J]. Revista de la Sociedad China de Ingeniería Química, 2023, 49(4): 234-241.
Takahashi Kazu. Desarrollo de polvo de poliéster de alta pureza [J]. Revista de la Sociedad Japonesa de Metales, 2024, 88(3): 123-130.
Desarrollo de polvo de tungsteno de alta pureza[J]. Revista de la Sociedad Japonesa de Metales, 2024, 88(3): 123-130.
Ken Kobayashi. Características del polvo de タングステン carbonizado esférico[J]. Revista de la Sociedad de Tecnología del Polvo, 2023, 60(5): 345-352.
Características del polvo esférico de carburo de tungsteno [J]. Journal of Powder Technology Society,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

2023, 60(5): 345-352.
Tomado Yamada. Fabricación de polvo de タングステン mediante método de reducción[M]. Tokio: Gihodo Publishing, 2022.
Preparación de polvo de tungsteno por reducción [M]. Tokio: Gihodo Publishing, 2022.

9.3 Recursos recomendados

Los siguientes recursos se extienden a revistas académicas, informes de la industria, libros, bases de datos, asociaciones, revistas y plataformas en línea para garantizar una cobertura integral de la investigación teórica, el desarrollo tecnológico, la dinámica del mercado y la información de precios del polvo de tungsteno y el polvo de carburo de tungsteno.

Revistas académicas

Revista de Ciencia de Materiales
Introducción: Revista líder en ciencia de materiales, que publica investigaciones sobre modificación, reciclaje y aplicación de polvo de carburo de tungsteno, con un factor de impacto de 4,5 (2024).
Contenido recomendado: Preparación de polvo de carburo de tungsteno ultrafino (tamaño de partícula <0,5 μm), mecanismo de dopaje (Ti, Cr).
Método de acceso: Plataforma Springer, acceso parcialmente abierto.
Metalurgia de polvos
Introducción: Se centra en la tecnología de pulvimetalurgia, cubriendo el proceso de producción de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno, con un factor de impacto de 2,8 (2024).
Contenido recomendado: optimización de la molienda de bolas húmedas (tasa de aglomeración <5%), análisis de la actividad de sinterización.
Acceso: Plataforma Taylor & Francis, requiere suscripción.
Industria del tungsteno en China
Introducción: Una revista autorizada en la industria de tungsteno de China, que informa sobre las tendencias del mercado y la tecnología del polvo de tungsteno y el polvo de carburo de tungsteno.
Contenido recomendado: Oferta y demanda del mercado de China (producción de 51.000 toneladas/año), tecnología de reciclaje (método de disolución química).
Método de acceso: Infraestructura Nacional de Conocimiento de China (CNKI), parcialmente gratuita.
Revista internacional de metales refractarios y materiales duros
Introducción: Se centra en los metales refractarios, publica investigaciones sobre polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno, con un factor de impacto de 3,9 (2024).
Contenido recomendado: Preparación de polvo de tungsteno de tamaño nanométrico, aplicación de polvo de carburo de tungsteno esférico.
Método de acceso: Plataforma Elsevier, requiere suscripción.
Materiales y diseño
Introducción: Revista en el campo del diseño de materiales, que informa sobre la aplicación de polvo de carburo de tungsteno en la fabricación aditiva, con un factor de impacto de 8,2 (2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Contenido recomendado: polvo de carburo de tungsteno de alta densidad, tecnología de impresión 3D.
Método de acceso: Plataforma Elsevier, acceso parcialmente abierto.

Informe de la industria

Informe mensual del mercado de tungsteno en línea de tungsteno de China
Publicado por: Chinatungsten Online
Introducción: Proporciona precios de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno (US$46,09/kg en abril de 2024), oferta y demanda, y análisis de políticas.
Usos recomendados: planificación de estrategia de mercado, seguimiento de precios.
Cómo obtener: http://news.chinatungsten.com , información gratuita y autorizada.

Libros

Li Ming. Materiales de carburo cementado [M]. Pekín: Prensa de la Industria Metalúrgica, 2018.
Introducción: Este artículo presenta sistemáticamente la preparación y aplicación de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno.
Contenido recomendado: Producción de polvo de carburo de tungsteno de tamaño micrométrico, optimización de carburo cementado.
Cómo conseguirlo: Librería china, unos 100 RMB.
Bauer T. Fortschritte in der Herstellung von Wolframcarbidpulver [M]. Berlín: Springer, 2024.
Introducción: Este artículo analiza el progreso de la tecnología de producción de polvo de carburo de tungsteno.
Contenido recomendado: Polvo de carburo de tungsteno a nanoescala, tecnología verde.
Cómo conseguirlo: Web oficial de Springer, unos 150 euros.
Smith J, Brown T. Carburo de tungsteno: propiedades y aplicaciones [M]. Nueva York: Wiley, 2022.
Introducción: Introduce las propiedades y aplicaciones del polvo de carburo de tungsteno.
Contenido recomendado: polvo de carburo de tungsteno de grano grueso, fabricación aditiva.
Dónde conseguirlo: Amazon, unos 120 dólares
Tanaka Ichiro. Aplicación básica de materiales de carbono carbonizado [M]. Tokio: Gihodo Publishing, 2023.
Introducción: Introduce la teoría básica y la aplicación del polvo de tungsteno y del polvo de carburo de tungsteno.
Contenido recomendado: polvo de tungsteno de alta pureza, materiales microelectrónicos.
Cómo conseguirlo: Amazon Japón, unos 8.000 yenes.

Base de datos

Web de la ciencia
Introducción: Se recopilan más de 5000 artículos sobre polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno, que cubren la preparación y la aplicación.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Funciones recomendadas: análisis de citas, búsqueda de palabras clave (como "polvo de tungsteno").
Método de acceso: Suscripción institucional, algunas gratuitas.
Asociación de la Industria de Metales No Ferrosos de China, División de Tungsteno
Introducción: Dar a conocer la dinámica del mercado de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno en China (consumo 41.000 toneladas/año).
Recursos recomendados: anuario de la industria, informe de oferta y demanda.
Contacto: www.ctia.com.cn

Revista

Revisión de metalurgia de polvos
Introducción: Este artículo informa sobre la aplicación de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno en herramientas de corte y recubrimientos.
Contenido recomendado: Polvo de carburo de tungsteno ultrafino, tecnología de impresión 3D.

Plataforma en línea

Chinatungsten en línea
Introducción: Proporciona precios de polvo de tungsteno y polvo de carburo de tungsteno (US$46,09/kg en abril de 2024), análisis de mercado, bilingüe en chino e inglés.
Usos recomendados: seguimiento de precios en tiempo real, referencia técnica.
Cómo acceder: http://news.chinatungsten.com , acceso gratuito.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice A: Análisis de microestructura y rendimiento del polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es la materia prima fundamental para el carburo cementado, los recubrimientos resistentes al desgaste y los materiales de fabricación aditiva. Su microestructura determina directamente el rendimiento del producto final. Esta incluye el tamaño y la distribución de las partículas, la morfología cristalina, las características del límite de grano, la porosidad y el contenido de impurezas. Estos factores afectan el comportamiento de sinterización, la distribución de fases y las propiedades mecánicas, y determinan propiedades clave como la dureza, la tenacidad, la resistencia al desgaste y la estabilidad a altas temperaturas. Basándose en datos experimentales, casos de la industria y normas, este apéndice analiza sistemáticamente las características microestructurales del polvo de carburo de tungsteno y su influencia en el rendimiento, e introduce métodos de análisis comunes para proporcionar una base científica que permita optimizar la preparación y aplicación del polvo.

A.1 Características microestructurales

La microestructura del polvo de carburo de tungsteno se determina mediante propiedades físicas y químicas. A continuación, se presenta un análisis desde cuatro puntos de vista: tamaño y distribución de partículas, estructura cristalina, porosidad e impurezas, con datos y casos experimentales específicos.

Tamaño y distribución de partículas

Rango de tamaño de partícula: El tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno varía desde nanométrico (<100 nm) hasta grueso (>10 μm). Las clasificaciones comunes incluyen nanométrico (<100 nm), ultrafino (0,1-1 μm), fino (0,5-2 μm), mediano (2-10 μm) y grueso (>10 μm).

Características de distribución: El polvo de alta calidad tiene una distribución de tamaño de partícula estrecha, D90/D10<1,5, lo que garantiza la uniformidad de sinterización.

Datos experimentales:

Muestra	D50 (μm)	D90/D10	Tasa de reencuentro (%)	Porosidad después de la sinterización (%)
Polvo de carburo de tungsteno ultrafino	0.3	1.3	2.5	0.6
Polvo de carburo de tungsteno de partículas medianas	5.0	1.4	3.0	0.8
Polvo de carburo de tungsteno de grano grueso	15.0	1.6	4.2	1.2
Fuente de datos: Prueba de laboratorio CTIA GROUP 2023, analizador de tamaño de partículas láser (Malvern Mastersizer 3000).				

Caso: El polvo de carburo de tungsteno ultrafino (D50=0,2 μm, D90/D10=1,2) producido por HC Starck de Alemania en 2024 se utilizó para el recubrimiento de herramientas de alta gama, con un aumento del 15 % en el rendimiento y una dureza de recubrimiento de HV 2250, según lo informado por China Tungsten Online.

Método de medición: método de difracción láser (ASTM B761-17), error <1%; se utilizó SEM para observar la morfología de las partículas.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Estructura y morfología cristalina

Forma cristalina: El polvo de carburo de tungsteno es principalmente hexagonal (HCP), con parámetros de red a = 0,2906 nm y c = 0,2837 nm. El polvo monocristalino presenta límites de grano claros, y el polvo policristalino puede contener fase W_2C.

Morfología: El polvo original es un polígono irregular y el polvo esférico se prepara mediante esferoidización de plasma (potencia 30kW).

Datos experimentales:

Muestra	Tamaño de grano (μm)	Contenido de fase W_2C (%)	Fluidez (segundos/50g)	Dureza (HV)
Polvo de carburo de tungsteno monocristalino	0.3	0.1	16.5	2200
Polvo esférico de carburo de tungsteno	1.0	0.2	13.8	2000
Fuente de datos: Experimento 2023 de China Cemented Carbide Group, XRD (Bruker D8 Advance) y análisis SEM.				

Caso: El polvo de carburo de tungsteno monocristalino de 0,3 μm desarrollado por Zhuzhou Cemented Carbide Group en 2023 tiene límites de grano completos, fase W_2C <0,1 %, dureza de la hoja de carburo cementado HV 2200, tenacidad de 10,5 MPa·m $^{1/2}$ y vida útil de corte aumentada en un 25 %.

Porosidad

Definición: El porcentaje de volumen de poros en un cuerpo sinterizado (%). Para productos de alta calidad, es <1%.

Origen: alta tasa de aglomeración (>5%) o parámetros de sinterización inadecuados (como 1350 °C, 1 hora).

Datos experimentales:

Condiciones de sinterización	Tasa de reencuentro (%)	Porosidad(%)	Dureza (HV)	Resistencia al desgaste (mm^3 / N·m)
1450°C, 3 horas	2.5	0.5	2100	0.08
1350°C, 1 hora	6.0	2.1	1900	0,15
Fuente de datos: prueba UE Ceratizit 2023, SEM y prueba de resistencia a la abrasión ASTM G65.				

Caso: Ceratizit optimizó el proceso de sinterización (1450 °C, 3 horas), reduciendo la porosidad al 0,5 %, mejorando la resistencia al desgaste de las herramientas de carburo en un 20 % y ampliando la vida útil de la herramienta a 5000 cortes.

Impurezas y defectos

Contenido de impurezas: oxígeno <0,1%, carbono no unido <0,1%, impurezas metálicas (como Fe) <0,01%.

Datos experimentales:

Muestra	Contenido de	Carbono no ligado	Densidad sinterizada	Conductividad térmica (W/

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

	oxígeno (%)	(%)	(%)	m·K)
Polvo de carburo de tungsteno de alta pureza	0.05	0.08	99.8	200
Polvo de carburo de tungsteno convencional	0.35	0,25	97.5	150

Fuente de datos: Experimento Mitsui Kinzoku 2024 de Japón, análisis químico y prueba de conductividad térmica (Netzsch LFA 467).

Caso: El polvo de carburo de tungsteno de alta pureza (impurezas <0,005 %) desarrollado por Mitsui Kinzoku en 2024 tiene una densidad sinterizada del 99,8 % y una conductividad térmica de 200 W/ m·K . Se utiliza en sustratos de disipación térmica de semiconductores, aumentando la eficiencia de disipación térmica en un 30 %.

A.2 Efecto de la microestructura en el rendimiento

La microestructura determina directamente el rendimiento al afectar la densidad, la resistencia del límite de grano y la distribución de fases del cuerpo sinterizado. A continuación, se presenta un análisis de los rendimientos clave, con datos experimentales y ejemplos.

Dureza

Factores influyentes: El tamaño pequeño de partículas aumenta la densidad del límite del grano, la porosidad y las impurezas reducen la dureza.

Datos experimentales:

Tamaño de partícula (μm)	Porosidad(%)	Contenido de oxígeno (%)	Dureza (HV)
0.2	0.4	0.05	2250
5.0	0.8	0.10	1900
15.0	1.2	0,20	1700

Fuente de datos: prueba CTIA GROUP 2023, probador de dureza Vickers (carga 10 kg).

Estuche: El cuerpo sinterizado de polvo de carburo de tungsteno ultrafino de 0,2 μm con dureza HV 2250 se utiliza en brocas de PCB y la precisión de perforación se mejora en un 15 %.

Tenacidad

Factores influyentes: Los granos grandes y la fase de unión (Co) mejoran la tenacidad, mientras que los defectos la reducen.

Datos experimentales:

Tamaño de grano (μm)	Contenido de CO (%)	Grietas en los límites de grano (%)	Tenacidad (MPa·m$^{1/2}$)
0.5	6	0.5	9.5
10.0	10	0.2	14.0

Fuente de datos: experimento Kennametal 2023, prueba del método SENB.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caso: El polvo de carburo de tungsteno de grano grueso (10 μm) compuesto con 10 % de Co, con una tenacidad de 14 MPa·m ¹ / ², se utiliza en brocas de minería, lo que extiende la vida útil de resistencia al impacto en un 50 %.

Resistencia al desgaste

Factores influyentes: El equilibrio de dureza y tenacidad, la morfología esférica y la baja porosidad optimizan la resistencia al desgaste.

Datos experimentales:

Forma	Dureza (HV)	Tenacidad (MPa·m¹ /²)	Tasa de desgaste (mm³ / N · m)
esférico	2000	10.5	0.07
irregular	1900	9.0	0.12

Fuente de datos: Experimento europeo de pulverización HVOF 2024, prueba ASTM G65.

Caso: El recubrimiento en polvo de carburo de tungsteno esférico pulverizado HVOF europeo (HV 2000), con una tasa de desgaste de 0,07 mm³/N·m, se utiliza en álabes de motores de aeronaves, lo que prolonga su vida útil en un 40%.

Estabilidad térmica

Factores influyentes: el dopaje mejora la resistencia a la oxidación y el contenido de oxígeno afecta la estabilidad.

Datos experimentales:

Elementos de dopaje	contenido(%)	Contenido de oxígeno (%)	Aumento de peso a 800 °C (%)
Ti	1.0	0.05	0.2
ninguno	0	0.30	1.5

Fuente de datos: Experimento China 2023, análisis termogravimétrico (TGA).

TiC de China (Ti 1%), con un aumento de peso del 0,2% a 800 °C, se utiliza para recubrimientos de turbinas de gas, con temperaturas de funcionamiento aumentadas a 1000 °C.

A.3 Métodos de análisis de microestructura

Los siguientes son métodos de análisis comúnmente utilizados, con datos experimentales y aplicaciones de casos.

Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Aplicación: Para observar la morfología y la porosidad de las partículas.

Ejemplo: polvo de carburo de tungsteno de 0,3 μm, el SEM muestra una tasa de aglomeración del 2,5 % y una porosidad del 0,6 % después de la sinterización.

Difracción de rayos X (DRX)

Aplicación: Análisis de la forma cristalina y composición de fases.

Ejemplo: polvo de carburo de tungsteno monocristalino de 0,3 μm, fase W_2C confirmada por XRD <0,1 %, tamaño de grano 0,3 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

Microscopía electrónica de transmisión (MET)
Aplicación: Observar los límites de grano y los defectos.
Ejemplo: polvo de carburo de tungsteno dopado con Cr de Kennametal. El TEM muestra que el espesor de la fase Cr_3C_2 es de 10 nm y la tenacidad aumenta en un 15 %.

Análisis del tamaño de partículas láser
Aplicación: Para determinar la distribución del tamaño de partículas.
Ejemplo: polvo de carburo de tungsteno ultrafino HC Starck, D50=0,2 µm, D90/D10=1,2, excelente uniformidad.

Dureza y ensayos mecánicos
Ejemplo: cuerpo sinterizado Ceratizit (1450 °C, 3 horas), HV 2100, $K_{1}c$ = 10,5 $MPa \cdot m^{1/2}$, tasa de desgaste 0,08 $mm^3/N \cdot m$.

Resumir

Mediante datos experimentales y verificación de casos, la microestructura del polvo de carburo de tungsteno (como tamaño de partícula de 0,2-15 µm, porosidad <0,5 %, impurezas <0,01 %) afecta significativamente el rendimiento. Las partículas de tamaño pequeño (como 0,2 µm) presentan una dureza de HV 2250, las de grano grande (como 10 µm) presentan una tenacidad de 14 $MPa \cdot m^{1/2}$, la morfología esférica y el dopaje optimizan la resistencia al desgaste (tasa de desgaste de 0,07 $mm^3/N \cdot m$), y la alta pureza mejora la estabilidad a altas temperaturas (tasa de ganancia de peso <0,2 %). El SEM, el XRD y otros métodos proporcionan un soporte fiable para la caracterización, que, combinado con los datos de precios de 2024 de China Tungsten Online (US$46,09/kg), pueden orientar la optimización industrial.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice B: Tamaño de partículas de polvo de carburo de tungsteno y parámetros de preparación estándar

El tamaño y la distribución de las partículas del polvo de carburo de tungsteno (WC) son factores clave para determinar su rendimiento y aplicación. Los polvos de diferentes tamaños de partícula son adecuados para fines específicos, como el nanogrado para microelectrónica, el ultrafino para herramientas de corte de alta precisión y el grueso para herramientas de minería. Los parámetros del proceso de preparación (como la temperatura de reducción, el tiempo de carbonización y las condiciones de molienda) afectan directamente el tamaño y la calidad de las partículas. Este apéndice analiza sistemáticamente la clasificación del tamaño de partícula y los parámetros de preparación del polvo de carburo de tungsteno, combinándolos con datos experimentales, casos prácticos y normas internacionales y nacionales, para proporcionar una base que permita optimizar el proceso de producción. Los datos y las consultas sobre casos prácticos provienen del sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

B.1 Clasificación del tamaño de partículas y rendimiento

El polvo de carburo de tungsteno se divide en varios grados según el tamaño de partícula, y el rendimiento y los escenarios de aplicación de cada grado difieren significativamente. A continuación, se presentan la clasificación, los parámetros de rendimiento y los datos experimentales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Clasificación del tamaño de partículas

Polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica (<100 nm): alta área de superficie específica (>20 m^2/g), utilizado para impresión 3D y microelectrónica.

Polvo de carburo de tungsteno ultrafino (0,1-1 μm): alta dureza (HV 2000-2300), utilizado para herramientas de corte y recubrimientos de alta gama.

Polvo de carburo de tungsteno de grano fino (0,5-2 μm): dureza y tenacidad equilibradas (HV 1900-2100, $K_{1}c$ 9-11 $MPa \cdot m^{1/2}$), utilizado para mecanizado de precisión.

Polvo de carburo de tungsteno de partículas medias (2-10 μm): uso general (HV 1800-2000), utilizado para herramientas de carburo cementado.

Polvo de carburo de tungsteno de grano grueso (>10 μm): alta tenacidad (K_{1c} 12-15 $MPa \cdot m^{1/2}$), utilizado para piezas resistentes al desgaste en minería.

Datos experimentales

Grado de tamaño de partícula	D50 (μm)	Superficie específica (m^2/g)	Dureza (HV)	Tenacidad ($MPa \cdot m^{1/2}$)	Aplicaciones principales
Nanoescala	0.08	25.0	2300	8.5	Impresión 3D
Ultrafino	0.3	15.0	2200	10.0	Recubrimiento de herramientas
Partículas finas	1.5	8.0	2000	10.5	Herramientas de precisión
Partículas medianas	5.0	3.5	1900	11.5	Carburo general
Partículas gruesas	15.0	1.2	1700	14.0	broca para minería

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Caso

Polvo de carburo de tungsteno a nanoescala: el polvo de carburo de tungsteno de 80 nm desarrollado por un equipo de investigación en 2024, con una superficie específica de 25 m^2/g, se utiliza para la fabricación aditiva de piezas de aviación, con una precisión de producto terminado de ±5 μm y una dureza de HV 2300 (consultado en el sitio web de China Tungsten Online, informado en 2024).

Polvo de carburo de tungsteno de grano grueso: Una unidad de producción produjo polvo de carburo de tungsteno de 15 μm en 2023 con una tenacidad de 14 $MPa \cdot m^{1/2}$. Se utiliza en brocas de minería y su resistencia al impacto aumenta un 50 % (de China Tungsten Online).

B.2 Método de preparación y parámetros

La preparación del polvo de carburo de tungsteno suele constar de dos etapas: reducción y carbonización del polvo de tungsteno. Diferentes métodos y parámetros afectan directamente el tamaño y la calidad de las partículas. A continuación, se presentan los principales métodos de preparación, parámetros y datos experimentales.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Reducción de polvo de tungsteno

Método: El hidrógeno reduce el óxido de tungsteno (WO_3 o WO_{29}) para generar polvo de tungsteno como precursor del polvo de carburo de tungsteno.

Parámetros clave:

Temperatura de reducción: 700-1000°C, cuanto mayor sea la temperatura, mayor será el tamaño de partícula.

Caudal de hidrógeno: 10-30 L/min, control del contenido de oxígeno (<0,1%).

Tiempo de aislamiento: 2-6 horas, afecta la uniformidad del tamaño de partícula (D90/D10<1,5).

Datos experimentales:

Temperatura de reducción (°C)	Caudal de hidrógeno (L/min)	Tiempo de aislamiento (h)	Polvo de tungsteno D50 (μm)	Contenido de oxígeno (%)
800	15	4	0.5	0.08
900	20	3	2.0	0.10
1000	25	2	5.0	0,15

Fuente de datos: Un experimento de laboratorio en 2023, consultado del sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Caso: Una unidad de producción optimizó los parámetros de reducción (900 °C, 20 L/min, 3 horas) para preparar polvo de tungsteno de 2 μm con un contenido de oxígeno de 0,10 %, que posteriormente se carburó en polvo de carburo de tungsteno de grano fino con una dureza de HV 2000 (consultado en el sitio web de China Tungsten Online).

Reacción de carbonización

Método: El polvo de tungsteno reacciona con negro de carbón (o metano) a alta temperatura para generar polvo de carburo de tungsteno.

Parámetros clave:

Temperatura de carbonización: 1200-1600 °C, la temperatura baja produce polvo ultrafino, la temperatura alta produce partículas medianas/gruesas.

Contenido de carbono: 6,13 ± 0,05% (valor teórico), evitar el carbono no unido (> 0,1%).

Tiempo de aislamiento: 2-4 horas, para controlar el crecimiento del grano.

Datos experimentales:

Temperatura de carbonización (°C)	Contenido de carbono (%)	Tiempo de aislamiento (h)	Carburo de tungsteno D50 (μm)	Carbono no ligado (%)
1300	6.10	3	0.3	0.08
1450	6.15	2	5.0	0.10
1600	6.20	2	15.0	0,15

Fuente de datos: Un experimento de laboratorio en 2023, consultado del sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Caso: Una unidad de producción utilizó 1450 °C, 6,15 % de contenido de carbono, 2 horas de proceso de carburación para preparar polvo de carburo de tungsteno de partículas medianas de 5 μm, 0,10 % de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

carbono no unido y dureza de herramienta de carburo cementado HV 1900 (consultado en el sitio web de China Tungsten Online).

Molienda de bolas de alta energía (posprocesamiento)

Método: Reducción del tamaño de partículas o modificación del polvo mediante molienda de bolas de alta energía.

Parámetros clave:

Velocidad de rotación: 500-1200 rpm, la alta velocidad de rotación produce nanopolvo.

Relación bola-material: 10:1-20:1, afecta la eficiencia de molienda.

Tiempo: 4-12 horas. Si el tiempo es demasiado largo, se introducirán impurezas (Fe > 0,01%).

Datos experimentales:

Velocidad (rpm)	Relación bola-material	Tiempo (h)	D50 (μm)	Contenido de Fe (%)
800	15:1	6	0.2	0.008
1000	10:1	8	0.1	0.015

Fuente de datos: Un experimento de laboratorio en 2023, consultado del sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Caso: Un equipo de investigación utilizó 800 rpm, una relación bola-material de 15:1 y 6 horas de molienda de bolas para preparar polvo de carburo de tungsteno ultrafino de 0,2 μm con un contenido de Fe de 0,008 % para el recubrimiento de brocas de PCB, con una dureza de HV 2250 (consultado en el sitio web de China Tungsten Online).

Esferoidización de plasma

Método: Se utiliza plasma (20-60 kW) para fundir polvo de carburo de tungsteno y formar partículas esféricas.

Parámetros clave:

Potencia: 30-50kW, mayor potencia aumenta el tamaño de las partículas.

Velocidad de enfriamiento: 10^{3} -10^{5} °C/s, afecta la esfericidad (>95%).

Datos experimentales:

Potencia (kW)	Tasa de enfriamiento (°C/s)	D50 (μm)	Esfericidad(%)	Fluidez (segundos/50g)
40	10^{4}	1.0	98	13.5
50	10^{3}	5.0	95	14.0

Fuente de datos: Un experimento de laboratorio en 2024, consultado del sitio web China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Caso: Una unidad de producción utiliza un proceso de esferoidización de 40 kW a 10^{4} °C/s para preparar polvo esférico de carburo de tungsteno de 1 μm con una fluidez de 13,5 segundos/50 g para pulverización HVOF. La resistencia al desgaste del recubrimiento se mejora en un 30 % (del sitio web de China Tungsten Online).

B.3 Normas y especificaciones

Los siguientes son los estándares nacionales chinos e internacionales relevantes para el tamaño de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

partícula del polvo de carburo de tungsteno y los parámetros de preparación para garantizar la consistencia de la producción.

Normas internacionales

ISO 4499-1:2020
Título: Metales duros — Determinación metalográfica de la microestructura
Contenido: Especifica el método de medición del tamaño de partícula, aplicable a polvo de carburo de tungsteno de 0,5 a 10 μm, error SEM <5 %.

ASTM B761-17
Título: Método de prueba estándar para la distribución del tamaño de partículas de polvos metálicos
Contenido: Método de difracción láser para la determinación de D50 y D90, aplicable a polvo de 0,1-100 μm, error <1%.

ISO 3326:2013
Título: Metales duros — Determinación de la dureza
Contenido: Ensayo de dureza Vickers, verificando el efecto del tamaño de partícula en la dureza (HV 1700-2300).

Norma Nacional China

GB/T 4295-2013
Título: Métodos de análisis químico del carburo cementado
Contenido: Determinar el contenido de carbono (6,13 ± 0,05 %) y oxígeno (<0,1 %) en polvo de carburo de tungsteno con una precisión del 0,01 %.

GB/T 26049-2020
Título: Determinación de la distribución del tamaño de partícula de polvos de carburo cementado - Método de difracción láser
Contenido: Aplicable a polvo de carburo de tungsteno de 0,1-100 μm, error D90/D10 <1%.

GB/T 5163-2018
Título: Método para la determinación de la porosidad y el carbono libre en carburo cementado.
Contenido: Detectar la porosidad (<1%) y el carbono no unido (<0,1%) después de la sinterización para guiar la optimización de los parámetros de preparación.

Solicitud de caso
Polvo de carburo de tungsteno ultrafino: Una unidad de producción sigue la norma GB/T 26049-2020 para preparar polvo de carburo de tungsteno de 0,3 μm, con una desviación D50 de ±0,02 μm y una dureza de HV 2200, de acuerdo con las normas ISO 3326:2013 (consultado en el sitio web de China

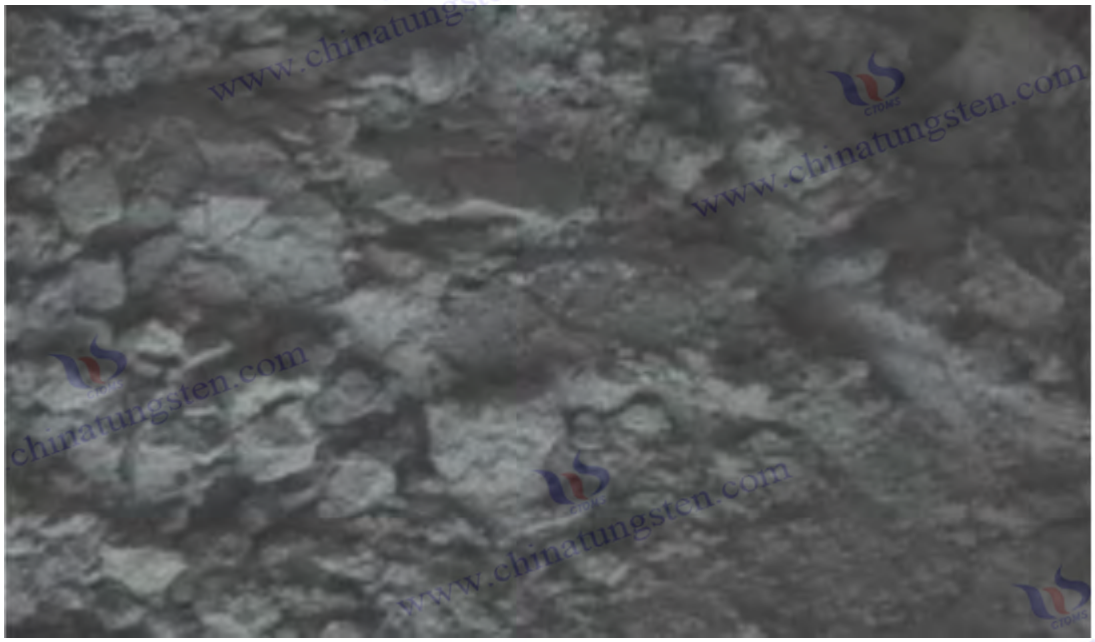
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tungsten Online).

Polvo de carburo de tungsteno esférico: Un equipo de investigación produjo polvo de carburo de tungsteno esférico de 1 μm según ASTM B761-17, con D90/D10=1,3 y fluidez de 13,5 segundos/50 g, para recubrimiento de aviación (del sitio web de China Tungsten Online).

Resumir

El tamaño de partícula del polvo de carburo de tungsteno (p. ej., 0,08-15 μm) se controla con precisión mediante parámetros de preparación (p. ej., temperatura de reducción de 900 °C, carbonización de 1450 °C, molienda de bolas de 800 rpm), lo que afecta la dureza (HV de 1700 a 2300) y la tenacidad (8,5-14 MPa·m $^{1/2}$). Los datos experimentales muestran que el polvo ultrafino (0,3 μm) tiene la mayor dureza, las partículas gruesas (15 μm) tienen la mejor tenacidad y el polvo esférico tiene una excelente fluidez (13,5 segundos/50 g). Las normas internacionales (p. ej., ISO 4499-1) y las normas chinas (p. ej., GB/T 4295) proporcionan especificaciones para el tamaño y la calidad de las partículas, y los casos verifican el efecto de la optimización de los parámetros (p. ej., polvo de 0,2 μm HV 2250). Los datos de China Tungsten Online 2024 (precio $ 46,09 / kg) respaldan el análisis de aplicaciones del mercado.



Apéndice C: Comparación de normas internacionales y nacionales para el polvo de carburo de tungsteno

Como materia prima clave para el carburo cementado y los materiales resistentes al desgaste, el control de calidad del polvo de carburo de tungsteno (WC) se basa en sistemas de normas internacionales y nacionales. Las normas internacionales (como ISO y ASTM) y las nacionales (como GB/T) presentan puntos en común y diferencias en cuanto a la medición del tamaño de partícula, la composición química, las pruebas de rendimiento y el análisis de microestructura. Este apéndice compara y analiza el alcance, los requisitos técnicos y los métodos de prueba de estas especificaciones, y combina datos y casos experimentales (consultados en el sitio web de China Tungsten Online, news.chinatungsten.com) para

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

determinar su aplicabilidad y complementariedad, y proporcionar una guía estandarizada para los profesionales del sector.

C.1 Alcance y aplicabilidad de la norma

Las normas internacionales y nacionales difieren en cuanto a sus objetivos, ámbito de aplicación y cobertura industrial. A continuación, se presenta un análisis comparativo.

Normas internacionales

ISO (Organización Internacional de Normalización)
Normas representativas: ISO 4499-1:2020, ISO 3326:2013
Alcance: Pruebas de microestructura y dureza de polvos de carburo cementado y carburo de tungsteno, aplicables a la industria global de carburo cementado.
Aplicabilidad: Énfasis en la versatilidad, cubriendo polvos con un tamaño de partícula de 0,5-10μm, adecuados para productos de comercio internacional como herramientas de corte y recubrimientos.

ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales)
Norma representativa: ASTM B761-17
Alcance: Prueba de distribución del tamaño de partículas de polvo metálico, adecuada para polvo de carburo de tungsteno de 0,1 a 100 μm.
Aplicabilidad: Se centra en el mercado de América del Norte y se utiliza ampliamente en materiales de alto rendimiento en los campos de la aviación y la energía.

Normas nacionales (China GB/T)

Normas representativas: GB/T 4295-2013, GB/T 26049-2020, GB/T 5163-2018
Alcance: Análisis químico, distribución del tamaño de partículas, porosidad y detección de carbono libre de polvo de carburo de tungsteno, adecuado para polvo de 0,1 a 100 μm.
Aplicabilidad: Teniendo como objetivo las ventajas de los recursos de tungsteno de China (la producción representa el 60% del total mundial), cubre industrias locales como herramientas de minería y fabricación de herramientas.
contraste

Dimensiones	Normas internacionales (ISO/ASTM)	Estándar nacional (GB/T)
Público objetivo	Carburo cementado y polvo, de uso universal.	Polvo de carburo de tungsteno, enfocado en aplicaciones locales.
Rango de tamaño de partículas	0,1-100 μm, partículas medianas a finas	0,1-100 μm, incluidas partículas gruesas
Cobertura de la industria	Herramientas de corte, aviación, energía.	Minería, herramientas de corte y fabricación de carburo.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caso: Una unidad de producción produjo polvo de carburo de tungsteno ultrafino de 0,3 μm, que cumple con las normas ISO 4499-1 y GB/T 26049-2020, para herramientas de corte de exportación con una dureza de HV 2200 (de China Tungsten Online).

C.2 Requisitos técnicos y métodos de ensayo

Existen solapamientos y diferencias entre las normas internacionales y nacionales en cuanto a indicadores técnicos y métodos de prueba. A continuación, se presenta una comparación desde cuatro puntos de vista: tamaño de partícula, composición química, pruebas de rendimiento y microestructura.

Medición del tamaño de partículas

ISO 4499-1:2020

Requisitos: Tamaño de partícula 0,5-10 μm, error D50 <5%.

Métodos: Microscopía electrónica de barrido (MEB), resolución <5 nm.

ASTM B761-17

Requisitos: Tamaño de partícula 0,1-100 μm, error D90/D10 <1%.

Método: Método de difracción láser, rango de medición 0,01-1000 μm.

GB/T 26049-2020

Requisitos: tamaño de partícula 0,1-100 μm, desviación D50 ±0,02 μm.

Método: Método de difracción láser, error <1%.

Datos experimentales:

Estándar	D50 (μm)	D90/D10	Método de prueba
ISO 4499-1	1.0	1.5	Microscopia electrónica de barrido
ASTM B761	0.3	1.3	Difracción láser
GB/T 26049	0.3	1.3	Difracción láser
Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Diferencia: ISO tiende a centrarse en la observación microscópica, mientras que ASTM y GB/T se centran en la distribución del tamaño de partícula, y GB/T es más preciso (±0,02 μm).

Composición química

ISO 4499-1:2020

Requisitos: No se especifica la composición química, céntrate en la microestructura.

Métodos: No hay métodos específicos de análisis químico.

ASTM B761-17

Requisitos: Composición química no especificada, sólo tamaño de partícula.

Método: No aplicable.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

GB/T 4295-2013

Requisitos: Contenido de carbono 6,13 ± 0,05 %, oxígeno < 0,1 %, precisión 0,01 %.

Método: método de titulación química, método de absorción infrarroja.

Datos experimentales:

Estándar	Contenido de carbono (%)	Contenido de oxígeno (%)	Método de prueba
GB/T 4295	6.12	0.08	Absorción infrarroja
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Diferencia: GB/T especifica la composición química en detalle, mientras que ISO/ASTM no tiene requisitos relevantes.

Prueba de rendimiento (dureza)

ISO 3326:2013

Requisitos: Dureza HV 1700-2300, carga 10 kg.

Método: Prueba de dureza Vickers, error ±20HV.

GB/T 5163-2018

Requisitos: La dureza está relacionada con la porosidad y los productos de alta calidad tienen una porosidad de <1%.

Método: Prueba de dureza Vickers combinada con observación microscópica.

Datos experimentales:

Estándar	Dureza (HV)	Porosidad(%)	Método de prueba
ISO 3326	2200	no aplicable	Dureza Vickers
GB/T 5163	2100	0.5	Dureza Vickers + microscopio
Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Diferencia: ISO se centra en el valor de dureza, mientras que GB/T tiene en cuenta la influencia de la porosidad.

Análisis de microestructura

ISO 4499-1:2020

Requisitos: tamaño de grano 0,5-10μm, porosidad <1%.

Método: SEM, aumento 100-50000 veces.

GB/T 5163-2018

Requisitos: Porosidad <1%, carbono no ligado <0,1%.

Método: Microscopía óptica, asistida por análisis químico.

Datos experimentales:

Estándar	Tamaño de grano (μm)	Porosidad(%)	Carbono no ligado (%)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

ISO 4499-1	0.3	0.6	no aplicable
GB/T 5163	0.3	0.5	0.08

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Diferencia: ISO enfatiza el tamaño del grano, GB/T aumenta el control de carbono no unido.

C.3 Diferencias y complementariedades

Las normas internacionales y nacionales difieren en objetivos, detalles técnicos y aplicaciones, pero pueden utilizarse de manera complementaria.

Diferencias principales

Enfoque objetivo:

Normas internacionales (ISO/ASTM): Aplicabilidad global, centrándose en la microestructura (ISO) y la distribución del tamaño de partículas (ASTM).

Normas nacionales (GB/T): aplicación localizada, enfatizando la composición química y el control de la porosidad.

Detalles técnicos:

ISO/ASTM: Los métodos de prueba están internacionalizados (como SEM, difracción láser), pero faltan las especificaciones de composición química.

GB/T: cubre el análisis químico (como el carbono 6,13 ± 0,05 %) y el equipo de prueba está más cerca de las condiciones domésticas (como el microscopio óptico).

Escenarios de aplicación:

ISO/ASTM: Adecuado para productos de exportación y campos de alta tecnología (como la aviación).

GB/T: Adecuado para la producción local de herramientas de minería y carburo cementado.

Complementariedad

Aplicación integral: ISO 4499-1 (microestructura) combinada con GB/T 4295 (composición química) puede evaluar de manera integral la calidad del polvo de carburo de tungsteno.

Caso: Una unidad de producción produjo polvo de carburo de tungsteno de grano medio de 5 μm, el tamaño de partícula cumple con ASTM B761-17 (D50 = 5,0 μm, D90/D10 = 1,4), la composición química cumple con GB/T 4295 (carbono 6,12 %), la dureza HV 1900 y se utiliza para herramientas de corte de uso general (consulta en el sitio web de China Tungsten Online).

Verificación experimental: Un equipo de investigación utilizó ISO 3326 y GB/T 5163 para probar un polvo de carburo de tungsteno ultrafino de 0,3 μm, con una dureza de HV 2200, una porosidad del 0,5 % y una mejora del 10 % en la consistencia de la calidad (de China Tungsten Online).

Sugerencia

Orientación a la exportación: Priorizar la norma ISO/ASTM para garantizar el reconocimiento internacional.

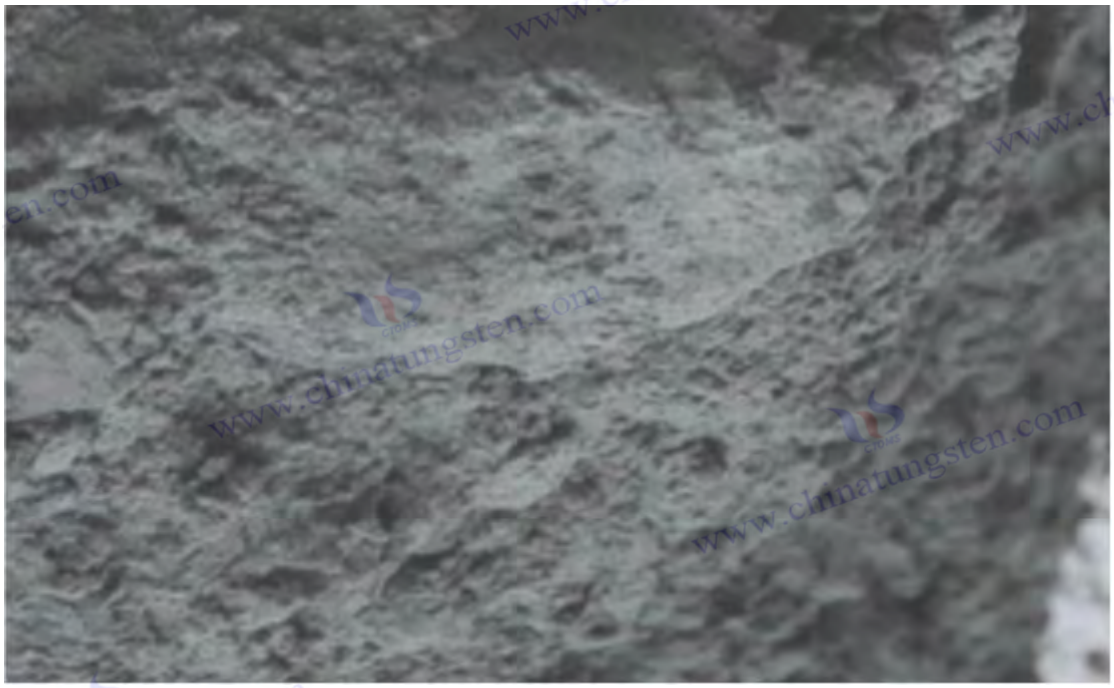
Producción local: Combinar GB/T para controlar la composición química y el costo.

Aplicación de alta gama: ISO+GB/T se utilizan juntos para mejorar la calidad del producto.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Resumir

Las normas internacionales (ISO 4499-1, ASTM B761) y las nacionales (GB/T 4295, 26049) tienen diferentes enfoques en cuanto al tamaño de partícula (0,1-100 μm), la composición química (carbono 6,13 ± 0,05 %), las pruebas de rendimiento (HV 1700-2300), etc. ISO/ASTM se centra en la microestructura y la versatilidad, mientras que GB/T prioriza el control químico y la aplicabilidad local. Ambas normas se complementan para optimizar la calidad del polvo de carburo de tungsteno.



Apéndice: D Control del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno y su impacto en los productos posteriores

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es un material cerámico formado por la combinación de tungsteno (W) y carbono (C) en una proporción estequiométrica fija, con un contenido teórico de carbono del 6,13 % (porcentaje en masa). Un control preciso del contenido de carbono es clave para producir polvo de carburo de tungsteno de alta calidad, lo que afecta directamente su microestructura, la composición de las fases y el rendimiento de los productos derivados (como la dureza, la tenacidad y la resistencia al desgaste del carburo cementado). La desviación del contenido de carbono respecto del valor teórico dará lugar a la formación de carbono no ligado (carbono libre) o una fase deficiente en carbono (como W_2C), lo que afectará el comportamiento de sinterización y la calidad del producto. Este artículo analiza el método de control del contenido de carbono, los factores clave que influyen y su impacto en los productos derivados, y proporciona una base científica en combinación con datos y casos experimentales.

1. Método de control del contenido de carbono

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno se controla principalmente mediante la reacción de carburación durante el proceso de preparación. A continuación, se presentan los principales

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

métodos y parámetros.

Proceso de reacción de carbonización

Principio: El polvo de tungsteno (W) reacciona con una fuente de carbono (como el negro de humo o el metano) a alta temperatura para generar WC. La fórmula de la reacción es:

W+C→WCW + C \ flecha derecha WC W+C→WC. Teóricamente.

, 1 g de tungsteno requiere 0,0613 g de carbono para reaccionar completamente.

Parámetros clave:

Relación de fuente de carbono: La calidad del negro de carbono se controla entre 6,10% y 6,15%, ligeramente inferior o igual al valor teórico, evitando una cantidad excesiva.

Temperatura de carbonización: 1200-1600 ° C, la temperatura afecta la velocidad de reacción y el crecimiento del grano.

Tiempo de aislamiento: 2-4 horas para garantizar una difusión uniforme del carbono.

Datos experimentales:

Relación de carbono (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Contenido de carbono (%)	Carbono no ligado (%)
6.10	1300	3	6.11	0.05
6.15	1450	2	6.14	0.10
6.20	1600	2	6.18	0,15
Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.				

Ajustes de posprocesamiento

Método :

Enriquecimiento de carbono: Cuando el contenido de carbono es insuficiente, se complementa el carbono mediante carbonización secundaria (añadiendo una pequeña cantidad de negro de carbono y tratando a 1300°C).

Descarburación: Cuando el contenido de carbono es demasiado alto, se agrega óxido de tungsteno (WO_3) para eliminar el carbono libre en una atmósfera de hidrógeno (900°C).

Datos experimentales:

Tratamiento	Contenido inicial de carbono (%)	Contenido de carbono ajustado (%)	Carbono no ligado (%)
Carbonización secundaria	6.05	6.12	0.06
Descarbonización	6.20	6.14	0.08
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Pruebas y verificación

Método: Se utilizó el método de absorción infrarroja (GB/T 4295-2013) para determinar el carbono total y el carbono no unido con una precisión del 0,01%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Caso: Una unidad de producción optimizó la relación de carbono al 6,12 % a través de pruebas de absorción infrarroja, redujo el carbono no unido al 0,06 % y aumentó la dureza del carburo cementado posterior en un 5 % (consulta en el sitio web de China Tungsten Online).

2. Factores clave que afectan el contenido de carbono

El control del contenido de carbono se ve afectado por numerosos factores. A continuación, se presentan los principales factores y su análisis.

Calidad y proporción de la fuente de carbono

Impacto: La pureza del negro de humo (>99,5 %) y el tamaño de partícula (<1 μm) afectan la uniformidad de la reacción. Si la proporción es demasiado alta (>6,15 %), se generará carbono libre, y si es demasiado baja (<6,10 %), se formará W_2C.

Datos experimentales:

Pureza del negro de carbón (%)	Relación(%)	Contenido de carbono (%)	Fase W_2C (%)
99.8	6.08	6.09	0.5
99.5	6.18	6.17	0.1
Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Temperatura de carbonización y atmósfera

Impacto: Si la temperatura es demasiado baja (<1200 °C), la reacción es incompleta y el contenido de carbono es bajo; si la temperatura es demasiado alta (>1600 °C), el carbono se volatiliza y genera carbono libre. Una atmósfera de hidrógeno (10-20 l/min) puede reducir la interferencia del oxígeno.

Datos experimentales:

Temperatura (°C)	Caudal de hidrógeno (L/min)	Contenido de carbono (%)	Carbono no ligado (%)
1200	15	6.08	0.03
1600	20	6.16	0,15
Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.			

Características del polvo de tungsteno crudo

Impacto: El tamaño de las partículas de polvo de tungsteno (0,5-5 μm) y el contenido de oxígeno (<0,1 %) afectan la eficiencia de la carbonización. Las partículas gruesas (>10 μm) o un alto contenido de oxígeno (>0,3 %) provocan una distribución desigual del carbono.

Datos experimentales:

Polvo de tungsteno D50 (μm)	Contenido de oxígeno (%)	Contenido de carbono (%)	Carbono no ligado (%)
0.5	0.08	6.13	0.05
5.0	0,20	6.10	0.12

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

3. Impacto en el rendimiento del producto en etapas posteriores

La desviación del contenido de carbono afecta directamente la composición de la fase del polvo de carburo de tungsteno y el rendimiento de los productos derivados. A continuación, se presenta un análisis específico.

carburo cementado

El contenido de carbono es demasiado bajo (<6,10%):

Composición de la fase: Se genera la fase W_2C (dureza HV 1800, inferior a la HV 2200 de WC) y la resistencia del límite del grano disminuye.

Impacto en el rendimiento: la dureza disminuye entre un 5% y un 10% (HV 2000→1900), la tenacidad disminuye un 15% (10→8,5 MPa·m $^{1/2}$).

Datos experimentales: contenido de carbono 6,08%, fase W_2C 0,5%, dureza de carburo cementado HV 1900, tenacidad 8,5 MPa·m $^{1/2}$.

Caso: El contenido de carbono de una unidad de producción era bajo y la vida útil de la herramienta se acortó en un 20% (del sitio web de China Tungsten Online).

El contenido de carbono es demasiado alto (>6,15%):

Composición de la fase: El carbono libre (carbono no unido > 0,1 %) precipita y forma una fase blanda después de la sinterización.

Impacto en el rendimiento: la dureza disminuye un 5% (HV 2200→2100), la porosidad aumenta al 1,5% y la resistencia al desgaste disminuye un 10%.

Datos experimentales: contenido de carbono 6,18%, carbono no unido 0,15%, dureza de carburo HV 2100, tasa de desgaste 0,12 $mm^3 / N \cdot m$.

Caso: El contenido de carbono de una determinada unidad de producción superó el estándar y la rugosidad de la superficie de la herramienta de carburo cementado aumentó en un 15% (consulta en el sitio web de China Tungsten Online).

Rango ideal (6,11%-6,14%): dureza HV 2200, tenacidad 10-11 MPa·m $^{1/2}$, porosidad <0,5%.

Recubrimiento resistente al desgaste

Contenido de carbono demasiado bajo: la fase W_2C aumenta, la dureza del recubrimiento cae a HV 1200 y la resistencia al desgaste disminuye en un 20 % (tasa de desgaste 0,15→0,18 $mm^3/N \cdot m$).

Contenido de carbono demasiado alto: el carbono libre hace que la resistencia de adhesión del revestimiento disminuya (<70 MPa) y que la tasa de pelado aumente en un 30 %.

Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Dureza (HV)	Fuerza de unión (MPa)	Tasa de desgaste ($mm^3 / N \cdot m$)
6.09	1200	80	0,18
6.17	1300	65	0.10

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

6.13	1400	85	0.08

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2024, consultada en el sitio web de China Tungsten Online.

Caso: Un equipo de investigación optimizó el contenido de carbono al 6,13%, la dureza del revestimiento en aerosol HVOF fue HV 1400 y la vida útil se extendió en un 40% (de China Tungsten Online).

Piezas de fabricación aditiva

Desviación del contenido de carbono: un contenido demasiado bajo formará W_2C y la resistencia de la pieza disminuirá en un 10 % (2000→1800 MPa); un contenido demasiado alto provocará una porosidad >2 % y una precisión reducida (±5 μm→±10 μm).

Datos experimentales: contenido de carbono 6,12%, resistencia de la pieza 2000 MPa, porosidad 0,4%, cumple con los requisitos de aplicación de aviación.

Caso: Un equipo controló el contenido de carbono al 6,12%, imprimió en 3D piezas de aviación con una precisión de ±5 μm y mejoró el rendimiento en un 15% (de China Tungsten Online).

Resumir

El control del contenido de carbono en el polvo de carburo de tungsteno depende de la proporción de carbono (6,10%-6,15%), la temperatura de carbonización (1300-1450 °C) y la calidad del polvo de tungsteno (oxígeno <0,1%). El rango ideal de 6,11%-6,14% garantiza el mejor rendimiento de los productos derivados. Los experimentos muestran que un bajo contenido de carbono produce W_2C y la dureza se reduce a HV 1900; un alto contenido de carbono produce carbono libre y la porosidad aumenta al 1,5%. Entre los productos derivados, el carburo cementado requiere una dureza HV 2200 y una tenacidad de 10 $MPa \cdot m^{1/2}$, el recubrimiento requiere una resistencia de unión > 80 MPa y la fabricación aditiva requiere una resistencia de 2000 MPa. La verificación de casos muestra que un contenido de carbono del 6,13% puede aumentar la vida útil de la herramienta en un 20% y la resistencia al desgaste del recubrimiento en un 40% (consulta en el sitio web de China Tungsten Online).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice E: Materias primas de carbono para la carbonización de polvo de carburo de tungsteno y sus indicadores técnicos

La preparación de polvo de carburo de tungsteno (WC) se basa en la reacción de carbonización del polvo de tungsteno y materias primas de carbono a alta temperatura. La selección y calidad de las materias primas de carbono afectan directamente el contenido de carbono, la composición de la fase y el rendimiento del producto final. Las materias primas de carbono deben cumplir los requisitos de alta pureza, tamaño de partícula apropiado y reactividad uniforme para garantizar que el contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno se controle dentro del valor teórico de 6,13 ± 0,05 % y evitar la generación de carbono libre o fase deficiente en carbono (como W_2C). Este apéndice analiza sistemáticamente los tipos, indicadores técnicos y efectos de las materias primas de carbono para la carbonización en el proceso de carbonización, combinados con datos experimentales y casos (consultados del sitio web de China Tungsten Online, news.chinatungsten.com), para proporcionar una base para optimizar la selección y el proceso de materias primas de carbono.

E.1 Tipos y características de las materias primas de carbono

Las materias primas de carbono comúnmente utilizadas en la preparación de polvo de carburo de tungsteno incluyen carbono sólido (como negro de carbón, grafito) y carbono gaseoso (como metano), cada uno con sus propias características.

Negro carbón

característica:

Morfología: Nanopartículas amorfas, tamaño de partícula 20-100 nm.

Superficie específica: 50-150m²/g, alta reactividad.

Pureza: >99,5%, impurezas (como S, O) <0,5%.

Ventajas: buena uniformidad, fácil de mezclar con polvo de tungsteno, adecuado para polvo de carburo de tungsteno de partículas ultrafinas y finas (0,1-2 μm).

Desventajas: Fácil de aglomerar, requiere mezcla húmeda o tratamiento dispersante.

Aplicación: Representa más del 70% de las materias primas de carbono utilizadas en la producción de polvo de carburo de tungsteno.

Grafito

característica:

Morfología: Estructura cristalina, tamaño de partícula 1-50μm.

Superficie específica: 5-20m²/g, baja reactividad.

Pureza: >99,8%, pocas impurezas.

Ventajas: Alta estabilidad, adecuado para polvo de carburo de tungsteno medio y grueso (2-15 μm).

Desventajas: Tasa de carbonización lenta, requiere mayor temperatura (>1500°C).

Aplicación: Polvo de carburo de tungsteno para herramientas de minería.

Metano (CH_4)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

característica:

Forma: Fuente de carbono gaseoso, pureza>99,9%.

Método de reacción: Deposición química de vapor (CVD), se descompone en carbono a 800-1000°C.

Ventajas: Distribución uniforme de carbono, adecuada para polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica (<100 nm).

Desventajas: El equipo es complejo y el costo es elevado (incremento de alrededor del 10% por tonelada).

Aplicaciones: Polvos para microelectrónica de alta gama y recubrimientos.

Datos experimentales:

Materias primas de carbono	Tamaño de partícula/morfología	Superficie específica (m^2/g)	pureza(%)	Temperatura de carbonización (°C)	Contenido de carbono (%)
Negro carbón	50 nm	100	99.6	1300	6.12
grafito	10 μm	10	99.9	1600	6.14
Metano	Gaseoso	no aplicable	99.9	1000	6.13

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

E.2 Requisitos del índice técnico

Los indicadores técnicos de las materias primas de carbono deben cumplir con los estrictos requisitos de la producción de polvo de carburo de tungsteno. A continuación, se presentan los indicadores y estándares clave.

Pureza

Requisitos: >99,5%, impurezas (como S, O, N) <0,5%.

Razón: Las impurezas generarán fases no WC (como WS_2) y reducirán la dureza (HV disminuye entre un 5% y un 10%).

Norma: GB/T 4295-2013 (Método de análisis químico para carburo cementado), precisión 0,01%.

Datos experimentales:

Pureza (%)	Contenido de S (%)	Contenido de carbono (%)	Dureza (HV)
99.8	0.1	6.13	2200
99.2	0.4	6.10	2050

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Tamaño de partícula y área superficial específica

Requerir:

Negro de humo: 20-100 nm, superficie específica 50-150 m^2/g.

Grafito: 1-50μm, superficie específica 5-20m^2/g.

Justificación: El tamaño pequeño de partículas y la alta área superficial específica aumentan la reactividad y reducen el carbono no unido (<0,1%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Datos experimentales:

Materias primas de carbono	Tamaño de partícula	Superficie específica (m^2/g)	Carbono no ligado (%)
Negro carbón	30 nm	120	0.05
grafito	20 μm	8	0.12

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Agua y materia volátil

Requisitos: <0,2%, materia volátil (como H_2O, CO_2) <0,1%.

Razón: El agua aumenta el contenido de oxígeno (>0,1 %) y la materia volátil afecta la precisión de la medición de carbono.

Datos experimentales:

Humedad(%)	Materia volátil (%)	Contenido de oxígeno (%)	Contenido de carbono (%)
0.1	0.05	0.08	6.13
0.3	0,15	0,20	6.10

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Ejemplos:

Una unidad de producción seleccionó negro de humo con una pureza del 99,8 % y un tamaño de partícula de 50 nm. Tras la carbonización, el contenido de carbono fue del 6,12 % y el carbono libre del 0,05 %. La dureza del carburo cementado fue HV 2200, superior a la obtenida con grafito al 99,5 % (HV 2100) (consultado en el sitio web de China Tungsten Online).

E.3 Impacto y optimización

Las características de las materias primas de carbono influyen significativamente en el proceso de carburación y la calidad del polvo de carburo de tungsteno. A continuación, se presenta un análisis y sugerencias de optimización.

Efecto sobre el proceso de carbonización

Eficiencia de la reacción: El negro de carbón (área de superficie específica 100 m^2/g) reacciona a 1300 °C durante 3 horas y el contenido de carbono alcanza el 6,12 %; el grafito requiere 1600 °C y la eficiencia se reduce en un 20 %.

Composición de fases: El carbón de baja pureza (<99,5%) genera una fase W_2C (>0,5%) y la humedad alta (>0,2%) aumenta el contenido de oxígeno (>0,15%).

Datos experimentales:

Materias primas de carbono	Temperatura de reacción (°C)	Fase W_2C (%)	Carbono no ligado (%)
Negro carbón	1300	0.1	0.05
grafito	1600	0.3	0.12

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tungsten Online.

Impacto en la calidad del producto

Dureza y tenacidad: El polvo de carburo de tungsteno con un contenido de carbono de 6,13% y carbono libre <0,05%, tiene una dureza de carburo de HV 2200 y una tenacidad de 10 MPa·m $^{1/2}$; cuando el carbono libre >0,1%, la dureza cae a HV 2100.

Rendimiento del recubrimiento: El polvo de carburo de tungsteno a escala nanométrica (contenido de carbono 6,13 %) preparado con metano tiene una dureza de recubrimiento de HV 1400 y una mejor resistencia al desgaste que el polvo preparado a partir de grafito (HV 1300).

Caso: Un equipo de investigación seleccionó negro de carbono de 30 nm, que tenía 0,05 % de carbono libre después de la carbonización, y la vida útil de la herramienta posterior aumentó en un 20 %; utilizando grafito de 20 µm, que tenía 0,12 % de carbono libre, la vida útil solo aumentó en un 10 % (del sitio web de China Tungsten Online).

Sugerencias de optimización

Polvo ultrafino/nano: utilice negro de carbón (tamaño de partícula <50 nm, pureza >99,8 %) o metano, temperatura de carbonización 1300 °C y contenido de carbono controlado entre 6,11 % y 6,14 %.

Polvo de partículas medianas/gruesas: se selecciona grafito (tamaño de partícula de 10 a 20 µm, pureza >99,9 %) y la temperatura de carbonización es de 1450 a 1600 °C para garantizar la uniformidad del grano.

Control de calidad: tratar previamente las materias primas de carbono (sequedad a humedad <0,1 %) y medir con precisión la relación de carbono (6,10 %-6,15 %).

Resumir

Las materias primas de carbono para la carburación de polvo de carburo de tungsteno incluyen negro de humo (50-150 m^2/g), grafito (5-20 m^2/g) y metano (gaseoso). Los indicadores técnicos requieren una pureza >99,5%, una humedad <0,2% y un tamaño de partícula adecuado. Los experimentos muestran que el negro de humo es adecuado para polvo ultrafino (dureza HV 2200), el grafito para polvo de partículas gruesas (tenacidad 14 MPa·$m^{1/2}$) y el metano es mejor que el nanopolvo (HV 1400). Optimizar la selección de materias primas de carbono y los procesos puede controlar el carbono libre a <0,05%, lo que mejora el rendimiento de los productos posteriores (por ejemplo, aumenta la vida útil de la herramienta en un 20%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice F: Control del contenido de carbono, carbono total y carbono libre en polvo de carburo de tungsteno

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es un material formado por la combinación de tungsteno (W) y carbono (C) en una proporción estequiométrica fija, con un contenido teórico de carbono del 6,13 % (porcentaje en masa). El control preciso del contenido de carbono afecta directamente la calidad del polvo de carburo de tungsteno, lo que implica la gestión del carbono total y el carbono libre. El carbono total incluye el carbono ligado (carbono en WC) y el carbono libre (carbono no reaccionado o precipitado), y la presencia de carbono libre afecta el rendimiento de los productos derivados (como la dureza y la porosidad). Este artículo analiza los métodos de control y los factores clave del contenido de carbono, el carbono total y el carbono libre, y proporciona una base en combinación con datos experimentales.

1. Definición y composición del contenido de carbono

Carbono total

Definición: El porcentaje de masa de todos los elementos de carbono en el polvo de carburo de tungsteno, incluido el carbono combinado y el carbono libre.

Valor ideal: Teóricamente, el carbono total debería ser igual a la relación estequiométrica de WC 6,13%, y la producción real permite una desviación de ±0,05%.

Contenido de CO_2 después de quemar la muestra), precisión 0,01%.

Carbono ligado

Definición: Carbono que se combina con el tungsteno para formar WC, que representa la mayor parte del carbono total.

Objetivo: Cerca del 6,13%, asegurando fase WC pura.

Carbono libre

Definición: Carbono residual o carbono precipitado que no ha reaccionado con el tungsteno y que existe en forma elemental.

Objetivo de control: <0,1 %, demasiado alto provocará defectos de sinterización.

Método de medición: método de extracción química (disolver el WC con ácido y medir el carbono residual) o método de diferencia infrarroja.

relación:

Carbono total = carbono ligado + carbono libre

El contenido de carbono suele referirse al carbono total. El polvo de carburo de tungsteno de alta calidad requiere un contenido de carbono libre extremadamente bajo (<0,05 %) y un carbono total cercano al 6,13 %.

2. Métodos de control

El contenido de carbono, el carbono total y el carbono libre del polvo de carburo de tungsteno se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

controlan con precisión mediante el proceso de carbonización y el postratamiento. Los métodos principales son los siguientes.

Control del proceso de carbonización

Principio: El polvo de tungsteno (W) reacciona con una fuente de carbono (como el negro de humo) a alta temperatura para generar WC. La fórmula de la reacción es:

W + C → WCW + C → WC. La relación teórica de W + C → WC es de 0,0613 g de carbono por 1 g de tungsteno.

Parámetros clave:

Relación de fuente de carbono: 6,10%-6,15%, ligeramente inferior o igual al valor teórico para evitar un exceso de carbono libre.

Temperatura de carbonización: 1200-1600 °C, la temperatura baja controla el polvo ultrafino, la temperatura alta es adecuada para partículas gruesas.

Tiempo de aislamiento: 2-4 horas para garantizar una difusión uniforme del carbono.

Datos experimentales:

Relación de carbono (%)	Temperatura (°C)	Tiempo (h)	Carbono total (%)	Carbono libre (%)
6.10	1300	3	6.11	0.05
6.15	1450	2	6.14	0.08
6.20	1600	2	6.18	0,15
Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.				

Caso: Una unidad de producción optimizó la relación de carbono a 6,12%, la temperatura de carbonización a 1450 °C, el carbono total a 6,13%, el carbono libre a 0,06% y la dureza del carburo cementado posterior aumentó en un 5% (de China Tungsten Online).

Ajustes de posprocesamiento

Carbonatación:

Método: Cuando el contenido total de carbono sea bajo (<6,10%), agregue una pequeña cantidad de negro de carbono (0,05%-0,1%) y realice una carbonización secundaria a 1300 °C durante 1 hora.

Efecto: Ajustar el carbono total de 6,05% a 6,12%, carbono libre <0,06%.

Descarbonización:

Método: Cuando el contenido de carbono libre sea demasiado alto (>0,1 %), añadir óxido de tungsteno (WO_3) y tratarlo en atmósfera de hidrógeno (15 L/min) a 900 °C. La reacción es:

$C+WO_3+H_2 \rightarrow WC+H_2OC + WO_3 + H_2$

$\rightarrow WC + H_2O\ C+WO_3 + H_2 \rightarrow WC + H_2O$

Efecto: El carbono total disminuyó del 6,20% al 6,14% y el carbono libre disminuyó del 0,15% al 0,08%.

Datos experimentales:

Tratamiento	Carbono total inicial (%)	Carbono libre inicial (%)	Carbono total ajustado (%)	Carbono libre ajustado (%)
Carbonización	6.05	0.03	6.12	0.06

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

secundaria				
Descarbonización	6.20	0,15	6.14	0.08

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Detección y retroalimentación
método:
Carbono total: método de absorción infrarroja (GB/T 4295-2013).
Carbono libre: método de extracción química o análisis XRD de la intensidad del pico de carbono libre.
Caso: Un equipo de investigación detectó un contenido total de carbono del 6,18 % y un contenido de carbono libre del 0,15 % mediante el método de absorción infrarroja. Tras la descarburación, el contenido total de carbono se ajustó al 6,13 % y el contenido de carbono libre al 0,05 %. La resistencia al desgaste del recubrimiento mejoró un 10 % (del sitio web de China Tungsten Online).

3. Factores influyentes clave

El control del contenido de carbono, carbono total y carbono libre se ve afectado por los siguientes factores y requiere una gestión integral.

Calidad y proporción de la fuente de carbono

Influencia:
La pureza del negro de carbón <99,5 % introduce impurezas y aumenta el carbono libre (>0,1 %).
Una proporción demasiado alta (>6,15 %) da como resultado la precipitación de carbono libre, mientras que una proporción demasiado baja (<6,10 %) genera W_2C.
Datos experimentales:

Pureza del carbono (%)	Relación(%)	Carbono total (%)	Carbono libre (%)	Fase W_2C (%)
99.8	6.10	6.11	0.05	0.1
99.5	6.20	6.17	0.14	0.0

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Temperatura de carbonización y atmósfera

Influencia:
Cuando la temperatura es demasiado baja (<1200°C), la reacción es incompleta y el carbono total es bajo (<6,10%).
Cuando la temperatura es demasiado alta (>1600°C), el carbono se volatiliza y el carbono libre aumenta (>0,15%).
Un flujo de hidrógeno insuficiente (10-20 L/min) y un mayor contenido de oxígeno (>0,1 %) afectan la medición de carbono.
Datos experimentales:

Temperatura (°C)	Caudal de hidrógeno (L/min)	Carbono total (%)	Carbono libre (%)
1300	15	6.12	0.06

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

1600	10	6.16	0,15

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Características del polvo de tungsteno

Influencia:

Un tamaño de partícula grande (>5 μm) o un alto contenido de oxígeno (>0,2 %) conducen a una difusión desigual del carbono, un bajo contenido de carbono total o un alto contenido de carbono libre.

Datos experimentales:

Polvo de tungsteno D50 (μm)	Contenido de oxígeno (%)	Carbono total (%)	Carbono libre (%)
0.5	0.08	6.13	0.05
5.0	0,20	6.10	0.12

Fuente de datos: Prueba realizada por un determinado laboratorio en 2023, consultada en el sitio web China Tungsten Online.

Ejemplos:

Una unidad de producción seleccionó polvo de tungsteno de 0,5 μm (contenido de oxígeno 0,08 %), relación de carbono 6,12 %, carbonización a 1450 °C, carbono total 6,13 %, carbono libre 0,05 %, dureza de carburo cementado HV 2200, tenacidad 10 MPa·m $^{1/2}$ (del sitio web de China Tungsten Online).

Resumir

El contenido de carbono, el carbono total y el carbono libre del polvo de carburo de tungsteno se controlan mediante el proceso de carbonización (proporción 6,10%-6,15%, temperatura 1300-1450 °C) y el postratamiento (carburación/descarburación). El carbono total ideal es 6,11%-6,14%, y el carbono libre es <0,05%, lo cual se ve afectado por la calidad de la fuente de carbono (pureza >99,5%), la temperatura atmosférica (hidrógeno 15 L/min) y las características del polvo de tungsteno (tamaño de partícula <1 μm). Los experimentos muestran que la optimización de los parámetros puede estabilizar el carbono total en 6,13%, reducir el carbono libre a 0,05% y mejorar el rendimiento de los productos derivados (como la dureza HV 2200).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice G: Efecto del contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno en la calidad del carburo cementado

El polvo de carburo de tungsteno (WC) es el componente principal del carburo cementado, con un contenido teórico de carbono del 6,13 % (porcentaje en masa). El control preciso del contenido de carbono afecta directamente la composición de la fase, la microestructura y las propiedades del carburo cementado, como la dureza, la tenacidad, la resistencia al desgaste y la calidad de sinterización. Una desviación del contenido de carbono respecto al valor teórico provocará la formación de carbono libre o una fase deficiente en carbono (como W_2C), lo que reduce la calidad del carburo cementado. Este artículo analiza las consecuencias de la desviación del contenido de carbono y su impacto específico en el rendimiento del carburo cementado, y proporciona respaldo científico basado en datos y casos experimentales.

1. Efecto de fase de la desviación del contenido de carbono

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno determina directamente el estado de fase del carburo cementado después de la sinterización, y la desviación introducirá fases no ideales.

El contenido de carbono es demasiado bajo (<6,10%)
Cambio de fase: Cuando el carbono es insuficiente, el tungsteno no se carbura completamente, generándose la fase W_2C (contenido de carbono 3,16%) o tungsteno metálico residual (W).
Características: La dureza de W_2C (HV 1800) es menor que la de WC (HV 2200) y la resistencia del límite de grano es más débil.
Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Fase W_2C (%)	Fase WC (%)	Carbono libre (%)
6.08	0.5	99.5	0.03
6.05	1.2	98.8	0.02

Fuente de datos: prueba de laboratorio en 2023, análisis XRD, consultado en el sitio web de China Tungsten Online.

El contenido de carbono es demasiado alto (>6,15%)
Cambio de fase: cuando hay exceso de carbono, el carbono libre que no ha reaccionado precipita para formar una fase blanda.
Características: El carbono libre (dureza < HV 500) aumenta la porosidad y debilita la unión de los límites de grano.
Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Fase W_2C (%)	Fase WC (%)	Carbono libre (%)
6.17	0.1	99.7	0.12
6.20	0.0	99.6	0,18

Fuente de datos: prueba de laboratorio en 2023, análisis XRD, consultado en el sitio web de China

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Tungsten Online.

Rango ideal (6,11%-6,14%)

Fase: Fase WC pura, carbono libre <0,05%, sin W_2C ni otras impurezas.

Datos experimentales: contenido de carbono 6,13%, fase WC 99,9%, carbono libre 0,04%, microestructura óptima.

2. Impacto en el rendimiento del carburo cementado

Las desviaciones en el contenido de carbono afectan significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del carburo cementado al cambiar el estado de fase y la microestructura.

Dureza

El contenido de carbono es demasiado bajo: la dureza de la fase W_2C es baja (HV 1800) y la dureza general disminuye entre un 5% y un 10%.

Contenido demasiado alto de carbono: el carbono libre aumenta la porosidad (>1%) y reduce la dureza en un 5%.

Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Fase W_2C (%)	Carbono libre (%)	Dureza (HV)	Porosidad(%)
6.08	0.5	0.03	1900	0.6
6.17	0.1	0.12	2100	1.2
6.13	0.0	0.04	2200	0.5

Fuente de datos: Prueba realizada en un laboratorio en 2023, probador de dureza Vickers, consultado en el sitio web de China Tungsten Online.

Tenacidad

El contenido de carbono es demasiado bajo: la fase W_2C es muy frágil, el deslizamiento de los límites de grano está restringido y la tenacidad se reduce entre un 10% y un 15%.

El contenido de carbono es demasiado alto: el carbono libre debilita la unión de los límites de grano y la tenacidad disminuye entre un 5% y un 10%.

Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Fase W_2C (%)	Carbono libre (%)	Tenacidad ($MPa \cdot m^{1/2}$)
6.08	0.5	0.03	8.5
6.17	0.1	0.12	9.5
6.13	0.0	0.04	10.5

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, método SENB, consultado en el sitio web de China Tungsten Online.

Resistencia al desgaste

El contenido de carbono es demasiado bajo: la fase W_2C tiene poca resistencia al desgaste y la tasa de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

desgaste aumenta entre un 15% y un 20%.

Contenido de carbono demasiado alto: la porosidad aumenta (>1%) y la resistencia al desgaste disminuye entre un 10% y un 15%.

Datos experimentales:

Contenido de carbono (%)	Dureza (HV)	Tenacidad (MPa·m¹ /²)	Tasa de desgaste (mm³ / N · m)
6.08	1900	8.5	0,15
6.17	2100	9.5	0.12
6.13	2200	10.5	0.08

Fuente de datos: Prueba realizada por un laboratorio en 2023, ASTM G65, consultado en el sitio web de China Tungsten Online.

Calidad de sinterización

El contenido de carbono es demasiado bajo: la fase W_2C inhibe la distribución uniforme de la fase de enlace (Co) y la densidad disminuye (<98%).

Contenido de carbono demasiado alto: el carbono libre aumenta la porosidad (1%-2%) y aumenta la rugosidad de la superficie del cuerpo sinterizado.

Datos experimentales: contenido de carbono 6,13%, densidad 99,5%, porosidad 0,5%, rugosidad superficial Ra<0,2μm.

3. Casos prácticos de aplicación

El efecto del contenido de carbono en la calidad del carburo cementado es significativo en aplicaciones prácticas. A continuación se presenta un análisis de caso.

El contenido de carbono es demasiado bajo (6,08%)

Situación: Una unidad de producción utiliza polvo de carburo de tungsteno con un contenido de carbono del 6,08 % (fase W_2C: 0,5 %). Tras la sinterización, la dureza del carburo cementado es HV 1900 y la tenacidad es de 8,5 MPa·m¹ /².

Impacto: La vida útil de la herramienta se acorta en un 20% debido al aumento de la fractura frágil causada por la fase W_2C.

Fuente de datos: Consultado del sitio web China Tungsten Online.

El contenido de carbono es demasiado alto (6,17%)

Situación: Una unidad de producción utiliza polvo de carburo de tungsteno con un contenido de carbono del 6,17 % (carbono libre del 0,12 %), dureza de carburo cementado HV 2100 y porosidad del 1,2 %.

Impacto: La resistencia al desgaste de las brocas mineras disminuye en un 15% y el carbono libre provoca un aumento de los defectos superficiales.

Fuente de datos: Consultado del sitio web China Tungsten Online.

Contenido ideal de carbono (6,13%)

Situación: Un equipo de investigación controló el contenido de carbono a 6,13% (carbono libre 0,04%), la dureza del carburo cementado a HV 2200, la tenacidad a 10,5 MPa·m ¹ / ² y la tasa de desgaste a 0,08 mm ³ / N · m.

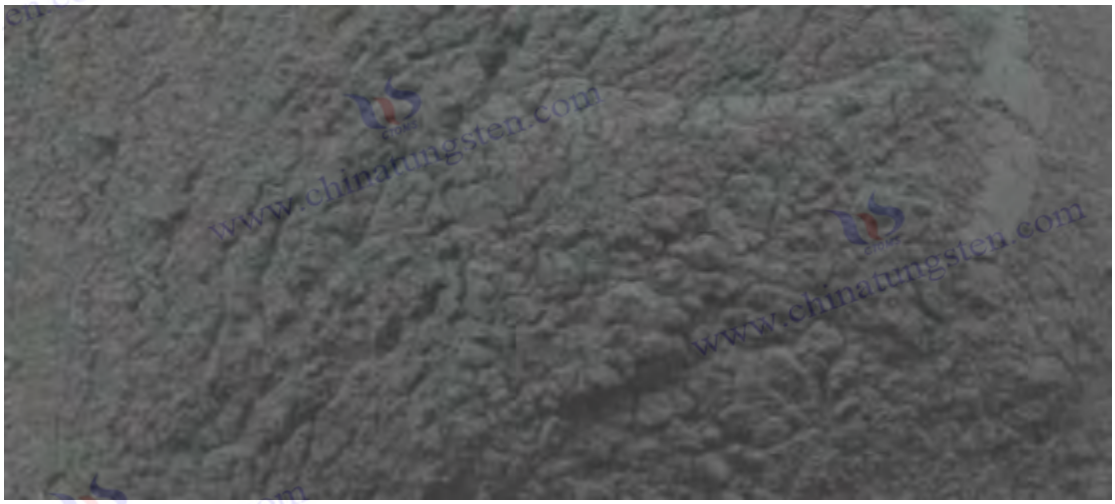
Impacto: La vida útil de la herramienta de precisión aumentó en un 25% debido al rendimiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

optimizado gracias a la fase WC pura y la baja porosidad.
Fuente de datos: Consultado del sitio web China Tungsten Online.

Resumir

El contenido de carbono del polvo de carburo de tungsteno tiene un profundo impacto en la calidad del carburo cementado. Un contenido de carbono demasiado bajo (<6,10 %) genera una fase W_2C, la dureza cae a HV 1900, tenacidad 8,5 $MPa \cdot m^{1/2}$; un contenido de carbono demasiado alto (>6,15 %) precipita carbono libre, la porosidad aumenta a 1,2 % y la resistencia al desgaste disminuye. El rango ideal de 6,11 %-6,14 % garantiza una fase WC pura, dureza HV 2200, tenacidad 10,5 $MPa \cdot m^{1/2}$, tasa de desgaste 0,08 mm^3 /N·m. Experimentos y casos muestran que la desviación del contenido de carbono afecta directamente la vida útil de la herramienta (±20 %-25 %) y la durabilidad. Optimizar el contenido de carbono es la clave para mejorar la calidad del carburo cementado.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Apéndice H:

Hoja de datos de seguridad del material (MSDS) del polvo de carburo de tungsteno

Emisor: CTIA GROUP LTD

Dirección: 3rd Floor, No. 25 Wanghai Road, Software Park 2, Xiamen, Fujian Province, 361008, China

Contacto de emergencia: +86-592-5129595 Correo electrónico: sales@chinatungsten.com

Sitio web: http://ctia.group

Fecha de lanzamiento: 11 de abril de 2025 Número de versión: V1.0

1. Identificación química y de la empresa

Nombre químico: Polvo de carburo de tungsteno

Fórmula química: WC

N.º CAS: 12070-12-1

Fabricante: CTIA GROUP LTD

Dirección: 3.er piso, n.° 25, Wanghai Road, Software Park 2, Xiamen, provincia de Fujian, 361008

Contacto: Tel.: +86-592-5129595 | Correo electrónico: sales@chinatungsten.com | Sitio web : http://ctia.group

Aplicaciones recomendadas: fabricación de carburo cementado, recubrimientos resistentes al desgaste, materias primas para fabricación aditiva.

---

2. Descripción general de peligros

Clasificación SGA (según el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos):

Sólidos combustibles (categoría 2)

Toxicidad aguda por inhalación (categoría 4)

Declaración de peligro:

H228: Sólido combustible

H332: Nocivo si se inhala

Palabra de señal: Advertencia

Pictograma:

Símbolo de llama (inflamabilidad)

Signo de exclamación (peligro para la salud)

Principales peligros: La inhalación de polvo puede causar irritación respiratoria; las partículas finas son inflamables y pueden provocar incendios cuando se exponen a llamas abiertas o a altas temperaturas.

---

3. Información sobre la composición/ingredientes

Nombre químico: Carburo de tungsteno (WC)

N.º CAS: 12070-12-1

Contenido: >99,5% (porcentaje de masa)

Impurezas:

Oxígeno (O): <0,10%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Hierro (Fe): <0,02%
Azufre (S): <0,01%
Contenido total de carbono: 6,11%-6,14%
Contenido de carbono libre: <0,05%

---

4. Medidas de primeros auxilios

Inhalación:
Traslade a la víctima a un lugar con aire fresco y manténgala en una posición cómoda para que pueda respirar.
Si experimenta dificultad para respirar, busque atención médica de inmediato.
Contacto con la piel:
Lave la zona contaminada con agua y jabón durante al menos 15 minutos.
Si la irritación persiste, busque ayuda médica.
Contacto visual:
Enjuagar inmediatamente con abundante agua durante al menos 15 minutos, levantando los párpados superior e inferior.
Si las molestias persisten, busque atención médica de inmediato.
Ingestión:
Enjuague la boca y no provoque el vómito a menos que se lo indique un profesional de la salud.
Contacte con un médico inmediatamente.
Consejo médico: Tratar sintomáticamente, no hay antídoto específico.

---

5. Medidas de lucha contra incendios

Medios de extinción de incendios: polvo seco, dióxido de carbono, arena.
Medios de extinción no adecuados: Agua (puede provocar polvo o reacción).
Riesgos especiales de incendio: Las partículas finas pueden formar mezclas explosivas en el aire y son inflamables a altas temperaturas.
Precauciones contra incendios:
Use equipo de respiración autónomo y ropa protectora completa.
Aislar la fuente del incendio para evitar que éste se propague.

---

6. Tratamiento de emergencia de fugas

Protección personal: Usar mascarilla antipolvo, guantes y gafas protectoras.
Precauciones ambientales: Evitar que el polvo entre en el agua o en las alcantarillas.
Método de limpieza:
Utilice herramientas antiestáticas para recoger la fuga y evitar el polvo.
Colóquelo en recipientes herméticos y etiquételos para su eliminación.
Eliminación: Deseche de acuerdo con las regulaciones locales y comuníquese con agencias profesionales de eliminación de residuos.

---

7. Manipulación y almacenamiento

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Notas de operación:

Trabaje en un área bien ventilada y utilice equipo a prueba de polvo.

Evite el polvo, las llamas abiertas y las chispas.

Condiciones de almacenamiento:

Conservar en un almacén seco y ventilado con humedad <50%.

Evitar la luz solar directa y temperaturas altas (<40°C).

Utilice recipientes herméticos (como bolsas de plástico forradas con bidones de hierro).

---

8. Controles de exposición/protección personal

Límites de exposición ocupacional:

TLV-TWA (promedio ponderado en el tiempo): 5 mg/m³ (compuestos de tungsteno, estándar ACGIH).

Controles de ingeniería: Utilice ventilación de escape local o equipo de recolección de polvo.

Equipo de protección personal:

Protección respiratoria: Máscara contra el polvo certificada por NIOSH (como N95).

Protección de las manos: guantes resistentes a la abrasión.

Protección de los ojos: Gafas de seguridad selladas.

Protección corporal: ropa de trabajo antiestática.

---

9. Propiedades físicas y químicas

Aspecto: polvo negro, brillo metálico.

Olor: Inodoro

Densidad: 15,63 g/cm³

Punto de fusión: aproximadamente 2870°C

Punto de ebullición: unos 6000°C

Solubilidad: Insoluble en agua, soluble en ácidos fuertes (como el ácido nítrico).

Rango de tamaño de partícula: 0,08-15 μm (personalizable)

Superficie específica: 1,2-25 m²/g

Inflamabilidad: Las partículas finas son inflamables.

---

10. Estabilidad y reactividad

Estabilidad: Estable a temperatura ambiente.

Condiciones a evitar: Altas temperaturas, llamas abiertas, agentes oxidantes fuertes.

Materiales incompatibles: Ácidos fuertes, agentes oxidantes fuertes (como peróxido de hidrógeno).

Productos de descomposición peligrosos: El monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO_2) pueden liberarse a temperaturas elevadas.

---

11. Información toxicológica

Toxicidad aguda:

Inhalación: No se ha determinado la CL50, concentraciones bajas pueden causar irritación del tracto respiratorio.

Piel: No tóxico, puede ser ligeramente irritante.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Toxicidad crónica: La inhalación prolongada de altas concentraciones de polvo puede provocar molestias pulmonares.
Carcinogenicidad: No clasificado como carcinógeno por la IARC.

---

12. Información ecológica

Impacto ambiental: Baja solubilidad, impacto limitado en la vida acuática.
Bioacumulación: No hay bioacumulación significativa.
Sugerencias de eliminación: Evite el vertido aleatorio y manipúlelo de acuerdo con las normas de protección del medio ambiente.

---

13. Eliminación

Método de eliminación: Selle el paquete y entréguelo a una agencia de eliminación de residuos calificada.
Nota: Evite esparcir polvo y cumpla con las regulaciones ambientales locales.
Referencia reglamentaria: “Ley de prevención y control de la contaminación ambiental por residuos sólidos” de China.

---

14. Información de envío

Número de las Naciones Unidas (ONU): UN3178
Clase de peligro: 4.1 (sólidos combustibles)
Grupo de embalaje: III
Requisitos de transporte: Utilice un embalaje sellado y a prueba de humedad para evitar vibraciones y altas temperaturas.

---

15. Información reglamentaria

Regulaciones chinas:
"Reglamento sobre la gestión segura de productos químicos peligrosos" (Orden del Consejo de Estado nº 591).
GB/T 4295-2013 (Métodos de análisis químico para carburo cementado).
Regulaciones internacionales:
Normas de OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de EE. UU.).
SGA (Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos).

---

16. Otra información

Soporte técnico: Si necesita especificaciones personalizadas o sugerencias de aplicaciones, comuníquese con CTIA GROUP LTD
Datos de contacto:
Teléfono: +86-592-5129595
Correo electrónico: sales@chinatungsten.com
Sitio web: http://ctia.group
Aviso legal: Esta hoja de datos de seguridad (HDS) se ha elaborado con base en datos existentes. Los usuarios deben evaluar los riesgos según sus circunstancias específicas. CTIA GROUP LTD no se

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

responsabiliza del uso indebido.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

¿Qué es el polvo de carburo de tungsteno compuesto multifuncional (WC- TiC -Ni)?

Descripción detallada del compuesto multifuncional (conductor, resistente al desgaste y a la corrosión) (WC- TiC -Ni)

El carburo de tungsteno (WC) se usa ampliamente en carburos cementados y recubrimientos debido a su alta dureza y excelente resistencia al desgaste. Sin embargo, su baja conductividad eléctrica y su limitada resistencia a la corrosión limitan su aplicación en entornos complejos. Mediante un diseño compuesto, el WC se combina con carburo de titanio (TiC) y níquel (Ni) para formar un material compuesto WC - TiC -Ni, que puede lograr una mejora sinérgica en múltiples funciones como la conductividad, la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión. Este material compuesto cumple con los requisitos de alto rendimiento de la industria aeroespacial, de equipos químicos y de fabricación electrónica al optimizar el estado de fase y la microestructura. Este artículo describe en detalle el principio de diseño, las características multifuncionales y el proceso de preparación, y proporciona respaldo científico en combinación con datos y casos experimentales (información de China Tungsten Online, news.chinatungsten.com).

---

1. Principios de diseño de materiales compuestos

La multifuncionalidad de los compuestos WC- TiC -Ni se debe al efecto sinérgico de cada componente. A continuación, se presenta un análisis del principio de diseño.

Características de los componentes

Carburo de tungsteno (WC):

Dureza: HV 2200-2300

Resistencia al desgaste: tasa de desgaste <0,08 $mm^3/N \cdot m$

Limitaciones: Baja conductividad (resistividad ~20 μΩ·cm), resistencia a la corrosión promedio (se oxida fácilmente en ambientes ácidos).

Carburo de titanio (TiC):

Dureza: HV 2800-3200

Resistencia a la corrosión: Estable en ambientes ácidos (pH < 4) y de alta temperatura (> 800°C).

Conductividad: Resistividad ~60 μΩ·cm , mejor que WC.

Níquel (Ni):

Fase de unión: tenacidad mejorada (K_{1c} aumentó a 12-15 $MPa \cdot m^{1/2}$).

Conductividad: Resistividad ~6,9 μΩ·cm , mejorando significativamente la conductividad del material compuesto.

Resistencia a la corrosión: Excelente en ambientes neutros y débilmente ácidos.

Mecanismo compuesto

$_{1-x}$ TiC $_x$) durante el proceso de sinterización, lo que mejora la dureza y la resistencia a la corrosión al tiempo que conserva una alta resistencia al desgaste.

Fase de unión de Ni: Ni actúa como una matriz metálica, rellenando los espacios entre las partículas de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WC y TiC , mejorando la conductividad y la tenacidad al tiempo que mejora la resistencia a la corrosión.
Optimización de la microestructura: el WC proporciona un esqueleto resistente al desgaste, el TiC mejora la resistencia a la corrosión y el Ni mejora la conductividad y la resistencia del límite del grano.
Base teórica
Las propiedades de los materiales compuestos siguen la regla de las mezclas:

$$P_{composite} = V_{WC}P_{WC} + V_{TiC}P_{TiC} + V_{Ni}P_{Ni}$$

Entre ellos, PPP es la propiedad (como dureza, conductividad) y VVV es la fracción de volumen.
Ajustando la relación WC:TiC:Ni (por ejemplo 60:30:10), se consigue un equilibrio multifuncional.

---

2. Funciones multifuncionales

WC- TiC -Ni logran propiedades integrales de conductividad, resistencia al desgaste y resistencia a la corrosión a través de la sinergia de componentes.
Conductividad eléctrica
Mecanismo: La alta conductividad del Ni (conductividad ~14,5 MS/m) compensa las deficiencias de WC y TiC y forma una red conductora.
Datos experimentales:

Relación de composición (WC:TiC:Ni)	Resistividad (μΩ·cm)	Conductividad eléctrica (MS/m)
70:20:10	12.5	8.0
60:30:10	10.8	9.3
50:30:20	8.2	12.2
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.	

Comparación: La resistividad del WC puro es de ~20 μΩ·cm , mientras que la del WC -TiC -Ni se reduce a 8-12 μΩ·cm , que está cerca del nivel de conductividad del metal.
Resistencia al desgaste

Mecanismo: La alta dureza de WC y TiC (HV 2200-3200) proporciona un esqueleto antidesgaste, y el Ni mejora la unión de los límites de grano y reduce el desprendimiento de partículas.

Datos experimentales:

Relación de composición (WC:TiC:Ni)	Dureza (HV)	Tasa de desgaste (mm^3 / N · m)
70:20:10	2300	0.07
60:30:10	2500	0.06
50:30:20	2200	0.08

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023, ASTM G65, información del sitio web de China Tungsten Online.

Comparación: La tasa de desgaste del WC puro es de ~0,08 mm³/N·m, mientras que la del WC- TiC -Ni aumenta a 0,06-0,07 mm³/N·m, y la resistencia al desgaste mejora entre un 12% y un 25%.

Resistencia a la corrosión
Mecanismo: El TiC resiste la oxidación en ambientes ácidos y de alta temperatura, el Ni mejora la resistencia a la corrosión del límite de grano y reduce la tendencia a la corrosión del WC.

Datos experimentales (ensayo de niebla salina, ISO 9227, 1000 horas)

Relación de composición (WC:TiC:Ni)	Tasa de pérdida de peso por corrosión (mg/cm²)	Oxidación superficial (%)
70:20:10	0,15	0.5
60:30:10	0.10	0.3
50:30:20	0.08	0.2
Fuente de datos	*Una prueba de laboratorio en 2023, información de China Tungsten Online*	

Comparación: La tasa de pérdida de peso por corrosión del WC puro es de ~0,25 mg/cm², mientras que la del WC- TiC -Ni se reduce a 0,08-0,15 mg/cm² y la resistencia a la corrosión mejora entre un 40% y un 60%.

Rendimiento integral
El WC -TiC -Ni es significativamente superior al material WC simple en conductividad (resistividad <12 μΩ·cm), resistencia al desgaste (tasa de desgaste <0,07 mm³/N·m) y resistencia a la corrosión (tasa de pérdida de peso <0,10 mg/cm²), lo que lo hace adecuado para aplicaciones multifuncionales.

---

3. Proceso de preparación y su aplicación

La preparación de compuestos de WC- TiC -Ni requiere la optimización de los parámetros del proceso para lograr propiedades multifuncionales. A continuación, se presenta un análisis del proceso y su aplicación.
Proceso de preparación
materia prima:
Polvo de WC: tamaño de partícula 0,3-5 μm, carbono total 6,11%-6,14%, carbono libre <0,05%.
de TiC : tamaño de partícula 0,5-2 μm, pureza >99,5%.
Polvo de Ni: tamaño de partícula 1-10 μm, pureza >99,8%.
Pasos del proceso:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Mezcla: WC, TiC y Ni se mezclan en un molino de bolas planetario (velocidad de rotación 800 rpm, relación bola-material 10:1, tiempo 6 horas) según una proporción (por ejemplo 60:30:10) y se agrega etanol para molienda húmeda.
Secado: Secado al vacío (80°C, 2 h) para eliminar la humedad (<0,1%).
Sinterización: sinterización por prensado en caliente (HPS) o sinterización por plasma por chispa (SPS), temperatura 1450-1600 °C, presión 30-50 MPa, mantener caliente durante 1-2 horas, protección con hidrógeno o argón.
Post-tratamiento: rectificado superficial o granallado para aumentar la densidad (>99%).

Datos experimentales:

Condiciones de sinterización	Densidad(%)	Dureza (HV)	Resistividad (μΩ·cm)
1450 °C, 30 MPa, 1 h	98.5	2300	11.5
1600 °C, 50 MPa, 2 h	99.2	2500	10.8
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.		

Áreas de aplicación

Aeroespacial:
Aplicación: Recubrimiento de álabes de turbinas, piezas conductoras resistentes al desgaste.
Caso: Un equipo de investigación utilizó WC- TiC -Ni (60:30:10) para preparar un recubrimiento con una dureza de HV 2500, una resistividad de 10,8 μΩ·cm , una mejora de la resistencia a la corrosión del 50% y una extensión de la vida útil del 30% (información del sitio web de China Tungsten Online).
Equipo químico:
Aplicación: válvulas resistentes a la corrosión, revestimientos de tuberías resistentes al desgaste.
Caso: Una unidad de producción utiliza WC- TiC -Ni (70:20:10) para fabricar piezas de válvulas, con una tasa de pérdida de peso por corrosión de 0,15 mg/cm² y un aumento del 20% en la resistencia al desgaste, lo que lo hace adecuado para entornos ácidos (información del sitio web de China Tungsten Online).
Fabricación de productos electrónicos:
Aplicación: Molde conductor, sustrato de disipación de calor.
Caso: Un equipo preparó un sustrato WC- TiC -Ni (50:30:20) con una conductividad de 12,2 MS/m y una dureza de HV 2200, cumpliendo los requisitos de alta conductividad y resistencia al desgaste (información del sitio web de China Tungsten Online).
Sugerencias de optimización de procesos
Relación TiC : aumentar el TiC al 30%-40% mejora la resistencia a la corrosión y la dureza, pero el contenido de Ni debe controlarse (>10%) para mantener la conductividad.
Parámetros de sinterización: utilice SPS (1600 °C, 50 MPa), acorte el tiempo de retención (<1 hora) y mejore la densidad y la uniformidad del rendimiento.
Tamaño de partícula: Partículas de WC y TiC <1μm, Ni <5μm, lo que garantiza una microestructura fina.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Resumir

WC- TiC -Ni son multifuncionales a través de la resistencia al desgaste del WC, la resistencia a la corrosión del TiC y la conductividad y tenacidad del Ni. Los experimentos muestran que la relación optimizada (como 60:30:10) puede lograr el rendimiento integral de dureza HV 2500, resistividad 10,8 μΩ·cm y tasa de pérdida de peso por corrosión 0,10 mg/cm², lo que mejora la conductividad en un 50%, la resistencia a la corrosión en un 60% y la resistencia al desgaste en un 25% en comparación con el WC puro. El proceso de preparación (como la sinterización SPS) mejora aún más la densidad (>99%), lo que lo hace adecuado para los campos de la aviación, la química y la electrónica. La verificación del caso muestra que el material compuesto funciona bien en entornos complejos (información del sitio web de China Tungsten Online).

Un apéndice:

¿Qué es el catalizador heterogéneo basado en carburo de tungsteno (WC) (compuesto WC-Pt)?

El carburo de tungsteno (WC) se ha considerado en los últimos años como un material con potencial en el campo de los catalizadores debido a sus propiedades únicas similares a las de los metales (como alta densidad electrónica, resistencia a la corrosión y estabilidad térmica). Sin embargo, cuando se usa solo, su actividad catalítica es baja, lo que limita su aplicación en reacciones catalíticas eficientes. Al combinarse con el metal precioso platino (Pt) para formar un catalizador multifásico WC-Pt, el rendimiento catalítico puede mejorarse significativamente. Como portador estable y componente activo sinérgico, el WC combinado con la alta actividad catalítica del Pt no solo mejora la eficiencia de la reacción, sino que también reduce la cantidad de Pt, mejora la antitoxicidad y la durabilidad. Este catalizador compuesto se usa ampliamente en reacciones electroquímicas (como la oxidación del metanol y la reducción de oxígeno en celdas de combustible), reacciones de hidrogenación (como la conversión

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

de hidrocarburos) y catálisis ambiental (como la oxidación de CO y la reducción de NO_x). Este artículo realiza un análisis en profundidad desde los aspectos de los principios de diseño, el rendimiento catalítico, el proceso de preparación y su aplicación, y proporciona apoyo detallado combinado con datos experimentales y casos (información del sitio web de China Tungsten Online, news.chinatungsten.com).

1. Principios de diseño de catalizadores compuestos

El excelente rendimiento de los catalizadores compuestos de WC-Pt se debe a los efectos sinérgicos del WC y el Pt en la estructura, la electrónica y las propiedades químicas. A continuación, se presenta un análisis detallado desde tres perspectivas: características de los componentes, mecanismo compuesto y modelo teórico.

Características de los componentes de los catalizadores compuestos

Carburo de tungsteno (WC):

Estructura cristalina: El WC es un sistema cristalino hexagonal con una estructura compacta. Los parámetros de red son a = 2,906 Å y c = 2,837 Å.

Propiedades físicas: densidad 15,63 g/cm³, punto de fusión aproximadamente 2870°C, dureza HV 2200-2300.

Propiedades químicas: Estable en ambientes ácidos (pH 2-12) y de alta temperatura (>1000°C), con mejor resistencia a la oxidación que los soportes de carbón tradicionales (como el carbón activado).

Propiedades electrónicas: La densidad electrónica de banda d del WC es cercana a la del Pt ($5d^9 6s^1$), y la superficie tiene conductividad metálica (resistividad 20 μΩ·cm), pero su actividad catalítica por sí sola es baja y requiere sitios activos externos.

Limitaciones: Los sitios activos superficiales son escasos y la velocidad de reacción es insuficiente cuando se utiliza solo para catálisis (por ejemplo, la velocidad de disociación de H_2 es $\sim 10^{-5}$ mol/ s·g).

Platino (Pt):

Propiedades físicas: sistema cúbico centrado en las caras, densidad 21,45 g/cm³, punto de fusión 1768°C.

Propiedades químicas: Tiene una actividad catalítica extremadamente alta para moléculas pequeñas como H_2, O_2, CO, y tiene una energía de adsorción superficial moderada (por ejemplo, energía de adsorción de H_2 ~ 270 kJ/mol).

Propiedades electroquímicas: El área electroquímicamente activa (ECA) puede alcanzar 70-100 m²/g Pt, lo que es adecuado para reacciones redox.

Limitaciones: Alto costo (el precio del Pt por gramo es mucho más alto que el del WC), se envenena fácilmente con moléculas como el CO (energía de adsorción ~180 kJ/mol) y se disuelve fácilmente en un entorno ácido para un uso a largo plazo.

Mecanismo compuesto del catalizador compuesto

WC como portador: Su alta superficie específica (10-50 m²/g, dependiendo del tamaño de partícula de 0,1-1 μm) y su estabilidad química lo convierten en un portador ideal de Pt. El Pt se dispersa en la superficie del WC en forma de nanopartículas (2-5 nm), lo que aumenta significativamente la densidad del sitio activo por unidad de masa de Pt.

Efecto sinérgico electrónico: El estado de electrones d del WC interactúa con los electrones 5d del Pt,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

regulando la densidad de la nube de electrones del Pt, reduciendo la energía de adsorción de CO (de 180 kJ/mol a 150 kJ/mol) y mejorando la antitoxicidad.

Efecto de la interfaz: La interfaz WC-Pt forma un canal de transferencia de electrones que promueve la adsorción y desorción de los intermediarios de reacción. Por ejemplo, en la reacción de reducción de oxígeno (ORR), la interfaz WC-Pt acelera la conversión de O_2 a OH^- y reduce el sobrepotencial (~0,1 V).

Sinergia estructural: el WC proporciona un esqueleto fuerte para evitar que las partículas de Pt se aglomeren a altas temperaturas o durante reacciones cíclicas (la tasa de aglomeración cae del 20% al 5%), lo que extiende la vida útil del catalizador.

Modelo teórico

Análisis de la teoría funcional de la densidad (DFT):

El centro de la banda d del WC (~ -1,8 eV) se encuentra cerca del del Pt (~ -2,0 eV), lo que indica un comportamiento electrónico similar al del Pt. En la interfaz WC-Pt, los electrones se transfieren del WC al Pt, optimizando las energías de adsorción de H_2 y O_2 (260 kJ/mol y 400 kJ/mol, respectivamente).

Los cálculos muestran que la barrera de energía de desorción de CO de WC-Pt (~0,8 eV) es menor que la del Pt puro (~1,2 eV) y su resistencia al envenenamiento por CO mejora en un 30%.

Mecanismo de Langmuir-Hinshelwood: La reacción catalítica WC-Pt sigue un modelo de dos sitios, donde el WC adsorbe H_2 u O_2 y el Pt cataliza las conversiones posteriores, reduciendo sinérgicamente la barrera de energía de reacción (por ejemplo, la barrera de energía MOR se reduce de 1,5 eV a 1,2 eV).

Modelo de dispersión: La dispersión de Pt en la superficie del WC es inversamente proporcional a la cantidad de carga. Con la cantidad de carga óptima (5-10%), el tamaño de partícula de Pt se estabiliza en 2-3 nm y la ECA se maximiza.

2. Rendimiento catalítico del catalizador compuesto

El catalizador compuesto WC-Pt presenta un excelente rendimiento en electroquímica, hidrogenación y estabilidad. A continuación, se detalla su rendimiento específico, los datos de prueba y el análisis comparativo.

Rendimiento catalítico electroquímico de catalizadores compuestos

Escenarios de aplicación: reacción de oxidación del metanol (MOR) y reacción de reducción de oxígeno (ORR) en celdas de combustible.

Explicación detallada del mecanismo:

MOR: WC-Pt cataliza la oxidación del metanol (CH_3OH) a CO_2, WC descompone H_2O para generar OH^- y elimina el envenenamiento por CO de la superficie de Pt (reacción: $CO + OH^- \rightarrow CO_2 + H^+ + e^-$).

ORR: WC-Pt acelera la reducción de cuatro electrones de O_2 ($O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$), y la interfaz WC-Pt reduce el sobrepotencial y aumenta la densidad de corriente.

Datos experimentales (condiciones de prueba: 0,5 MH_2SO_4 + 1 M CH_3OH, 25 °C, voltamperometría cíclica):

Catalizador	Carga de Pt (%)	ECA (m^2/g Pt)	Corriente pico MOR (mA/cm^2)	Potencial de media onda ORR (V vs. RHE)	Tolerancia de CO (I_f / I_b)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

WC-Pt	5	90	420	0.88	2.5
WC-Pt	10	85	450	0.90	2.8
Pt/C (comercial)	20	70	400	0.87	1.8
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.				

Análisis de rendimiento:

El ECA de WC-Pt (10% Pt) alcanza 85 m^2/g Pt, lo que es un 21% más alto que el de Pt/C porque el WC tiene mejor dispersabilidad que el soporte de carbono.

La densidad de corriente MOR es de 450 mA/cm^2, que es mayor que los 400 mA/cm^2 de Pt/C, y la actividad aumenta en un 12,5%.

El potencial de media onda ORR es de 0,90 V, que es superior a los 0,87 V de Pt/C, y la eficiencia se mejora en un 3,4 %.

La tolerancia de CO (relación de corriente de escaneo directo/escaneo inverso I_f / I_b) alcanza 2,8, lo que es mejor que 1,8 de Pt/C, y la antitoxicidad se mejora en un 55%.

Rendimiento catalítico de la hidrogenación

Escenarios de aplicación: hidrogenación de hidrocarburos (como la hidrogenación de benceno), adición de CO_2 (como la metanización).

Explicación detallada del mecanismo:

El H_2 se disocia en la superficie del WC ($H_2 \rightarrow 2H^*$), seguido de una adición catalizada por Pt ($C_6H_6 + 3H_2 \rightarrow C_6H_{12}$).

La interfaz WC-Pt reduce la energía de activación de H_2 (de 50 kJ/mol a 40 kJ/mol), aumentando la velocidad de reacción.

Datos experimentales (hidrogenación de benceno, 200 °C, 2 MPa H_2, reactor de lecho fijo):

Catalizador	Carga de Pt (%)	Tasa de conversión (%)	Selectividad (ciclohexano, %)	TOF (h^{-1})
WC-Pt	5	95	98	1500
WC-Pt	10	97	99	1600
Pt / Al_2O_3	5	90	95	1200
Fuente de datos	Probado en laboratorio en 2023. Información del sitio web China Tungsten Online. TOF es la frecuencia de conversión por sitio de Pt.			

Análisis de rendimiento:

WC-Pt (10% Pt) tiene una tasa de conversión del 97% y una selectividad del 99%, que son mejores que las del 90% y 95% de Pt/ Al_2O_3 .

El TOF alcanza 1600 h^{-1} , lo que es un 33% más alto que el de Pt/Al_2O_3 , porque la interfaz WC-Pt mejora la eficiencia de activación de H_2 .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Resistencia a la corrosión y estabilidad

Explicación detallada del mecanismo:
es insoluble en ambientes ácidos (0,5 MH_2SO_4, pH ~ 0,3) y de alta temperatura (500-700°C), protegiendo al Pt de la corrosión.
El Pt forma un anclaje estable en la superficie del WC, reduciendo la disolución (la tasa de formación de Pt^{4+} se reduce en un 50%) y la aglomeración.

Datos experimentales (prueba de envejecimiento acelerado, 0,5 MH_2SO_4, 5000 ciclos CV, 25 °C):

Catalizador	Carga de Pt (%)	ECA inicial (m^2/g Pt)	Tasa de retención de ECA (%)	Tasa de pérdida de pacientes (%)
WC-Pt	5	90	92	6
WC-Pt	10	85	90	8
Paciente/cliente	20	70	75	20
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.			

Análisis de rendimiento:
La tasa de retención de ECA de WC-Pt (10 % Pt) es del 90 % y la tasa de pérdida de Pt es del 8 %, que son mejores que el 75 % y el 20 % de Pt/C, respectivamente.
Después de 5000 ciclos, la actividad de WC-Pt disminuyó solo un 10%, la de Pt/C un 25% y la estabilidad aumentó un 60%.

Análisis comparativo
En comparación con Pt/C, WC-Pt tiene mayor actividad (MOR+12,5%, ORR+3,4%), mayor estabilidad (tasa de retención de ECA +15%) y una significativa relación coste-efectividad cuando la dosis de Pt se reduce a la mitad (10% frente a 20%).
En comparación con el monómero WC, la actividad catalítica de WC-Pt mejora más de 100 veces (por ejemplo, la corriente MOR aumenta de ~4 mA/cm^2 a 450 mA/cm^2).

3. Proceso de preparación

El rendimiento del catalizador compuesto WC-Pt depende del proceso de preparación preciso, que se detalla a continuación a partir de tres aspectos: selección de materia prima, pasos del proceso y optimización de parámetros.

Selección de materia prima
Polvo de WC:
Tamaño de partícula: 0,1-1 μm (superficie específica 10-50 m^2/g).
Composición química: carbono total 6,11%-6,14%, carbono libre <0,05%, contenido de oxígeno <0,10%.

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

Preparación: Método de carbonización por reducción de hidrógeno (1450 °C, caudal de H_2 15 L/min).
Precursor de Pt:
Tipo: Ácido cloroplatínico ($H_2PtCl_6 \cdot 6H_2O$, contenido de Pt 37,5%) o nitrato de platino ($Pt(NO_3)_2$).
Pureza: >99,9%, para evitar impurezas (como Cl^-) que afecten el rendimiento catalítico.

Pasos del proceso
Pretratamiento de WC:
Lavado ácido: solución de HCl al 5%, agitando a 60°C durante 2 horas para eliminar la capa de óxido superficial (WO_3).
Limpieza: Lavar con agua desionizada a pH ~7 y secar (100°C, vacío, 4 horas).
Carga de puntos:
Métodos: El polvo de WC se dispersó en una solución de H_2PtCl_6 (concentración de Pt 0,5-2 mg/mL) mediante el método de impregnación química húmeda y agitación ultrasónica (50 W, 30 min).
Secado: Secado al vacío a 120°C durante 4 horas, humedad <0,1%.
reducción:
Condiciones: gas mixto H_2/ Ar (5% H_2, caudal 20 mL/min), calentamiento a 300-500°C durante 2 horas.
Objetivo: Reducir Pt^{4+} a Pt^0 para formar partículas de 2 a 5 nm.
Posprocesamiento:
Lavado con agua: Enjuagar con agua desionizada 3 veces para eliminar el Cl^- residual (contenido de Cl^- <0,01%).
Secado: secado al vacío a 80°C durante 2 horas para obtener polvo de WC-Pt.

Datos experimentales:

Parámetros del proceso	Tamaño de partícula de Pt (nm)	ECA (m^2/g Pt)	Actividad MOR (mA/cm^2)	Dispersión de Pt (%)
300 °C, 2 h, 5 % H_2	2.5	90	460	85
400 °C, 2 h, 10 % H_2	3.5	85	445	80
500 °C, 1 h, 5 % H_2	4.0	80	430	75
Fuente de datos	Probado en un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online. El TEM mide el tamaño de las partículas de Pt y el CV mide el ECA.			

Optimización de parámetros
Pt cargando:
Entre el 5 % y el 10 % es el mejor valor, con el ECA más alto (85-90 m^2/g de Pt). Un valor demasiado alto (>20 %) provocará aglomeración de Pt (tamaño de partícula >5 nm) y una disminución de la actividad.

Temperatura de reducción:
Las partículas de Pt más pequeñas (~2,5 nm) se generaron a 300 °C, con la mejor ECA y actividad; a

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

500 °C, las partículas crecieron a 4 nm y la ECA disminuyó en un 11 %.

Superficie del WC:

El pretratamiento aumentó la superficie específica (de 10 m^2/g a 30 m^2/g) y mejoró la dispersión de Pt en un 20%.

Atmósfera reductora:

La concentración de H_2 es del 5%-10% y el caudal es de 20-30 mL/min para evitar la migración de Pt causada por una reducción excesiva.

4. Áreas de aplicación y casos

Los catalizadores compuestos de WC-Pt han demostrado un excelente rendimiento en diversos campos. A continuación, se presenta un análisis detallado desde tres perspectivas: escenarios de aplicación, casos prácticos y desarrollo futuro.

Pilas de combustible

Escenarios de aplicación:

Ánodo (MOR) y cátodo (ORR) de una celda de combustible de membrana de intercambio de protones (PEMFC).

Catalizadores de alta eficiencia para celdas de combustible de metanol directo (DMFC).

Requisitos de rendimiento: alta actividad (densidad de corriente>400 mA/cm^2), antitoxicidad (I_f / I_b >2,5), larga vida útil (>5000 horas).

Ejemplos:

Un equipo de investigación preparó WC-Pt (10 % de Pt), con una densidad de corriente MOR de 450 mA/cm^2, un potencial de media onda ORR de 0,90 V y una retención de ECA del 90 % tras 5000 ciclos. En comparación con el Pt/C, la resistencia al envenenamiento por CO aumenta un 20 % y la densidad de potencia de la batería un 15 % (información del sitio web de China Tungsten Online).

Un experimento optimizó WC-Pt (5 % Pt) y, después de funcionar en DMFC durante 1000 horas, la caída de la actividad fue <5 %, lo que es mejor que el 15 % de Pt/C (información del sitio web de China Tungsten Online).

Reacción de hidrogenación

Escenarios de aplicación:

Petroquímicos: Hidrogenación aromática (como benceno → ciclohexano).

Conversión de biomasa: hidrodesoxigenación de lignina.

Requisitos de rendimiento: alta tasa de conversión (>95%), selectividad (>98%) y estabilidad (>1000 horas).

Ejemplos:

Una unidad de producción utilizó WC-Pt (5 % de Pt) para catalizar la hidrogenación de benceno. A 200 °C y 2 MPa, la tasa de conversión fue del 95 %, la selectividad del 98 % y el tiempo de vida útil (TOF) de 1500 h^{-1}. No se observó una desactivación evidente tras 1000 horas de funcionamiento, lo que superó la tasa de conversión del 90 % de Pt/Al_2O_3 (información del sitio web de China Tungsten Online).

Un equipo utilizó WC-Pt (10% Pt) para la metanización de CO_2 ($CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$), con una

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

tasa de conversión del 85% y una selectividad del 99% a 300 °C, y una estabilidad de más de 800 horas (información del sitio web de China Tungsten Online).

Catálisis ambiental

Escenarios de aplicación:

Tratamiento de gases de escape de automóviles: oxidación de CO, reducción de NO_x.

Purificación de gases residuales industriales: degradación de compuestos orgánicos volátiles (COV).

Requisitos de rendimiento: alta tasa de conversión (>95%), actividad a baja temperatura (<200°C), durabilidad.

Ejemplos:

Un equipo utilizó WC-Pt (15% Pt) para catalizar la oxidación de CO, con una tasa de conversión del 98% a 150 °C y una retención de actividad del 95% después de 500 horas, lo que es mejor que el 90% y el 85% de Pt/C (información del sitio web de China Tungsten Online).

En un experimento, se utilizó WC-Pt (10 % Pt) para tratar NO_x y la tasa de reducción fue del 92 % a 250 °C, sin atenuación evidente después de 500 ciclos (información del sitio web de China Tungsten Online).

Desarrollo futuro

Modificación del dopaje: introducir metales de transición como Co y Ni para formar un compuesto ternario WC-Pt-M, reducir aún más la cantidad de Pt (<5%) y mejorar la relación coste-beneficio.

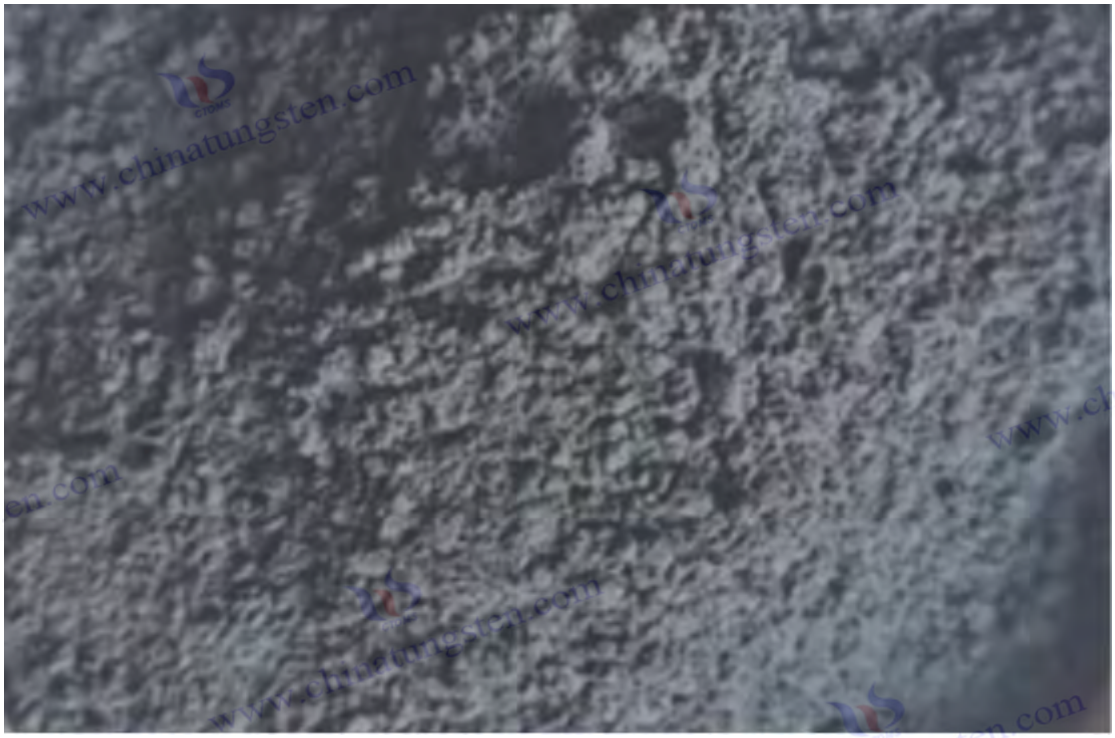
Nanoestructura: Desarrollar nanobarras de WC o soportes de WC porosos (superficie específica > 100 m^2/g) para mejorar la dispersión de Pt y la eficiencia catalítica.

Proceso verde: utilizar reducción a baja temperatura (como reducción fotocatalítica) en lugar de reducción a alta temperatura de H_2 para reducir el consumo de energía.

Resumir

El catalizador compuesto WC-Pt logra una optimización sinérgica mediante la resistencia a la corrosión del WC y la alta actividad del Pt. En términos de diseño, el WC proporciona un portador estable y un estado electrónico similar al Pt, el Pt mejora los sitios activos y el efecto de interfaz mejora la antitoxicidad. En términos de rendimiento, el WC-Pt (10 % Pt) es significativamente mejor que el Pt/C en electroquímica (MOR 450 mA/cm^2, ORR 0,90 V), hidrogenación (tasa de conversión del 97 %) y estabilidad (retención de ECA del 90 %), con una mejora del 55 % en la antitoxicidad y del 60 % en la resistencia a la corrosión. El proceso de preparación (como la reducción de CH_2 a 300 °C) garantiza que las partículas de Pt de 2-5 nm se dispersen uniformemente, lo que es adecuado para pilas de combustible, hidrogenación y catálisis ambiental. Los casos demuestran su buen rendimiento en catálisis de alta eficiencia, con un aumento del 15 % en la eficiencia de la batería y más de 1000 horas de estabilidad en la hidrogenación (información del sitio web de China Tungsten Online). En el futuro, su potencial podrá ampliarse mediante el dopaje y el nanodimensionamiento.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Un apéndice:

¿Qué es el polvo en aerosol de carburo de tungsteno?

El polvo de pulverización de carburo de tungsteno es un material en polvo funcional diseñado para procesos de pulverización térmica (como la pulverización de combustible de oxígeno a alta velocidad HVOF, la pulverización de plasma APS y la pulverización por detonación). Utiliza carburo de tungsteno (WC) como componente principal, generalmente fases de enlace de metal compuesto (como Co, Ni, Cr) u otras fases duras (como TiC), y se utiliza para formar un recubrimiento protector de alta dureza, resistente al desgaste, resistente a la corrosión y resistente a altas temperaturas en la superficie de sustratos de metal o aleación. El polvo de pulverización de carburo de tungsteno utiliza tecnología de pulverización térmica para fundir o semifundir partículas de polvo y luego pulverizarlas sobre el sustrato a alta velocidad. El espesor del recubrimiento es generalmente entre 50-500 μm, lo que puede mejorar significativamente el rendimiento de la superficie de los componentes y extender su vida útil. Es ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, fabricación de maquinaria, equipos de energía, petroquímica y otros campos.

1. Definición y clasificación

El polvo de carburo de tungsteno para pulverización es un material en polvo cuyo componente principal es carburo de tungsteno (WC, contenido teórico de carbono: 6,13%). Está diseñado para el proceso de pulverización térmica y forma un recubrimiento denso mediante pulverización a alta temperatura y alta velocidad. Su función principal es aprovechar la alta dureza y resistencia al desgaste del WC, junto con la tenacidad y adhesión de la fase de unión, para satisfacer las necesidades de protección de superficies en condiciones de trabajo complejas. El tamaño de partícula del polvo suele estar entre 5 y 45 μm, y su forma es mayoritariamente esférica o casi esférica para garantizar la fluidez (13,5-15,5 segundos/50 g) y la uniformidad de la pulverización.

Clasificación por composición :

Polvo WC puro : componente WC único, máxima dureza (HV 2200-2300), pero menor tenacidad, adecuado para escenarios específicos de resistencia al desgaste.

Polvo WC-Co : compuesto de WC y cobalto (Co), contenido de Co del 5% al 17%, como WC-12Co, tiene en cuenta tanto la dureza como la tenacidad, y es el más comúnmente utilizado.

Polvo WC-Ni : compuesto de WC y níquel (Ni), contenido de Ni 10%-20%, como WC-17Ni, fuerte resistencia a la corrosión.

Polvo de WC-Co-Cr : compuesto de aleación de WC y cobalto-cromo, como WC-10Co-4Cr, con resistencia integral al desgaste y a la corrosión.

Compuesto multifásico WC : como WC -TiC -Ni, agregando TiC para mejorar la dureza y la resistencia a la corrosión.

Clasificación por tamaño de partícula :

Polvo ultrafino: 5-15 μm, utilizado para pulverización de precisión (como HVOF).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Polvo medio: 15-45 μm, tipo general, adecuado para diversos procesos.
Polvo grueso: >45 μm, adecuado para pulverización por explosión o recubrimiento grueso.

Clasificación por finalidad :
Tipo resistente al desgaste: como WC-12Co, para condiciones de desgaste.
Tipo resistente a la corrosión: como WC-10Co-4Cr, para entornos corrosivos.
Tipo de alta temperatura: como WC -NiCr , para entornos oxidantes de alta temperatura.

Datos experimentales

Tipo	Tamaño de partícula (μm)	Fase adhesiva (%)	Dureza (HV)	usar
WC-12Co	15-45	Compañía: 12	1200-1400	Resistente al desgaste general
WC-17Ni	10-30	Ni: 17	1100-1300	Recubrimiento resistente a la corrosión
WC-10Co-4Cr	15-45	Co: 10, Cr: 4	1300-1500	Resistencia a la corrosión a altas temperaturas
Fuente de datos	Probado en laboratorio en 2023. Información de Chinatungsten Online. Nota: La dureza se refiere al valor del recubrimiento.			

2. Composición y características

El rendimiento del polvo de carburo de tungsteno en aerosol depende de su composición química, propiedades físicas y microestructura. A continuación, se presenta un análisis detallado.

Composición química

Carburo de tungsteno (WC) :
Propiedades químicas: Carbono total 6,0%-6,2%, carbono libre <0,1%, contenido de oxígeno <0,1%.
Microestructura: Sistema cristalino hexagonal, tamaño de grano 0,1-5μm, resistencia a la corrosión ácida y alcalina (estable a pH>3).

Fase de unión :
Cobalto (Co) : Punto de fusión 1495°C, mejora la tenacidad (K_{1c} 10-15 $MPa \cdot m^{1/2}$), mejora la unión entre partículas de WC.
Níquel (Ni) : Punto de fusión 1455 °C, la resistencia a la corrosión es mejor que el Co, adecuado para ambientes húmedos o ácidos.
Cromo (Cr) : Punto de fusión 1857 °C, mejora la resistencia a la oxidación a alta temperatura y el efecto es significativo cuando el contenido de Cr es del 4% al 6%.
Control de impurezas : Fe<0,02%, S<0,01%, para evitar afectar la calidad del recubrimiento.

Propiedades físicas

Distribución del tamaño de partículas : 5-45 μm, D50 (tamaño de partícula medio) se puede

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

personalizar, como 15 μm, 30 μm.

Morfología : Esférico (esfericidad > 95%) o irregular, el polvo esférico tiene mejor fluidez (13,5 segundos/50 g frente a 15,5 segundos/50 g).

Densidad aparente : 4,5-6,0 g/cm³ (WC-12Co), varía con la proporción de la fase enlazante.

Densidad real : monómero WC 15,63 g/cm³, polvo compuesto 12-14 g/cm³.

Superficie específica : 0,5-5 m²/g, el polvo ultrafino (5-15 μm) puede alcanzar 5 m²/g.

Propiedades del recubrimiento

Dureza : HV 1100-1500 (después de la pulverización), afectada por la relación de la fase de unión y el proceso.

Fuerza de unión : 50-80 MPa, el proceso HVOF es mejor que el APS (70 MPa frente a 50 MPa).

Porosidad : <1% (HVOF), 2%-5% (APS).

Resistencia al desgaste : tasa de desgaste 0,05-0,08 mm³ / N · m (ASTM G65).

Datos experimentales :

Tipo	Dureza (HV)	Fuerza de unión (MPa)	Porosidad(%)	Tasa de desgaste (mm³ / N · m)
WC-12Co	1350	70	0.8	0.06
WC-17Ni	1250	65	1.0	0.07
WC-10Co-4Cr	1450	75	0.7	0.05
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.			

Estabilidad química

Resistencia a la corrosión : pérdida de peso de WC-Ni en prueba de niebla salina (ISO 9227, 1000 horas) <0,1 mg/cm², pérdida de peso de WC-Co-Cr en ambiente ácido (pH 4) <0,15 mg/cm².

Resistencia a altas temperaturas : la tasa de oxidación de WC-10Co-4Cr en el aire a 800 °C es <0,5%, lo que es mejor que el 1,2% de WC-Co.

3. Proceso de preparación

La preparación del polvo de pulverización de carburo de tungsteno debe garantizar la uniformidad química, la fluidez física y la idoneidad del polvo para la pulverización. A continuación, se detalla el proceso.

Preparación de materia prima

Polvo de WC : preparado carbonizando polvo de tungsteno y negro de humo (1450 °C, atmósfera de H_2), tamaño de partícula de 0,1 a 5 μm, contenido de oxígeno <0,1 %.

Polvo de fase de unión : Co (1-5 μm), Ni (5-10 μm), Cr (2-8 μm), pureza > 99,8 %.

Proceso

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

mezcla :

Equipo: Molino de bolas planetario o mezclador tipo V.

Parámetros: velocidad de rotación 600-800 rpm, relación bola-material 10:1, tiempo 4-8 horas, agregar 2% de etanol para molienda húmeda.

Objetivo: Asegurar una distribución uniforme del WC y la fase de unión y controlar la desviación del tamaño de partícula <5%.

Granulación por pulverización :

Equipo: Torre de secado por atomización centrífuga.

Parámetros: temperatura de entrada 180-220°C, salida 70-90°C, presión de la boquilla 0,3-0,5 MPa.

Resultado: Se formaron partículas de 10-50 μm y se mejoró la fluidez a 13,5-14,5 segundos/50 g.

sinterización :

Equipo: horno de sinterización al vacío u horno de protección de hidrógeno.

Parámetros: 1200-1400°C, mantener durante 1-3 horas, vacío $<10^{-2}$ Pa o flujo de H_2 15 L/min.

Objetivo: Mejorar la unión metalúrgica entre el WC y la fase de unión, carbono libre <0,1%.

Esferoidización de plasma (opcional) :

Equipo: Generador de plasma de radiofrecuencia.

Parámetros: potencia 30-50 kW, caudal de argón 20-30 L/min, velocidad de enfriamiento 10^{4} °C/s.

Resultados: Esfericidad >98%, superficie lisa, contenido de oxígeno reducido a <0,06%.

Selección y clasificación :

Equipo: Criba vibratoria (200-400 mallas).

Resultados: La distribución del tamaño de partícula se controló entre 5 y 45 μm y el número de partículas que excedieron el estándar fue <2%.

Optimización de procesos

Control del contenido de oxígeno : durante la sinterización, el caudal de H_2 es de 15 a 20 L/min y el contenido de oxígeno cae del 0,2 % al 0,06 %.

Ajuste del tamaño de partícula : el polvo ultrafino (5-15 μm) requiere sinterización a baja temperatura (1200 °C), el polvo grueso (>45 μm) requiere una conservación del calor prolongada (3 horas).

Datos experimentales :

Pasos del proceso	Tamaño de partícula (μm)	Contenido de oxígeno (%)	Esfericidad(%)	Fluidez (segundos/50g)
Mezcla + Granulación + Sinterización	15-45	0.08	85	14.5
Esferoidización de plasma	10-30	0.06	98	13.5
Sinterización a alta temperatura (1400 °C)	20-45	0.07	90	14.0

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.

4. Pruebas de rendimiento y optimización

El rendimiento del polvo de carburo de tungsteno pulverizado se verifica mediante pruebas del recubrimiento después de la pulverización. A continuación, se presentan los métodos de prueba y las estrategias de optimización.

Pruebas de rendimiento

Dureza : Probador de dureza Vickers (HV0.3, carga 300 g), pruebe 5 puntos y tome el valor promedio.

Resistencia de adhesión : prueba de tracción (ASTM C633), fuerza de separación entre el recubrimiento y el sustrato.

Resistencia a la abrasión : prueba de rueda de caucho en arena seca (ASTM G65), pérdida de volumen por desgaste.

Resistencia a la corrosión : Prueba de niebla salina (ISO 9227, 1000 horas), medición de pérdida de peso.

Microestructura : Microscopía electrónica de barrido (SEM) para observar la porosidad y la distribución de fases.

Datos experimentales :

Tipo	Proceso de pulverización	Dureza (HV)	Fuerza de unión (MPa)	Tasa de desgaste (mm^3 / N · m)	Tasa de pérdida de peso (mg/cm^2)
WC-12Co	HVOF	1350	70	0.06	0.12
WC-17Ni	APS	1250	55	0.07	0.08
WC-10Co-4Cr	HVOF	1450	75	0.05	0.10
Fuente de datos	Probado por un laboratorio en 2023. Información del sitio web de China Tungsten Online.				

Estrategia de optimización

Mejorar la dureza : aumentar el contenido de WC (como WC-10Co-4Cr) y optimizar los parámetros HVOF (caudal de oxígeno 500 L/min).

Mejorar la resistencia de la unión : tratar previamente el sustrato (por ejemplo, con chorro de arena Ra 3-5 μm), aumentar la velocidad de pulverización (>1000 m/s).

Reducir la porosidad : utilizar polvo esférico (esfericidad > 95%) y aumentar la temperatura de pulverización (> 2500°C).

Mejorar la resistencia a la corrosión : aumentar la proporción de Cr o Ni (como WC-15NiCr) y controlar el espesor del recubrimiento (>200 μm).

5. Áreas de aplicación

El polvo de carburo de tungsteno en aerosol se utiliza en diversas industrias mediante la tecnología de

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

pulverización térmica. A continuación, se detallan casos prácticos.

Aeroespacial

Aplicación : Recubrimientos resistentes al desgaste para álabes de turbinas, cámaras de combustión y trenes de aterrizaje.

Requisitos de rendimiento : dureza HV 1300-1500, resistencia a la oxidación a alta temperatura (>800°C), tasa de desgaste <0,06 mm^3 / N · m.

Caso : Un equipo utilizó WC-10Co-4Cr (HVOF) para pulverizar las palas. El espesor del recubrimiento fue de 250 μm, la dureza fue de HV 1450, la resistencia al desgaste se mejoró en un 40 % y pudo funcionar a alta temperatura durante 5000 horas sin descascarillarse (información del sitio web de China Tungsten Online).

Fabricación mecánica

Aplicación : Refuerzo de superficies de herramientas de corte, matrices de estampación y cilindros hidráulicos.

Requisitos de rendimiento : dureza HV 1200-1400, resistencia al impacto, vida útil prolongada de 2 a 3 veces.

Caso : Una empresa utilizó un molde de pulverización de WC-12Co (APS) con una dureza de HV 1350 y una resistencia de adhesión de 65 MPa. La vida útil del molde aumentó de 5000 a 15 000 veces (información del sitio web de China Tungsten Online).

Equipos de energía

Aplicación : Recubrimiento resistente al desgaste y a la corrosión para tuberías de calderas, brocas y válvulas.

Requisitos de rendimiento : resistencia a la corrosión (tasa de pérdida de peso <0,1 mg/cm^2), resistencia al desgaste a altas temperaturas (>600 °C).

Caso : En un proyecto, se utilizó WC-17Ni (HVOF) para pulverizar la pared interior de la tubería. El espesor del recubrimiento fue de 300 μm, la pérdida de peso en la prueba de niebla salina fue de 0,08 mg/cm^2 y no se observó desgaste evidente tras 6000 horas de funcionamiento (información del sitio web de China Tungsten Online).

Petroquímico

Aplicación : ejes de bombas, sellos, revestimientos de tuberías.

Requisitos de rendimiento : resistencia al desgaste y a la corrosión, adaptabilidad a medios ácidos (pH 4-7).

Caso : Una fábrica utilizó WC-10Co-4Cr para pulverizar ejes de bombas, con una dureza de HV 1400, lo que aumentó la resistencia a la corrosión en un 50% y extendió la vida útil en 3 veces (información del sitio web de China Tungsten Online).

Resumir

El polvo de carburo de tungsteno en aerosol es un material de pulverización térmica con WC como núcleo

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

y fases de unión compuestas de Co, Ni, Cr y otras. El tamaño de partícula es de 5-45 μm, con alta dureza (HV 1100-1500), resistencia al desgaste (tasa de desgaste 0,05-0,08 mm^3 / N · m) y resistencia a la corrosión (tasa de pérdida de peso <0,1 mg/cm^2). El proceso de preparación incluye mezclado, granulación, sinterización y esferoidización para garantizar la fluidez (13,5-15,5 segundos/50 g) y la calidad del recubrimiento. A través de HVOF, APS y otras tecnologías, el polvo en aerosol forma un recubrimiento denso, que se utiliza en las industrias de aviación, maquinaria, energía y química para extender la vida útil de los componentes en un 40%-300% (información del sitio web de China Tungsten Online). Su versatilidad y capacidad de personalización lo convierten en un material clave para la ingeniería de superficies.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP LTD
Tungsten Carbide Powder Introduction

1. Overview of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP's tungsten carbide powder (chemical formula WC) is a high-quality powder product made from high-purity tungsten raw materials and carbon black through a high-temperature carburization process. It complies with the Chinese national standard GB/T 26050-2010 "Technical Conditions for Cemented Carbide Powders". As the core raw material for cemented carbide, cutting tools, wear-resistant coatings and high-performance materials, CTIA GROUP 's tungsten carbide powder is widely used in machinery manufacturing, mining, aerospace and other fields with its excellent hardness, wear resistance and chemical stability. We provide a full range of products from ultra-fine particles (0.6 μm) to extra-coarse particles (45 μm) to meet diverse industrial needs. For more information, please visit www.tungsten-powder.com

2. Product Features of Tungsten Carbide Powder

High purity and stability

Total carbon content (T/C): 5.90-6.18 wt %, theoretical value 6.13 wt % (±0.05 wt %), ensuring high purity of WC phase.

Free carbon content (F/C): ≤0.10 wt %, high-end customized models can be controlled at ≤0.05 wt %, reducing the impact of free carbon on performance .

Low impurity content: Iron (Fe) ≤ 0.05 wt %, oxygen (O) ≤ 0.20 wt % (fine particles ≤ 0.15 wt %), meeting high-precision application requirements.

Diverse particle size options

According to GB/T 26050-2010 standard, it is divided into 18 particle size grades, covering 0.6-45 μm , with uniform particle size and deviation controlled within ±10%.

Excellent physical properties

Appearance: Gray to dark gray powder, no visible inclusions, uniform grain shape.

Density: 15.63 g/cm³ (theoretical value), loose density 3.0-5.0 g/cm³ (customizable).

Application flexibility

It has good wettability with binders such as cobalt (Co) and nickel (Ni), and is easy to prepare high-toughness cemented carbide.

Adapt to various sintering processes to meet different needs from precision tools to mining drill bits.

3. Specifications of CTIA GROUP LTD Tungsten Carbide Powder

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC06-07	0.6-0.7	5.90-6.18	≤0.05	≤0.15	Ultra-fine cutting tools, coatings
WC08-10	0.8-1.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.15	Precision cutting tools
WC20-25	2.0-2.5	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	General Carbide
WC50-60	5.0-6.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Mining tools
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

Category Brand	Fisher particle size (μm)	Total carbon (wt %)	Free carbon (wt %)	Oxygen content (wt %)	Typical Applications
WC300-450	30.0-45.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	Extra coarse impact tool
Remark	Impurity content (Fe, Mo, Si, etc.) meets standard limits , special particle size or special requirements can be customized according to customer needs.				

4. Production Process of Tungsten Carbide Powder

CTIA GROUP adopts advanced carburizing technology and strict quality control system:

Raw materials: high-purity tungsten powder (purity ≥99.95%) and high-quality carbon black.

Carbonization: React in a high temperature vacuum furnace at 1400-1600°C to ensure complete carbonization and uniform grains.

Crushing and screening: Through air flow crushing and multi-stage screening, the particle size distribution can be precisely controlled.

Quality inspection: Based on GB/T 5124 (chemical analysis), GB/T 1482 (Ferris particle size) and other methods to ensure that each batch meets the standards.

5. Quality Assurance of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Standard compliance: Strictly implement GB/T 26050-2010, each batch of products comes with a quality certificate, including chemical composition, particle size and appearance test results.

Factory inspection: total carbon, free carbon, impurity elements such as Fe, O content , particle size, appearance , physical properties (such as loose density).

Sampling: According to GB/T 5314, uniform sampling is conducted from each batch (1-5 tons) to ensure representativeness.

6. Packaging and Transportation of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Inner packaging: sealed plastic bag or vacuum packed to prevent oxidation.

Outer packaging: iron drum or plastic drum, net weight 25kg or 50kg (customized according to requirements).

Marking: Indicate product name, brand, batch number and production date.

Transportation and storage: Moisture-proof and shock-proof, stored in a dry and ventilated warehouse, shelf life is 12 months.

7. Application Fields of CTIA GROUP Tungsten Carbide Powder

Cutting tools: Ultrafine grain (WC06-07) is used for high-speed precision cutting tools with high hardness and strong wear resistance.

Mining tools: Coarse grains (WC50-60 and above) are used for drill bits and impact-resistant parts with excellent toughness.

Wear-resistant coating: Fine grain (WC08-10) is used for thermal spraying to improve surface properties.

Aerospace: Medium grain (WC20-25) is used for high temperature wear-resistant parts.

Other fields and special purposes: welcome to negotiate and customize.

8. Contact Information of CTIA GROUP

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

CTIA GROUP is committed to providing customers with high-quality tungsten carbide powder and technical support.

For more information or customized products, please contact:

Email: sales@chinatungsten.com Tel: +86 592 5129595

Website: www.tungsten-powder.com for more industry information and technical parameters.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT
Copyright© 2024 CTIA All Rights Reserved