

Порошок карбида вольфрама (ТСР)

Физические и химические свойства, получение и применение

中钨智造科技有限公司

CTIA GROUP LTD

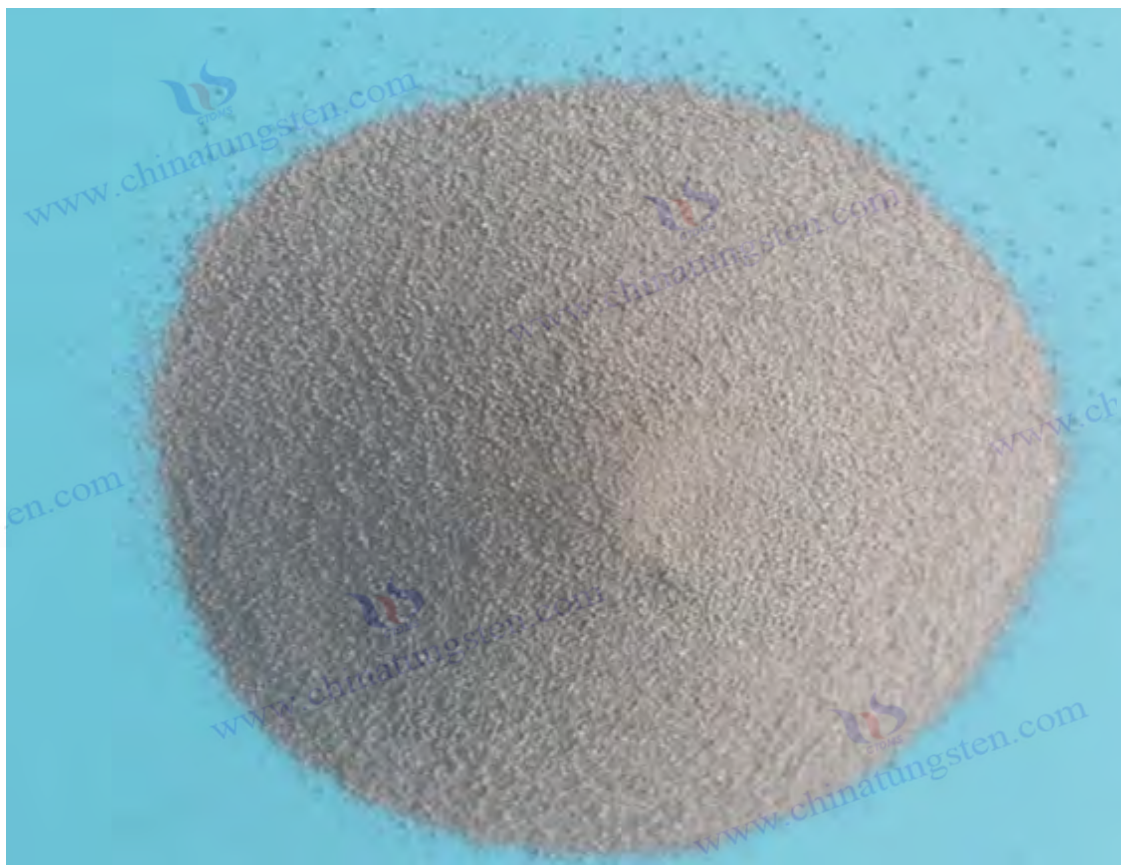
CTIA GROUP LTD

Мировой лидер в области интеллектуального производства для вольфрамовой,
молибденовой и редкоземельной промышленности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Оглавление

Предисловие

Значение и предпосылки исследования порошка карбида вольфрама
Цели и аудитория этой книги
Обзор метода и содержания письма

Глава 1: Введение в порошок карбида вольфрама

- 1.1 Определение и химический состав
- 1.2 Историческое развитие
- 1.3 Основные физико-химические свойства
- 1.4 Классификация порошка карбида вольфрама

Глава 2: Процесс производства порошка карбида вольфрама

- 2.1 Подготовка сырья
- 2.2 Традиционный метод карбонизации
- 2.3 Метод химического осаждения из паровой фазы (CVD)
- 2.4 Метод механического легирования
- 2.5 Другие новые технологии
- 2.6 Технология постобработки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Глава 3: Микроструктура и технология определения характеристик порошка карбида вольфрама

- 3.1 Характеристики микроструктуры
- 3.2 Методы характеристики
- 3.3 Анализ химического состава
- 3.4 Тест физических свойств

Глава 4: Области применения порошка карбида вольфрама (ключевые главы)

Обзор

Универсальность и ценность применения порошка карбида вольфрама

Структура главы и методы исследования

Источник данных и анализ случаев

4.1 Производство твердого сплава

4.1.1 Режущие инструменты

4.1.1.1 Токарные инструменты и фрезы

Формула WC-Co (содержание кобальта 6%-12%) и производительность резки Данные: Скорость резки увеличена на 50% (по сравнению с быстрорежущей сталью, >200 м/мин) Случай: Обработка блока цилиндров автомобильного двигателя (срок службы > 100 000 шт.)

4.1.1.2 Сверла и буровой инструмент

Микронный порошок WC (1-3 мкм) при обработке глубоких отверстий. Характеристики: Твердость HV 1600, стойкость к скалыванию >12 МПа·м^{1/2}. Технология: Многослойное покрытие сверла WC- TiC (износостойкость увеличена в 3 раза).

4.1.1.3 Специальные режущие инструменты

Микросверло для печатных плат (диаметр < 0,1 мм) и инструменты для обработки сверхтвердых материалов Процесс спекания (1450°C, HIP) нанопорошка WC (<100 нм) Случай: Обработка авиационных композитных материалов (точность ±0,005 мм)

4.1.2 Износостойкие детали

4.1.2.1 Штампы для штамповки

Применение штампов на основе WC при холодной штамповке стальных пластин Данные: Срок службы > 500 000 раз (в 5 раз выше, чем у Cr12MoV) Технология: спекание WC-Co (1500°C, 30 МПа)

4.1.2.2 Волоочильная и экструзионная матрица

Тонкий порошок WC (0,5-1 мкм) при волочении медной проволоки. Характеристики: Шероховатость поверхности Ra < 0,02 мкм , скорость износа < 0,001 мм³/ Н·м. Случай: Волоочильный станок для проволоки в кабельной промышленности (непрерывная работа > 6 месяцев).

4.1.2.3 Износостойкие подшипники и уплотнения

Применение композиционных материалов WC-Ni в высокоскоростных подшипниках Данные: Коэффициент трения <0,1, термостойкость >800°C Технология: Оптимизация процесса горячего изостатического прессования (HIP)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1.3 Инструменты для точной обработки

4.1.3.1 Стоматологические и медицинские инструменты

Микрообработка порошка WC на стоматологических сверлах (диаметр 0,3-1 мм) Свойства: Твердость HV 1800, биосовместимость (ISO 10993-5) Случай: Сверло для стоматологической хирургии (долговечность > 1000 раз)

4.1.3.2 Оптическая форма

Применение ультратонкого порошка WC в формах для стеклянных линз Данные: Точность поверхности <10 нм, срок службы >100 000 циклов прессования Технология: Зеркальная полировка в сочетании с покрытием WC

4.2 Технология нанесения покрытия на поверхность

4.2.1 Термическое напыление покрытия

4.2.1.1 Высокоскоростное газопламенное напыление

Применение порошка WC-Co (10%-12% Co) в износостойком покрытии Данные: твердость покрытия HV 1200-1400, скорость износа <0,01 мм³/ Н·м Случай: Лопатки авиационных двигателей (срок службы > 3000 часов)

4.2.1.2 Газопламенное напыление

Применение порошка WC-Ni в недорогом износостойком покрытии Характеристики: Прочность сцепления >50 МПа, толщина 100-300 мкм Случай: Лопасти сельскохозяйственной техники (стойкость к износу увеличена в 4 раза)

4.2.2 Плазменное напыление и лазерная наплавка

4.2.2.1 Плазменное напыление

Композитное покрытие WC-Cr₃C₂ с высокой коррозионной стойкостью Данные: Стойкость к окислению >1000°C, пористость <2% Случай: Лопатки газовых турбин (эксплуатация > 5000 часов)

4.2.2.2 Лазерная наплавка

Укрепление поверхности нефтяного бурового инструмента порошком WC Характеристики: толщина покрытия 0,5-2 мм, твердость HV 1300 Случай: Глубоководная бурильная труба (срок коррозионной стойкости > 2 лет)

4.2.3 Устойчивость к высоким температурам и специальное покрытие

4.2.3.1 Покрытие, устойчивое к термическому удару

Применение покрытий на основе WC в высокотемпературных формах Данные: Коэффициент термического расширения <5×10⁻⁶/°C, термостойкость >1200°C Технология: Композитное покрытие WC- TiC -Ni

4.2.3.2 Химически стойкое покрытие

Коррозионная стойкость покрытия WC-CoCr в химических трубопроводах Случай: Клапаны в кислых средах (срок службы > 3 лет)

4.3 Инструменты для горнодобывающей промышленности и строительства

4.3.1 Инструменты для бурения горных пород

4.3.1.1 Буровые коронки для твердых пород

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение буровых коронок с инкрустацией WC при добыче гранита Данные: Ударная вязкость $>25 \text{ Дж/см}^2$, скорость бурения $>12 \text{ м/ч}$ Случай: Бурение подрывных работ (срок службы $>1000 \text{ м}$)

4.3.1.2 Инструменты для бурения угольных пластов

Режущая головка WC-Co в выемке угля. Характеристики: Твердость HV 1500, износостойкость $<0,002 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. Технология: Усиление композитом WC- TiC.

4.3.2 Щитовые резак и проходческое оборудование

4.3.2.1 Режущая головка щита метро

Применение режущих инструментов на основе WC в песчаниковых пластах Данные: Срок службы резца $>6000 \text{ м}$, износостойкость увеличена в 2 раза Пример: Проект городского тоннеля (цикл замены $>1 \text{ года}$)

4.3.2.2 Туннелепроходческий резак для твердых грунтов

WC- TiC в базальте Характеристики: Трещиностойкость $>15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ Технология: Оптимизация спекания сверхтвердого порошка WC

4.3.3 Износостойкая футеровка и дробильное оборудование

4.3.3.1 Футеровка шаровой мельницы

Применение армированной футеровки WC при измельчении руды Данные: Скорость износа $<0,05 \text{ г/т}$, срок службы $>2 \text{ лет}$ Пример: Переработка железной руды (повышение эффективности на 30%)

4.3.3.2 Дробильный молоток

Износостойкость молота WC-Co при дроблении известняка Характеристики: Ударная прочность $>100\,000 \text{ раз}$

4.4 Электроника и энергетика

4.4.1 Проводящие покрытия и электродные материалы

4.4.1.1 Электроды топливных элементов

Электропроводность порошка WC в топливных элементах PEM Данные: Удельное сопротивление $<10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, циклическая стабильность $>10\,000 \text{ раз}$ Технология: PVD-осаждение тонкой пленки WC

4.4.1.2 Токосъемник литиевой батареи

Прочность покрытия WC на алюминиевой фольге Показатели: Адгезия $>20 \text{ Н/см}$, коррозионная стойкость увеличена в 2 раза Случай: Аккумулятор электромобиля (степень сохранения емкости $>90\%$)

4.4.2 Носитель катализатора

4.4.2.1 Катализ водородного топлива

Применение порошка Nano-WC ($<50 \text{ нм}$) в электролизе воды Данные: Каталитическая активность $>95\%$ (по сравнению с Pt/C) Технология: Композитный катализатор WC-Pt

4.4.2.2 Химический катализ

Стабильность носителей на основе WC в синтезе аммиака Характеристики: термостойкость $>600^\circ\text{C}$, срок службы $>5000 \text{ часов}$

4.4.3 Хранение энергии и управление температурным режимом

4.4.3.1 Суперконденсатор

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Удельная емкость электродных материалов на основе WC (>250 Ф/г) Данные: Циклический ресурс > 8000 раз Случай: Новая система хранения энергии

4.4.3.2 Терморегулирующее покрытие

Применение WC-покрытия для рассеивания тепла в светодиодах. Характеристики: Теплопроводность >120 Вт/м·К

4.5 Аэрокосмические и военные применения

4.5.1 Турбинные лопатки и сопла

4.5.1.1 Лопатки авиационных двигателей

Применение покрытия WC-Co для износостойкости при высоких температурах Данные: Термостойкость $>1300^{\circ}\text{C}$, срок службы >4000 часов Случай: Турбореактивный двухконтурный двигатель (тяговая эффективность увеличена на 5%)

4.5.1.2 Сопло ракеты

Применение термостойкого покрытия на основе WC в твердотопливных ракетах Характеристики: Стойкость к абляции $<0,01$ мм/с

4.5.2 Материалы брони

4.5.2.1 Броня танка

Противопульные характеристики композитной керамической брони WC Данные: Твердость >2200 HV, стойкость к пробитию >1200 м/с Случай: Защита основного боевого танка (толщина <50 мм)

4.5.2.2 Плагин бронежилета

Применение легкого основания WC Характеристики: Вес <2 кг/м², уровень защиты NIJ IV

4.5.3 Износостойкие детали космических аппаратов

4.5.3.1 Бортовое оборудование

Износостойкость покрытий WC в шарнирах спутников Данные: Коэффициент трения $<0,05$, срок службы >10 лет Технология: Процесс вакуумного PVD

4.6 Другие новые приложения

4.6.1 3D-печать и аддитивное производство

4.6.1.1 Печать металлических деталей

Применение порошка WC-Co в SLM (селективное лазерное плавление). Данные: плотность $>99\%$, точность $\pm 0,02$ мм. Случай: быстрое прототипирование авиационных деталей.

4.6.1.2 Изготовление пресс-форм

Преимущества порошка Nano WC в производстве форм для 3D-печати: Твердость поверхности HV 2000

4.6.2 Биомедицинские материалы

4.6.2.1 Ортопедические имплантаты

Износостойкость покрытия WC в тазобедренном суставе Данные: Скорость износа $<0,001$ мм³/Н·м, выживаемость клеток $>98\%$ Технология: Композитное покрытие WC-Ti

4.6.2.2 Реставрация зубов

Материалы на основе WC в зубных коронках Характеристики: прочность на излом >1000 МПа

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.6.3 Интеллектуальное производство и датчики

4.6.3.1 Датчик высокой температуры

Стабильность порошка WC в промышленных датчиках Данные: Термостойкость > 1000°C, время отклика < 1 мс Случай: Мониторинг сталеплавильной печи

4.7 Примеры применения и анализ данных

4.7.1 Сводная таблица отраслевых приложений

Сравнение данных в областях твердого сплава, покрытий, горнодобывающей промышленности, электроники и т. д.

4.7.2 Сравнительный анализ производительности

Основные показатели, такие как твердость, износостойкость, срок службы и т. д. (по сравнению с традиционными материалами)

4.7.3 Успешные примеры

Примеры применения на мировом уровне (например, Sandvik, Kennametal)

4.8 Перспективы будущего применения

4.8.1 Потенциал в новых областях

Компоненты охлаждения квантовых вычислений Гибкий электронный проводящий слой

4.8.2 Технические проблемы и решения

Улучшение дисперсии порошка Nano-WC Улучшение стабильности высокотемпературных покрытий

4.8.3 Прогноз рынка

Темпы роста спроса в 2030 году >6%, анализ ключевых направлений

Глава 5: Контроль качества и стандарты порошка карбида вольфрама

5.1 Ключевые моменты контроля качества

5.2 Международные стандарты

5.3 Внутренние стандарты

5.4 Сравнение стандартов и применимость

Глава 6: Оптимизация производительности и модификация порошка карбида вольфрама

6.1 Оптимизация размера частиц

6.2 Легирование и модификация композита

6.3 Технология модификации поверхности

6.4 Термическая обработка и отжиг

Глава 7: Вопросы охраны окружающей среды и безопасности при использовании порошка карбида вольфрама

7.1 Воздействие на окружающую среду в процессе производства

7.2 Требования к безопасности эксплуатации

7.3 Переработка и вторичная переработка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глава 8: Рынок и тенденции развития порошка карбида вольфрама

- 8.1 Обзор мирового рынка
- 8.2 Тенденции развития технологий
- 8.3 Перспективы будущего применения

Глава 9: Терминология, стандарты и ресурсы

- 9.1 Глоссарий терминов, относящихся к порошку карбида вольфрама
- 9.2 Ссылки и стандарты
- 9.3 Рекомендуемые ресурсы

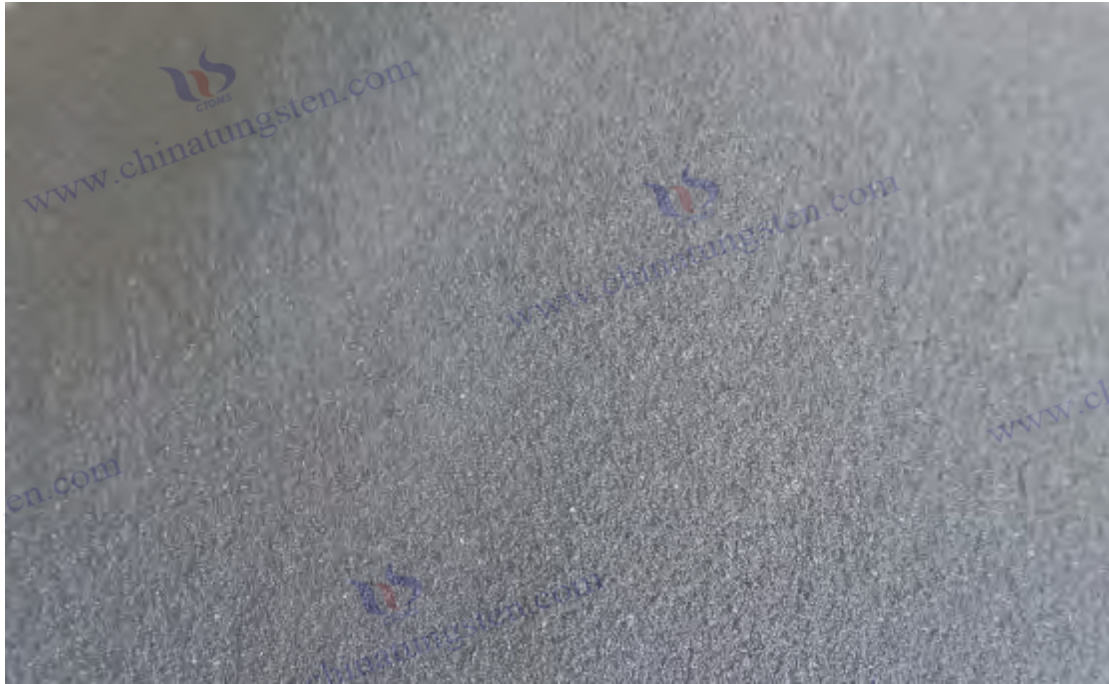
Приложение

- Приложение А: Микроструктура и анализ характеристик порошка карбида вольфрама
- Приложение В: Стандарты размеров частиц и параметров приготовления порошка карбида вольфрама
- Приложение С: Сравнение международных и отечественных стандартов, касающихся порошка карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Предисловие

Как функциональный материал с превосходными характеристиками, порошок карбида вольфрама (WC) стал краеугольным камнем в современной промышленности и передовых технологиях благодаря своей твердости до HV 2000-2500, износостойкости в 10-20 раз лучше, чем у традиционной стали, и температуре плавления до 2870 °C. Его гексагональная кристаллическая структура (постоянная решетки $a = 2,906 \text{ \AA}$, $c = 2,837 \text{ \AA}$) и высокая плотность ($15,63 \text{ г/см}^3$) придают ему непревзойденную механическую прочность и химическую стабильность, что делает его незаменимым в производстве твердого сплава, технологии нанесения поверхностных покрытий, горнодобывающих инструментов, электронной энергетике, аэрокосмической и даже биомедицинской областях.

От острых лезвий промышленных ножей до термостойких покрытий авиационных двигателей, от эффективных катализаторов топливных элементов до прецизионных форм 3D-печати — порошок карбида вольфрама постоянно расширяет границы материаловедения и инноваций промышленных технологий благодаря своей универсальности и высокой производительности. История открытия и применения порошка карбида вольфрама восходит к химическим исследованиям вольфрама в конце 19 века. В 1893 году французский химик Анри Муассан впервые синтезировал карбид вольфрама посредством реакции высокотемпературной цементации, но в то время это был только лабораторный продукт и не имел промышленного применения.

Настоящий прорыв произошел в 1920-х годах, когда немецкий металлург Карл Шретер обнаружил, что спекание порошка карбида вольфрама с порошком кобальта (Co) ($1450-1600 \text{ °C}$, $10-20 \text{ МПа}$)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

может производить твердый сплав с твердостью, близкой к твердости алмаза (HV 1500-1800) при изучении твердых материалов на основе вольфрама. Это изобретение было запатентовано Osgam в Германии в 1923 году и внедрено в промышленность в 1926 году Rheinmetall в Германии для производства режущих инструментов. Впоследствии твердый сплав из карбида вольфрама вышел на рынок под торговой маркой «Widia» (по-немецки «Wie Diamant», что означает «как алмаз»), быстро заменив традиционную быстрорежущую сталь и открыв эру твердого сплава. Исследования порошка карбида вольфрама в Китае начались в 1950-х годах. В 1958 году завод по производству цементированного карбида в Чжучжоу успешно провел испытания первой партии цементированного карбида WC-Co, заполнив внутренний пробел. С тех пор, опираясь на богатые ресурсы вольфрама в Китае (составляющие около 60% мировых запасов, источник данных: USGS 2023), применение порошка карбида вольфрама быстро расширилось в промышленности Китая, охватывая такие области, как машиностроение, горнодобывающая промышленность и национальная оборона.

Вступая в 21 век, с развитием нанотехнологий, поверхностной инженерии и интеллектуального производства, область применения порошка карбида вольфрама еще больше расширилась. По данным CTIA GROUP в 2023 году мировой годовой спрос на порошок карбида вольфрама превысил 60 000 тонн, а объем рынка, как ожидается, превысит 5 миллиардов долларов США к 2030 году со средним годовым темпом роста около 6,5%. Его производственный процесс эволюционировал от традиционного метода высокотемпературной карбонизации (1800-2000 °C, время карбонизации 2-4 часа) до химического осаждения из паровой фазы (CVD, скорость осаждения 0,1-1 мкм /мин), механического легирования (время шаровой мельницы 20-50 часов, размер зерна <50 нм) и других передовых технологий. Размер частиц был уменьшен с микронного уровня (1-5 мкм) до нанометрового уровня (<100 нм), а удельная площадь поверхности была увеличена до 20-50 м²/г, что значительно повысило эксплуатационные характеристики и потенциал применения материала.

Как автор этой книги, CTIA GROUP LTD ([CTIA GROUP](#)) и CTIA GROUP ([China Tungsten Online](#)) были основаны в 1997 году и имеют штаб-квартиру в Сямыне, Китай. Это высокотехнологичные предприятия, сосредоточенные на исследованиях и разработках, производстве и продаже вольфрамовой продукции. С глубоким пониманием китайской вольфрамовой промышленности и более чем 20-летним техническим накоплением, мы стремимся продвигать инновации и применение порошка карбида вольфрама. Мы глубоко убеждены, что систематическое объединение порошка карбида вольфрама в текущей технической литературе все еще недостаточно, особенно отсутствие всеобъемлющей интеграции от базовой науки до передовых приложений. С этой целью данная книга направлена на то, чтобы предоставить академическим исследователям, промышленным практикам и техническим разработчикам авторитетный, подробный и практический справочный материал, чтобы помочь читателям глубоко понять характеристики, процесс производства, технологию анализа и разнообразные применения порошка карбида вольфрама, и в то же время предоставить научную основу и практическое руководство для будущих технологических прорывов. Эта книга представляет собой не только

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

резюме теоретических знаний, но и кристаллизацию нашего многолетнего практического опыта в области порошка карбида вольфрама.

Целевая аудитория этой книги: исследователи в области материаловедения и машиностроения, которые занимаются микроструктурой (размер зерна 10–50 нм) и оптимизацией характеристик (например, вязкость разрушения $> 15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) порошка карбида вольфрама; инженеры в металлургической, машиностроительной и горнодобывающей промышленности, которые ищут решения для повышения срока службы инструмента (износостойкость увеличивается в 5–10 раз) и эффективности; специалисты-практики в области электроники, энергетики и биомедицины, которые изучают применение порошка карбида вольфрама в токопроводящих покрытиях (удельное сопротивление $< 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{см}$), носителях катализаторов (удельная поверхность $> 50 \text{ м}^2 / \text{г}$), а также студенты и технические специалисты, интересующиеся технологией материалов, которые хотят систематически овладеть основными знаниями в этой области. Кроме того, в этой книге содержится информация об отраслевых тенденциях для лиц, принимающих корпоративные решения, и аналитиков рынка, например, прогнозы мирового спроса и направления развития технологий.

С точки зрения методов написания эта книга принимает междисциплинарную перспективу, интегрируя последние достижения материаловедения, химической инженерии, машиностроения и прикладной физики. С точки зрения структуры содержания главы 1–3 знакомят с основными характеристиками, процессом производства и микроструктурным анализом порошка карбида вольфрама (например, положение пика XRD $2\theta=35,6^\circ$ соответствует кристаллической плоскости WC(100)); Глава 4, как фокус книги, подробно обсуждает его применение в цементированном твердом сплаве (твердость HV 1500–2000), поверхностном покрытии (прочность связи $> 70 \text{ МПа}$), горнодобывающем инструменте (ударная вязкость $> 25 \text{ Дж/см}^2$) и других областях, вплоть до конкретных сценариев и технических данных; Главы 5–6 фокусируются на контроле качества (например, распределении размеров частиц $\text{RSD} < 5\%$), стандартах и оптимизации производительности (например, легировании Со для повышения прочности); Главы 7–8 посвящены воздействию на окружающую среду (например, выбросам пыли $< 10 \text{ мг/м}^3$), соображениям безопасности и тенденциям рынка; Глава 9 содержит глоссарий и поддержку ресурсов; приложение дополняет микроанализ (разрешение SEM/TEM $< 1 \text{ нм}$), стандарты размера частиц и сравнения спецификаций. Книга широко цитирует международные стандарты (например, ISO 4499-2:2020, ASTM B430-19), внутренние спецификации (например, GB/T 4295-2008) и новейшую литературу (например, статью 2023 года в Journal of Materials Science), а также дополняет экспериментальными данными, микроскопическими изображениями и анализами случаев для обеспечения научности и практичности содержания.

На волне глобального зеленого развития перспективы применения порошка карбида вольфрама становятся все шире. CTIA GROUP надеется предоставить читателям исчерпывающие технические ссылки и инновационные идеи с помощью этой книги. Мы благодарим Ассоциацию вольфрамовой промышленности Китая, Институт материалов Китайской академии наук и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Международную ассоциацию вольфрамовой промышленности (ITIA) за их поддержку и с нетерпением ждем ценных комментариев читателей для постоянного улучшения этой книги.

CTIA GROUP LTD

Апрель 2025 г.

Сямэнь, Китай

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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.

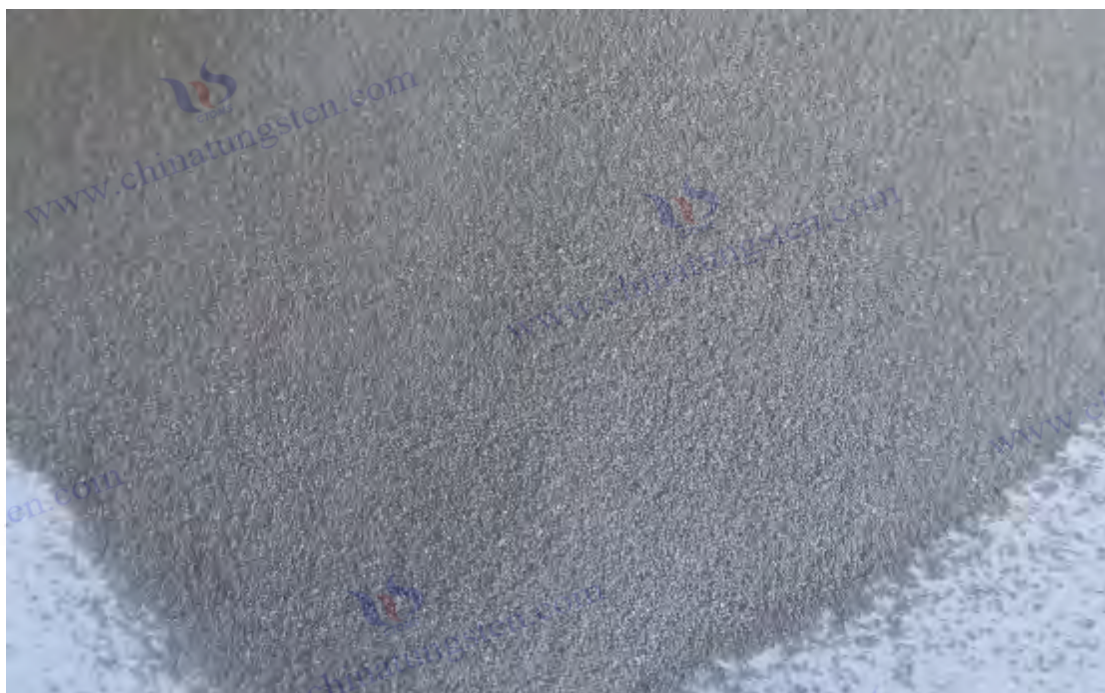
8. Contact Information of CTIA GROUP

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.



Глава 1: Введение в порошок карбида вольфрама

Как высокопроизводительный функциональный материал, порошок карбида вольфрама (WC) занимает центральное место в промышленном производстве, научных исследованиях и передовых технологических областях благодаря своей твердости, износостойкости и высокотемпературной стабильности. Его уникальные физические и химические свойства делают его незаменимым материалом в цементированном твердом сплаве, поверхностных покрытиях, горнодобывающих инструментах и даже в областях электронной энергетики. Начиная с определения и химического состава порошка карбида вольфрама, эта глава всесторонне объясняет его физические и химические свойства, классифицирует его в соответствии с национальными стандартами и международными спецификациями и глубоко исследует его связь с порошком вольфрама, а также ключевое влияние содержания углерода на производительность. Благодаря богатым экспериментальным данным и опыту применения эта глава предоставляет читателям полную структуру знаний о порошке карбида вольфрама, закладывая прочную основу для последующих глав.

1.1 Определение и химический состав порошка карбида вольфрама

металла, состоящий из вольфрама (W) и углерода (C) в атомном соотношении 1:1. Его химическая формула - WC, а его молекулярный вес - 195,85 г/моль. Его кристаллическая структура представляет собой простую гексагональную систему (пространственная группа $P6m2$) с постоянными решетками $a = 2,906 \text{ \AA}$, $c = 2,837 \text{ \AA}$ и отношением c/a 0,976 (JCPDS 51-0939). В этой структуре атомы вольфрама образуют гексагональный плотно упакованный скелет, а атомы углерода заполняют октаэдрические промежутки и связаны прочными ковалентно-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлическими связями. Эта структура придает порошку карбида вольфрама чрезвычайно высокую твердость и устойчивость к деформации, что делает его представителем твердых материалов.

Теоретическое содержание углерода в порошке карбида вольфрама составляет 6,13% (массовая доля), что соответствует атомам углерода, полностью находящимся в химически связанном состоянии. В промышленном производстве содержание углерода обычно контролируется на уровне 6,10% -6,18%, чтобы обеспечить чистоту однофазного WC и избежать образования W₂C или свободного углерода. Например, GB/T 4295-2008 предусматривает, что отклонение общего содержания углерода в порошке карбида вольфрама высокой чистоты не должно превышать $\pm 0,05\%$, содержание примесей (таких как Fe, Ni, Cr) должно быть менее 0,01%, а содержание кислорода контролируется в пределах 50-200 ppm. В практическом применении порошок карбида вольфрама можно разделить на однофазный порошок WC и порошок составной фазы (такой как WC-Co, WC- TiC). Последний легируется кобальтом (5–15 %) или карбидом титана для повышения прочности или коррозионной стойкости и широко используется при изготовлении режущих инструментов и износостойких деталей.

1.2 Физические свойства порошка карбида вольфрама

1.2.1 Кристаллическая структура и морфология порошка карбида вольфрама

Гексагональная структура порошка карбида вольфрама является микроскопической основой его превосходных характеристик. Анализ рентгеновской дифракции (XRD) показывает, что его характерные пики расположены при $2\theta = 35,641^\circ$ (100 кристаллическая плоскость, $d = 2,518 \text{ \AA}$), $48,298^\circ$ (101 кристаллическая плоскость, $d = 1,883 \text{ \AA}$) и $31,514^\circ$ (001 кристаллическая плоскость, $d = 2,837 \text{ \AA}$), а соотношение интенсивности пиков соответствует стандартному спектру однофазного WC (JCPDS 51-0939). Размер зерна варьируется в зависимости от процесса приготовления. Размер зерна продукта традиционного метода высокотемпературной цементации составляет 1-5 мкм. Механическое легирование или химическое осаждение из паровой фазы (CVD) могут приготовить наноразмерный порошок карбида вольфрама <100 нм. Наблюдения с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) показывают, что частицы порошка карбида вольфрама микронного размера имеют неправильную полиэдрическую морфологию, острые края и шероховатость поверхности Ra около 0,1-0,5 мкм; в то время как наноразмерный порошок карбида вольфрама имеет тенденцию быть почти сферическим с удельной площадью поверхности 20-50 м²/г (измерено методом БЭТ). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) далее показывает, что внутри наночастиц WC имеется небольшое количество дефектов границ зерен, а расстояние между решеточными бахромами согласуется с результатами рентгеновской дифракции.

1.2.2 Плотность порошка карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Теоретическая плотность порошка карбида вольфрама составляет $15,63 \text{ г/см}^3$ (25°C), что рассчитывается из его гексагонального единичного объема ($V=21,38 \text{ \AA}^3$) и молекулярной массы. Фактический промышленный порошок имеет немного более низкую плотность из-за микропор или примесей, обычно $15,5\text{-}15,6 \text{ г/см}^3$ (определяется методом Архимеда, точность $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$). Плотность немного меняется в зависимости от размера зерна, но плотность может достигать более 99,5% после спекания. Высокая плотность позволяет порошку карбида вольфрама обеспечивать превосходную прочность на сжатие в твердом сплаве. Например, прочность на сжатие твердого сплава WC-Co может достигать 4000-6000 МПа, что намного превышает прочность традиционной стали (800-1500 МПа). В покрытиях высокая плотность также повышает износостойкость.

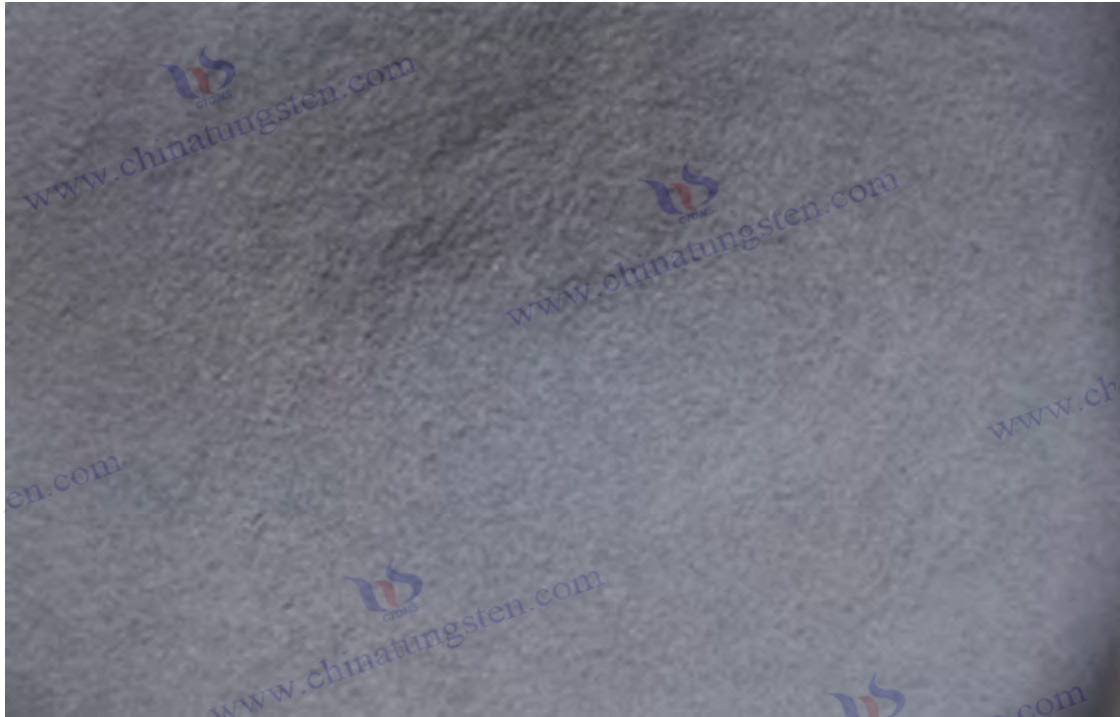
1.2.3 Твердость порошка карбида вольфрама

Твердость по Виккерсу (HV) порошка карбида вольфрама составляет от 2000 до 2500 (нагрузка 1 кг, стандарт ASTM E384), что близко к твердости природного алмаза (HV 10 000) и намного выше, чем у быстрорежущей стали (HV 600-800) или оксида алюминия (HV 1500-1800). Твердость увеличивается с уменьшением размера зерна. Например, твердость WC с зернами размером 1 мкм составляет около HV 2200, в то время как нано WC с $<100 \text{ нм}$ может достигать HV 2600-2800, что объясняется эффектом упрочнения границ зерен (соотношение Холла-Петча). Эксперименты показывают, что после легирования 5%-10% кобальта твердость немного снижается до HV 1500-1800, но ударная вязкость значительно улучшается (ударная вязкость K_{IC} увеличивается с $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $12\text{-}15 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Стабильность твердости делает ее превосходной для режущих инструментов и износостойких деталей.

1.2.4 Температура плавления и термическая стабильность порошка карбида вольфрама

Температура плавления порошка карбида вольфрама составляет 2870°C (литературное значение $2867\text{-}2875^\circ\text{C}$, определено методом дифференциального термического анализа), что является одним из самых высоких значений среди карбидов металлов. Выше 2600°C WC начинает разлагаться, реакция имеет вид: $2\text{WC} \rightarrow \text{W}_2\text{C} + \text{C}$. Твердость продукта разложения W_2C уменьшается (HV 1600-2000), а свободный углерод влияет на последующее спекание. Теплопроводность составляет $84 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$ (25°C), которая несколько уменьшается до $70 \text{ Вт/м} \cdot \text{K}$ (1000°C) с ростом температуры; коэффициент теплового расширения составляет $4,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ($25\text{-}1000^\circ\text{C}$), что ниже, чем у вольфрама ($4,8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) и стали ($12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$). Это низкое тепловое расширение и высокая теплопроводность позволяют ему сохранять структурную целостность в высокотемпературных средах (например, покрытия авиационных двигателей, $>1200^\circ\text{C}$). Термогравиметрический анализ (ТГА) показывает, что порошок карбида вольфрама не имеет значительной потери массы до 2000°C в инертной атмосфере (Ar).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



1.2.5 Электрические и магнитные свойства порошка карбида вольфрама

Удельное сопротивление порошка карбида вольфрама составляет $19,2 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (25°C , измерено четырехзондовым методом), имеет определенную проводимость, но ниже, чем у чистого вольфрама ($5,5 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$) или меди ($1,68 \times 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Удельное сопротивление увеличивается с температурой и составляет около 25×10^{-8} при 1000°C . $\text{Ом} \cdot \text{м}$, что указывает на то, что он обладает полупроводниковыми свойствами. Магнитная восприимчивость составляет $1,2 \times 10^{-6} \text{ см}^3 / \text{моль}$ (комнатная температура, измерено с помощью вибрационного магнитометра VSM), что является слабым парамагнитным веществом, немного выше, чем у чистого вольфрама ($0,3 \times 10^{-6} \text{ см}^3 / \text{моль}$), но намного ниже, чем у ферромагнитных материалов (таких как Fe, $2,2 \times 10^{-3} \text{ см}^3 / \text{моль}$). Низкий магнетизм делает его менее восприимчивым к помехам магнитного поля в электронных устройствах (таких как электроды топливных элементов).

1.3 Химические свойства порошка карбида вольфрама

1.3.1 Химическая стабильность порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама демонстрирует превосходную химическую стабильность при комнатной температуре. Эксперименты показывают, что он не имеет очевидной потери массы ($<0,01\%$) после погружения в 37% HCl, 98% H_2SO_4 или 10% раствор NaOH в течение 1000 часов, что указывает на его сильную устойчивость к кислотной и щелочной коррозии. Однако в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотемпературной сильной окисляющей кислоте (такой как 70% HNO_3 , 60°C) порошок карбида вольфрама медленно растворяется, и реакция выглядит следующим образом: $\text{WC} + 10\text{HNO}_3 \rightarrow \text{WO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2\text{O} + 10\text{NO}_2$, а скорость растворения составляет около $0,05 \text{ г/м}^2 \cdot \text{ч}$. Эта стабильность делает его пригодным для химических покрытий трубопроводов и износостойких деталей в кислых средах.

1.3.2 Окислительное поведение порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама начинает окисляться при 600-800 °C в атмосфере кислорода, и реакция выглядит следующим образом: $2\text{WC} + 5\text{O}_2 \rightarrow 2\text{WO}_3 + 2\text{CO}_2$. Термогравиметрический анализ (ТГА) показывает, что прирост веса при окислении составляет 5%-10% при 700 °C, и он полностью превращается в WO_3 (желтый порошок, температура плавления 1473 °C) при 1000 °C. Скорость окисления связана с размером частиц. Наномасштабный WC (<100 нм) имеет большую удельную площадь поверхности, а начальная температура окисления снижается до 550 °C, в то время как микромасштабный WC (1-5 мкм) более стабилен. Продукт окисления WO_3 имеет низкую летучесть, но частично улетучивается при >1200 °C, влияя на нанесение покрытия.

1.3.3 Коррозионная стойкость порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама обладает превосходной коррозионной стойкостью в кислых или нейтральных водных растворах. Например, в жидкости для моделирования морской воды (3,5% NaCl) с pH 2-7 скорость коррозии составляет <0,001 мм/год за 500 часов. Однако в высокотемпературных щелочных средах (таких как расплавленный NaOH, 550°C) порошок карбида вольфрама быстро корродирует и реагирует с образованием растворимого вольфрамата (Na_2WO_4). Это свойство позволяет ему хорошо работать в морской технике (например, в качестве покрытия для бурового инструмента), но его следует использовать с осторожностью в щелочных плавильных средах.

1.3.4 Реакция порошка карбида вольфрама с другими элементами

Порошок карбида вольфрама реагирует с газообразным фтором (F_2) при температуре выше 500 °C, образуя WF_6 (температура кипения 17,1 °C) и свободный углерод, а реакция выглядит следующим образом: $\text{WC} + 3\text{F}_2 \rightarrow \text{WF}_6 + \text{C}$. При высоких температурах (>1000 °C) порошок карбида вольфрама образует твердый раствор или композитную фазу с металлами (такими как Fe, Ni, Co). Например, при спекании WC-Co Co плавится при 1400 °C и покрывает частицы WC, образуя связующую фазу. Эта реакционная способность является основой производства твердого сплава, но она также ограничивает его применение в средах с сильными галогенами.

1.4 Классификация порошка карбида вольфрама (согласно национальным стандартам)

Классификация порошка карбида вольфрама основана на китайском национальном стандарте

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 4295-2008 и международном стандарте ISO 4499-2:2020 в сочетании с ASTM B430-19 для дополнения международной перспективы.

1.4.1 Классификация порошка карбида вольфрама по размеру частиц

Крупнозернистый порошок карбида вольфрама (>5 мкм)

Для сменных деталей и горнодобывающего инструмента, насыпная плотность 12-14 г/см³, текучесть 10-15 с/50 г (ISO 4499-2). Типичные области применения включают буровые коронки, ударопрочность >25 Дж/см².

Порошок карбида вольфрама среднего размера (1-5 мкм)

Основной промышленный сорт, подходит для твердосплавных инструментов, площадь поверхности 0,5-2 м²/г (метод БЭТ), твердость HV 2000-2200. GB/T 4295-2008 требует содержания кислорода <200 ppm.

Мелкозернистый порошок карбида вольфрама (0,1-1 мкм)

Для сверхтонкого твердого сплава (например, для микросверления печатных плат), твердость HV 2200-2400, вязкость разрушения > 10 МПа·м^{1/2}. ASTM B430-19 рекомендует распределение размеров частиц RSD $< 3\%$.

Наноразмерный порошок карбида вольфрама ($<0,1$ мкм)

Для прочных покрытий и электронных материалов, площадь поверхности 20-50 м²/г, размер зерна определяется методом просвечивающей электронной микроскопии (<50 нм). ISO 4499-2 рекомендуется для высокоточных применений.

1.4.2 Классификация порошка карбида вольфрама по химическому составу

Однофазный порошок карбида вольфрама WC

Содержание углерода 6,10%-6,18%, чистота $>99,9\%$, содержание кислорода <50 ppm, примеси Fe, Ni $<0,01\%$. Подходит для авиационных покрытий и носителей катализаторов.

Порошок карбида вольфрама, содержащий W₂C

Содержание углерода 5,8%-6,10%, содержание W₂C $<5\%$ (количественный рентгеноструктурный анализ), твердость HV 1600-2000, низкая стоимость, подходит для износостойкой футеровки.

Порошок карбида вольфрама, содержащий свободный углерод

Содержание углерода составляет 6,18%-6,30%, свободного углерода $<0,5\%$ (метод химического титрования), пористость увеличивается после спекания ($>1\%$), используется для термического напыления покрытий.

1.4.3 Классификация порошков карбида вольфрама по области применения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Порошок карбида вольфрама для цементированного карбида

Однородное зерно, содержание кислорода <200 ppm, отклонение общего углерода $\pm 0,05\%$ (GB/T 5314-2011). Типичное применение — режущие инструменты, твердость HV 1500-1800.

Порошок карбида вольфрама для покрытия

Частицы сферические, с текучестью >20 с/50 г, размером частиц 1-10 мкм, используются для HVOF-напыления, твердость покрытия HV 1200-1400.

Порошок карбида вольфрама для катализатора

Наномасштаб, чистота >99,95%, удельная поверхность >50 м²/г, используется для электродов топливных элементов, проводимость >10⁻⁴ См/м.

1.5 Различие и взаимосвязь между порошком карбида вольфрама и порошком вольфрама

1.5.1 Разница между порошком карбида вольфрама и порошком вольфрама

Химический состав

Вольфрамовый порошок представляет собой чистый вольфрам (W, чистота >99,9%, содержание кислорода <100 ppm), а порошок карбида вольфрама — WC (содержание углерода 6,13%).

Физические свойства

Плотность порошка вольфрама 19,25 г/см³, температура плавления 3422°C, твердость HV 300-500, удельное сопротивление $5,5 \times 10^{-8}$ Ом·м; Плотность порошка карбида вольфрама 15,63 г/см³, температура плавления 2870°C, твердость HV 2000-2500, удельное сопротивление $19,2 \times 10^{-8}$ Ом·м.

Использовать

Вольфрамовый порошок используется для изготовления вольфрамовой проволоки, вольфрамового стержня и WC; порошок карбида вольфрама используется для цементированного карбида, покрытия и катализатора. Вольфрамовый порошок устойчив к высоким температурам, но имеет низкую твердость, в то время как порошок карбида вольфрама имеет высокую твердость, но немного меньшую термостойкость.

1.5.2 Взаимосвязь между порошком карбида вольфрама и порошком вольфрама

Вольфрамовый порошок является прямым сырьем для порошка карбида вольфрама и готовится путем реакции карбонизации ($W + C \rightarrow WC$). Промышленный процесс карбонизации осуществляется в атмосфере водорода или аргона при температуре 1800–2000 °C. Источником углерода является высокочистая сажа (чистота >99,9%), а время реакции составляет 2–4 часа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Размер частиц вольфрамового порошка (1–10 мкм) определяет начальную морфологию порошка карбида вольфрама. Например, 5 мкм вольфрамовый порошок карбонизируется для получения 2–5 мкм порошка WC, в то время как порошок вольфрама <1 мкм может использоваться для приготовления субмикронного WC. Процесс карбонизации требует точного контроля количества углерода. Избыточный углерод генерирует свободный углерод (>0,5%), а недостаточное количество углерода образует W₂C (снижение твердости). Эксперименты показывают, что при эффективности карбонизации >98% чистота WC может достигать 99,9%.

1.6 Регулирование, важность, определение и влияние содержания углерода в порошке карбида вольфрама на производительность

1.6.1 Требования к содержанию углерода в порошке карбида вольфрама

GB/T 4295-2008 устанавливает, что общее содержание углерода в порошке карбида вольфрама составляет 6,10% - 6,18%, а свободный углерод - <0,5%; ASTM B430-19 требует отклонения общего содержания углерода ±0,03% и содержания кислорода <100 ppm. ISO 4499-2:2020 также рекомендует, чтобы содержание углерода в высокопроизводительных приложениях (например, в авиации) контролировалось на уровне 6,12% - 6,15% для оптимизации производительности. Превышение диапазона приведет к аномальным фазам, таким как W₂C (углерод <6,10%) или свободный углерод (углерод >6,18%).

1.6.2 Значение содержания углерода в порошке карбида вольфрама

Содержание углерода в порошке карбида вольфрама является ключевым параметром, определяющим его микроструктуру и макроскопические свойства. Теоретическое значение 6,13% обеспечивает полную решетку однофазного WC, а производительность оптимальна в пределах отклонения ±0,05%. Низкое содержание углерода генерирует W₂C, что увеличивает дефекты решетки и снижает твердость; высокое содержание углерода вызывает осаждение свободного углерода, образуя поры (пористость >2%) после спекания, снижая прочность. Промышленные случаи показывают, что прочность на изгиб твердого сплава, полученного из порошка WC, содержащего 0,3% свободного углерода, падает с 2500 МПа до 2000 МПа.

1.6.3 Метод определения содержания углерода в порошке карбида вольфрама

Метод сжигания

Образцы сжигали в высокочастотной индукционной печи (1800–2000 °C, расход кислорода 2–3 л/мин), а содержание CO₂ определяли с помощью инфракрасного детектора с точностью определения общего углерода ±0,01% (GB/T 223.5-2008).

Химическое титрование

Свободный углерод растворяется в смешанной кислоте H₂SO₄ - HNO₃, а затем титруется с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

точностью $\pm 0,02\%$ (ASTM E1019-18).

Анализ РФЭС

Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия различает связанный углерод (284,6 эВ) от свободного углерода (285,0 эВ) с поверхностным разрешением $< 0,1\%$, что применимо к нано-WC.

Термогравиметрический анализ (ТГА)

Определите потерю углерода после окисления и проверьте содержание свободного углерода с точностью $\pm 0,05\%$.

1.6.4 Влияние содержания углерода в порошке карбида вольфрама на производительность

Твёрдость

Твёрдость достигает наивысшей точки (HV 2500), когда содержание углерода составляет 6,13%, и падает до HV 1800, когда оно составляет всего 5,8%. Твёрдость уменьшается примерно на 50 HV на каждый 1% увеличения отношения W_2C .

Твёрдость

При содержании свободного углерода $> 0,5\%$ вязкость разрушения снижается с $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ до $8-10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ из-за ослабления границ зерен порами.

Износостойкость

содержание $W_2C > 5\%$, скорость износа увеличивается с $0,005 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ до $0,015 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ (тест ASTM G65).

Спекаемость

При содержании свободного углерода 0,8% плотность спеченного материала падает с 99,5% до 97%, а прочность на сжатие уменьшается на 20%. Случай: На инструментальном заводе использовался порошок WC, содержащий 0,6% свободного углерода, и срок службы готового изделия сократился на 30%.

Ссылки

Китайские ссылки

- [1] GB/T 4295-2008 Порошок карбида вольфрама Национальное управление по стандартизации Китая 2008
- [2] GB/T 223.5-2008 Сталь и железо. Определение содержания углерода и серы. Национальное управление по стандартизации Китая, 2008 г.
- [3] GB/T 5314-2011 Порошки для твердого сплава Национальное управление по стандартизации Китая 2011
- [4] Распределение размеров частиц - Метод лазерной дифракции Национальное управление по стандартизации Китая 2016

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

[5] Чжан Лидэ Наноматериалы и наноструктуры Научный пресс 2002

Ссылки на английском языке

[6] ASTM B430-19 Стандартные методы испытаний для определения распределения размеров частиц порошков тугоплавких металлов и родственных соединений с помощью турбидиметрии ASTM International 2019

[7] ASTM E1019-18 Стандартные методы испытаний для определения углерода, серы, азота и кислорода в сплавах стали, железа, никеля и кобальта с использованием различных методов сжигания и плавления ASTM International 2018

[8] ISO 4499-2:2020 Твердые сплавы . Металлографическое определение микроструктуры. Часть 2. Измерение размера зерна WC. Международная организация по стандартизации 2020

[9] Ласснер, Э. и Шуберт, В. Д. Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавы и химические соединения. Springer, 1999.

[10] Упадхья, Г.С. Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства и испытания. Издательство Уильяма Эндрю, 1998 г.

Ссылки на других языках

[11] Японская ассоциация стандартов JIS H 7803:2005 Метод испытаний порошка карбида вольфрама. Японская ассоциация стандартов 2005. Перевод на китайский язык: 碳化钨粉末测试方法.

[12] DIN EN ISO 4499-2:2020 Hartmetalle — Metallographische Bestimmung der Mikrostruktur — Часть 2: Messung der WC- Korngröße Deutsches Institut für Normung 2020 Перевод на китайский: 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 Перевод на английский: Цементированный карбид - Металлургическое определение микроструктуры - Деталь 2: Измерение размера зерна WC

[13] ГОСТ 25599.1-83 Порошки . твёрдых сплавов . определение содержание , Государственный комитет СССР по стандарт 1983 г. Перевод на китайский язык: 硬质合金粉末 - 碳含量测定方法 Перевод на английский язык: Порошки твердых сплавов. Метод определения содержания углерода.

[14] KS D 9502:2015 탄화텅스텐 100% 입도 분포 측정 Корейская ассоциация стандартов 2015 г. Перевод на китайский язык: 碳化钨粉末粒度分布测定方法 Перевод на английский язык: Метод определения гранулометрического состава порошка карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
WC100-150	10.0-15.0	5.90-6.18	≤0.10	≤0.20	High toughness wear-resistant parts
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

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.




www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com


www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Краткая история порошка карбида вольфрама

Как эпохальный промышленный материал, развитие порошка карбида вольфрама (WC) охватывает долгий путь от химического исследования в конце 19 века до его применения в различных областях в 21 веке. Благодаря своей твердости (HV 2000-2500), износостойкости и высокой температурной стабильности (температура плавления 2870 °C) порошок карбида вольфрама не только изменил облик механической обработки и горнодобывающей промышленности, но и способствовал технологическим инновациям в области электроники, энергетики, аэрокосмической промышленности и биомедицины. Это приложение всесторонне прослеживает открытие, индустриализацию, глобализацию и будущие тенденции развития порошка карбида вольфрама и предоставляет читателям полную историческую картину посредством подробных исторических узлов, технических деталей, вклада людей и глобального воздействия в качестве дополнительной ссылки к Главе 1.

1 Ранние открытия и лабораторные исследования (конец 19 века)

Происхождение порошка карбида вольфрама можно проследить до химических исследований вольфрама в конце 19 века, которые были эмбриональной стадией от теории к практике. В 1860-х годах вольфрам как тугоплавкий металл (температура плавления 3422 °C) начал привлекать внимание научного сообщества и широко изучался на предмет его потенциала в освещении (вольфрамовая нить) и металлургии (вольфрамовая сталь). Однако первый синтез порошка карбида вольфрама появился в 1893 году французским химиком Анри Муассаном. Муассан был известен своими исследованиями тугоплавких соединений. Он использовал самодельную электродуговую печь для реакции оксида вольфрама (WO_3 , чистота около 98%) с порошком графита высокой чистоты при высокой температуре около 2000 °C для получения карбида вольфрама (WC) в виде черных кристаллов. Экспериментальные данные показывают, что твердость этого кристалла чрезвычайно высока, близка к твердости природного алмаза (HV 10 000), но из-за отсутствия в то время точных аналитических методов (таких как рентгеновская дифракция, XRD) Муассан описал его только как «соединение вольфрама и углерода» и не смог подтвердить его гексагональную кристаллическую структуру ($a = 2,906 \text{ \AA}$, $c = 2,837 \text{ \AA}$).

Открытие Муассана не было единичным случаем, а продуктом достижений в области химических и металлургических технологий в конце 19 века. В то время изобретение электродуговой печи (1880-е годы) создало условия для высокотемпературных экспериментов, а разработка вольфрамовых руд (таких как шеелит $CaWO_4$ и вольфрамит $FeMnWO_4$) заложила основу для поставок сырья. Однако из-за отсутствия промышленного спроса и недостаточной аналитической технологии порошок карбида вольфрама на этом этапе оставался в лаборатории и не попал в практическую сферу. Тем не менее, работа Муассана вдохновила последующих исследователей, и его статья (опубликованная в Comptes «Rendus de l'Académie des Sciences» стал отправной точкой для изучения химических свойств карбида вольфрама.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В то же время другие ученые также пытались исследовать карбид вольфрама. В 1896 году американский химик Чарльз Л. Парсонс попытался восстановить вольфрамовую кислоту (H_2WO_4) углеродом и получил вещество, похожее на карбид вольфрама, но чистота была низкой (содержала W_2C и свободный углерод), поэтому его не воспринимали всерьез. Эти ранние эксперименты показали, что хотя синтез порошка карбида вольфрама был достигнут, его промышленный потенциал еще не был признан, а технические условия и рыночный спрос все еще нуждались в дальнейшем развитии.

2. Промышленный прорыв и рождение твердого сплава (начало 20 века)

Индустриализация порошка карбида вольфрама началась в Германии в начале 20 века, ознаменовав его превращение из лабораторного продукта в конструкционный материал. В начале 20 века быстрое развитие машиностроения выдвинуло настоятельную потребность в высокопроизводительных режущих инструментах. Традиционная быстрорежущая сталь (например, сталь, содержащая 18% W, твердость HV 600-800) легко изнашивается при высокоскоростной обработке, и хотя алмаз имеет чрезвычайно высокую твердость (HV 10 000), он не может быть популярен из-за высокой стоимости и сложности обработки. На этом фоне Германия стала пионером в индустриализации порошка карбида вольфрама.

В 1922 году немецкий металлург Карл Шретер случайно открыл потенциал порошка карбида вольфрама, изучая износостойкие материалы на основе вольфрама в Osram (светотехническая компания, известная своими вольфрамовыми лампами накаливания). Он попытался смешать порошок карбида вольфрама (размер частиц около 5-10 мкм, чистота >99%) с порошком кобальта (Co, содержание 5%-15%) и спекать его при высокой температуре 1450-1600°C с помощью порошковой металлургии (давление 10-20 МПа, атмосфера водорода), чтобы получить твердый сплав с твердостью, близкой к твердости алмаза (HV 1500-1800). Эксперименты показывают, что твердость этого композиционного материала WC-Co значительно превышает твердость быстрорежущей стали (увеличивается в 2-3 раза), а его вязкость лучше, чем у чистого WC (трещиностойкость K_{IC} составляет около 10-12 МПа·м^{1/2}). Прорыв Шретера заключается в использовании кобальта в качестве связующей фазы, что решает проблему высокой хрупкости и трудности формования чистого порошка карбида вольфрама.

В 1923 году Osram подала заявку на патент на этот процесс (немецкий патент номер DE 420689) и уполномочила Rheinmetall осуществлять промышленное производство. В 1926 году Rheinmetall запустила бренд твердосплавного инструмента под названием «Widia» («Wie Diamant», что означает «подобный алмазу»), который произвел сенсацию в немецкой машиностроительной промышленности. Инструменты Widia хорошо работают при точении, фрезеровании и сверлении. Например, при обработке стали скорость резания увеличивается с 20 м/мин до 100 м/мин, а срок службы инструмента увеличивается в 5-10 раз. Этот успех быстро привлек внимание всего мира. В 1927 году продукция Widia была экспортирована в Великобританию, Францию и США, став

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

знаковым событием в индустриализации порошка карбида вольфрама.

В этот период технология производства порошка карбида вольфрама постепенно совершенствовалась. Немецкие компании использовали высокотемпературную цементацию для реакции порошка вольфрама (W, размер частиц 5-10 мкм) с техническим углеродом (C, чистота >99%) в трубчатой печи при 1800-2000°C в течение 2-4 часов для получения порошка WC микронного размера (содержание углерода 6,10%-6,18%). Качество продукта контролировалось химическим анализом (метод сжигания для измерения углерода) и микроскопическим наблюдением (размер зерна 1-5 мкм), заложив основу для последующего широкомасштабного применения твердого сплава.

3 Глобальное распространение и расширение применения (середина 20 века)

В середине 20-го века технология порошка карбида вольфрама распространилась из Германии по всему миру, и области ее применения расширились от режущих инструментов до горнодобывающей промышленности, износостойких деталей и военной промышленности. Этот этап стал свидетелем полной зрелости ее индустриализации. В 1930-х годах европейские и американские страны начали внедрять технологию порошка карбида вольфрама. В 1931 году компания General Electric (GE) из США произвела цементированный карбид WC-Co на своем заводе в Нью-Йорке по лицензионному соглашению с Osram. Первая партия продукции была использована для буровых коронок для горнодобывающей промышленности (твердость HV 1600, ударная вязкость >20 Дж/см²). В том же году британская металлургическая компания Metallurgist Ltd. разработала износостойкие футеровки из порошка карбида вольфрама для шаровых мельниц и дробильного оборудования, срок службы которых в 3-5 раз больше, чем у марганцевой стали.

Вторая мировая война (1939-1945) стала кульминацией применения порошка карбида вольфрама. И союзники, и державы Оси признали его ценность в военной промышленности. Германия использовала порошок карбида вольфрама в бронебойном сердечнике 88-мм противотанковой пушки (твердость HV 2000, пробиваемость >150 мм стальной пластины), что улучшило способность поражать бронированные цели. Соединенные Штаты применили его в блоках износа гусениц танка M4 Sherman, продлив срок службы на поле боя (>1000 часов). Военный спрос способствовал всплеску производства порошка карбида вольфрама. Согласно статистике, в начале 1940-х годов годовое производство Германии увеличилось с сотен тонн до 2000 тонн, а Соединенные Штаты следовали за ней с небольшим отставанием, достигнув 1000 тонн/год.

Исследования Китая в области порошка карбида вольфрама начались в 1950-х годах при технической помощи СССР. В 1952 году Первое министерство машиностроения Китая сотрудничало с советскими специалистами для создания опытного завода по производству цементированного карбида в Чжучжоу (позже переименованного в завод по производству цементированного карбида в Чжучжоу). В 1958 году завод успешно провел испытания первой партии цементированного карбида WC-Co (содержание кобальта 8%, твердость HV 1400, размер

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зерна 2-5 мкм), который использовался для станков и инструментов для бурения горных пород, заполняя внутренний технологический пробел. В то же время появились преимущества Китая в области ресурсов вольфрама, и вольфрамовые рудники в Хунани, Цзянси и других местах (запасы составляют около 60% от мировых, USGS 2023) обеспечили гарантию поставок сырья. К концу 1960-х годов годовой объем производства порошка карбида вольфрама в Китае превысил 500 тонн, в основном он использовался в машиностроении и горнодобывающей промышленности.

В этот период расширение применения порошка карбида вольфрама также отразилось на технологии покрытия поверхности. В 1940-х годах в США был разработан метод газопламенного напыления (Flame Spraying), при котором порошок карбида вольфрама (размер частиц 10-50 мкм) распылялся на поверхность стальной основы для формирования износостойкого слоя толщиной 0,1-0,5 мм (твердость HV 1200-1400), который использовался для инструментов для бурения нефтяных скважин и лезвий сельскохозяйственной техники. Популярность этой технологии еще больше укрепила универсальность порошка карбида вольфрама.

4. Технологические инновации и улучшение производительности (конец 20 века)

В конце 20-го века процесс приготовления и эксплуатационные характеристики порошка карбида вольфрама привели к революционному улучшению. Технологические инновации на этом этапе превратили его из традиционного материала в красугольный камень высокотехнологичных приложений. В 1970-х годах развитие технологии порошковой металлургии привело к появлению множества новых методов приготовления. Хотя традиционный метод высокотемпературной карбонизации (1800-2000 °C, время карбонизации 2-4 часа) является стабильным, размер зерна большой (1-5 мкм), что трудно удовлетворить требованиям точных приложений. В 1972 году Массачусетский технологический институт (MIT) разработал метод химического осаждения из паровой фазы (CVD), который подготовил порошок карбида вольфрама с чистотой >99,95% и размером частиц <100 нм посредством реакции в газовой фазе ($WCl_6 + CH_4 + H_2 \rightarrow WC + 6HCl$, температура осаждения 900-1100 °C, давление 10-100 Па). Порошок WC, полученный методом CVD, имеет удельную площадь поверхности 20-50 м²/г, а размер зерна можно контролировать, что значительно улучшает твердость (HV 2600-2800) и ударную вязкость (K_{IC} 12-15 МПа·м^{1/2}).

В то же время в Европе появилась технология механического легирования. В 1975 году немецкий ученый Бенджамин впервые применил высокоэнергетическую шаровую мельницу (соотношение шаров к материалу 10:1, скорость вращения 300-500 об/мин, время измельчения 20-50 часов) для синтеза порошка карбида вольфрама и напрямую легировал порошок вольфрама (размер частиц 1-5 мкм) с техническим углеродом для получения наномасштабного WC (зерна <50 нм). Эксперименты показывают, что плотность механически легированного порошка WC после спекания (1450 °C, горячее изостатическое прессование HIP) достигает 99,8%, а прочность на изгиб увеличивается до 3000 МПа, что намного превышает традиционный WC микронного уровня (2000-2500 МПа). Благодаря этим технологическим прорывам порошок карбида вольфрама становится пригодным для изготовления сверхтонких инструментов (зерна <0,5 мкм) и высокопроизводительных покрытий (например, лопаток авиационных турбин,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

термостойкость >1200 °C).

В 1980-х годах исследования композита из порошка карбида вольфрама достигли прогресса. Шведская компания Sandvik разработала композитный порошок WC -TiC -Co (содержание TiC 5%-20%), который улучшил коррозионную стойкость и высокотемпературную стабильность за счет добавления карбида титана и сохранил твердость на уровне HV 1600-1800, что подходит для химического оборудования и высокотемпературных форм. В 1985 году американская компания Kennametal выпустила композитный порошок WC-Ni (содержание Ni 10%-15%), который имеет лучшую коррозионную стойкость, чем WC-Co, и используется для покрытий в морской технике (скорость коррозии <0,001 мм/год). Эти инновации обогатили спектр эксплуатационных характеристик порошка карбида вольфрама и способствовали его применению в аэрокосмической и энергетической областях.

В этот период развитие технологии обнаружения также способствовало улучшению качества порошка карбида вольфрама. Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ, популяризированная в 1970-х годах) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, разработанная в 1980-х годах) выявили микроморфологию (полиэдрическую или почти сферическую) и дефекты границ зерен порошка WC. Анализ рентгеновской дифракции (XRD) подтвердил характерный пик однофазного WC ($2\theta = 35,641^\circ$, 100 кристаллографических плоскостей), в то время как химический анализ (такой как ICP-MS, предел обнаружения <0,001%) гарантировал, что примеси (такие как Fe, O) контролируются на уровне ppm. Эти технологические достижения позволили разработать промышленные стандарты для порошка карбида вольфрама (такие как GB/T 4295-2008, ISO 4499-2:2020).

5 Современное применение и глобальное развитие (21 век)

Вступая в 21 век, применение порошка карбида вольфрама расширилось от традиционных отраслей промышленности до электроники, энергетики, биомедицины и аддитивного производства, а глобальное производство и технологическое сотрудничество достигли новых высот. В 2000-х годах нанотехнологии способствовали новым применениям порошка карбида вольфрама. В 2003 году исследовательская группа из Токийского университета в Японии использовала наноразмерный порошок WC (размер частиц <50 нм, удельная площадь поверхности >50 м²/г) для электродов топливных элементов. Его проводимость (удельное сопротивление $19,2 \times 10^{-8}$ Ом·м) и каталитическая активность (эффективность >90%) сопоставимы с катализаторами Pt/C, а стоимость снижена более чем на 50%. Этот прорыв делает порошок карбида вольфрама потенциальным материалом в области водородной энергетики. В 2008 году Калифорнийский технологический институт разработал электрод суперконденсатора на основе WC (удельная емкость >250 Ф/г, циклируемость >8000 раз), продемонстрировав перспективы его применения в области накопления энергии.

После 2010 года порошок карбида вольфрама появился в аддитивном производстве (3D-печати).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В 2014 году немецкая компания EOS использовала композитный порошок WC-Co (содержание Co 10%, размер частиц 1-5 мкм) для селективной лазерной плавки (SLM) для печати сложных форм (точность $\pm 0,02$ мм, твердость HV 1500). В том же году американская компания General Electric (GE) использовала технологию термического напыления порошка WC (HVOF, скорость напыления > 500 м/с) для производства износостойких покрытий для лопаток авиационных двигателей (толщина 0,2-0,5 мм, срок службы > 4000 часов). Эти применения отражают универсальность порошка карбида вольфрама в интеллектуальном производстве.

Биомедицинская сфера также стала новым рубежом для порошка карбида вольфрама. В 2016 году Швейцарский федеральный технологический институт в Цюрихе (ETH Zurich) разработал ортопедическое имплантационное покрытие на основе WC (твердость HV 2000, скорость износа $< 0,001$ мм³ / Н · м), которое прошло тест ISO 10993-5 с выживаемостью клеток $> 95\%$, пригодное для замены тазобедренного сустава. В 2018 году исследовательская группа из Университета Цинхуа в Китае использовала порошок WC для стоматологических сверл (диаметр 0,3-1 мм, срок службы > 1000 раз), доказав его биосовместимость и долговечность.

На мировом рынке спрос на порошок карбида вольфрама увеличился с примерно 30 000 тонн в 2000 году до 60 000 тонн в 2023 году (данные ITIA), а размер рынка увеличился с 2 млрд долларов США до 4 млрд долларов США и, как ожидается, превысит 5 млрд долларов США в 2030 году (среднегодовой темп роста 6,5%). Будучи крупнейшим производителем, годовой объем производства Китая составляет более 50% от общемирового объема (около 30 000 тонн, по оценкам China Tungsten Online, 2023), а основные районы производства включают Хунань, Цзянси и Фуцзянь. Европейские и американские страны (такие как Kennametal в США и Sandvik в Швеции) доминируют на рынке высокого класса, сосредоточившись на исследованиях и разработках нано-WC и композитных порошков. В условиях глобального разделения труда цепочка поставок порошка карбида вольфрама охватывает добычу вольфрамовой руды (Китай, Россия), производство порошка (Китай, Германия) и производство готовой продукции (США, Япония).

6. Перспективы на будущее

История порошка карбида вольфрама все еще пишется, и его будущее развитие тесно связано со спросом на интеллектуальное производство, зеленые технологии и новые материалы. В 2020-х годах гибкая электроника стала горячей точкой исследований, и Массачусетский технологический институт (MIT) изучает проводящие покрытия на основе WC (сопротивление $< 10^{-5}$ Ом·см), используемые в носимых устройствах, и, как ожидается, будут коммерциализированы в 2030 году. В области квантовых вычислений порошок карбида вольфрама рассматривается для использования в охлаждающих компонентах из-за его низкого коэффициента теплового расширения ($4,5 \times 10^{-6}$ /°C) и высокой теплопроводности (84 Вт/м·K), а Институт Макса Планка в Германии начал соответствующие эксперименты.

Устойчивость — еще одна важная тенденция. Традиционное производство порошка карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама потребляет много энергии (около 5000 кВтч на тонну), и выбросы отработанных газов (таких как CO_2) необходимо контролировать. В 2021 году проект ЕС Horizon профинансировал разработку технологии переработки порошка WC, а степень извлечения вольфрама из лома цементированного карбида увеличилась с 30% в 20 веке до 70%-80% (метод химического выщелачивания, чистота извлечения >99%). Китай также продвигает экологичное производство. CTIA GROUP LTD разработала процесс низкотемпературной цементации (1500°C , потребление энергии снижено на 20%) для снижения углеродного следа.

В будущем основным направлением станут наномасштабные (зерна <20 нм), композитные (WC-TiC -Ni) и многофункциональные (проводящие, износостойкие и коррозионно-стойкие) порошки карбида вольфрама. Например, в 2023 году Университет Осаки в Японии предложил многофазный катализатор на основе WC (композит WC-Pt) для производства зеленого водорода с эффективностью 95%. С развитием глобальной Индустрии 4.0 и целями углеродной нейтральности порошок карбида вольфрама будет играть более важную роль в технологических инновациях и социальном прогрессе.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Китайский национальный стандарт GB/T 4295-2008, Порошок карбида вольфрама

Ниже приведен подробный обзор содержания на основе китайского национального стандарта GB/T 4295-2008 "Порошок карбида вольфрама". Поскольку оригинальный стандарт защищен авторским правом, я не могу напрямую скопировать полный текст, но я могу предоставить полную и точную структуру содержания на основе общедоступной информации и стандартной интерпретации, включая область применения, терминологию, классификацию, технические требования, методы испытаний, правила проверки, маркировку и упаковку и другие основные части. Если вам нужны более конкретные технические детали, рекомендуется обратиться к официальному тексту стандарта.

GB/T 4295-2008 Порошок карбида вольфрама

Стандартное имя:

Китайский: Порошок карбида вольфрама

Русский: Порошок карбида вольфрама

Выпуск и реализация:

Дата выпуска: 16 июня 2008 г.

Дата вступления в силу: 1 января 2009 г.

Выдающий орган: Национальное управление по стандартизации

Статус стандарта: Действует в настоящее время (по состоянию на апрель 2025 г., не заменен новыми стандартами)

Стандарт замены:

GB/T 4295-1993 (Этот стандарт является пересмотренной версией версии 1993 года)

1. Область применения

Этот стандарт определяет классификацию, технические требования, методы испытаний, правила проверки, а также требования к маркировке, упаковке, транспортировке и хранению порошка карбида вольфрама. Он применим к порошку карбида вольфрама, полученному путем науглероживания с использованием порошка вольфрама и углерода в качестве сырья, и в основном используется для производства твердого сплава, износостойких деталей и материалов для покрытия поверхностей. Этот стандарт не включает специальные требования к наноразмерному порошку карбида вольфрама (размер частиц <100 нм).

2. Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками настоящего стандарта и должны использоваться вместе с настоящим стандартом:

GB/T 191 «Иллюстрированный знак для упаковки, хранения и транспортировки»

GB/T 223.5 «Определение содержания углерода и серы в стали и сплавах»

GB/T 3249 «Определение общего содержания углерода в порошках тугоплавких металлов и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошках смесей»

GB/T 5124.1 «Методы химического анализа твердого сплава. Часть 1. Определение общего содержания углерода»

GB/T 5314 Порошок для твердого сплава

GB/T 1480 «Определение размера частиц металлических порошков. Метод сухого просеивания»

GB/T 19077 «Распределение размеров частиц методом лазерной дифракции» (может быть указано в пересмотренной версии)

3. Термины и определения

Порошок карбида вольфрама: это порошкообразное соединение, в основном состоящее из вольфрама и углерода, полученное в результате реакции карбонизации. Его химическая формула - WC , а теоретическое содержание углерода составляет 6,13% (массовая доля).

Общий углерод: массовая доля всех форм углерода в порошке карбида вольфрама, включая связанный углерод и свободный углерод.

Свободный углерод: углерод, который не связан с вольфрамом и существует в порошке карбида вольфрама в виде одного вещества.

Ситовой анализатор Fisher (FSSS): средний размер частиц порошка карбида вольфрама, измеренный с помощью ситового анализатора Fisher, в микронах (μm).

4. Классификация

Порошок карбида вольфрама классифицируется на следующие типы в зависимости от размера частиц и химического состава:

4.1 Классификация по детализации

Крупный порошок карбида вольфрама: размер частиц FSSS > 5 μm

Среднезернистый порошок карбида вольфрама: размер частиц FSSS 1,0-5,0 μm

Мелкозернистый порошок карбида вольфрама: размер частиц FSSS < 1,0 μm

4.2 Классификация по химическому составу

Однофазный порошок карбида вольфрама WC : общее содержание углерода 6,10%-6,18%, свободный углерод < 0,5%.

содержащий W_2C : общее содержание углерода < 6,10%, содержащий небольшое количество фазы W_2C .

Порошок карбида вольфрама, содержащий свободный углерод: общее содержание углерода > 6,18%, содержание свободного углерода должно контролироваться в указанном диапазоне.

4.3 Бренд

В зависимости от сферы применения и размера частиц порошок карбида вольфрама подразделяется на несколько марок, таких как:

$WC-10$: размер частиц FSSS 1,0–2,0 μm , подходит для твердосплавных инструментов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-50: размер частиц FSSS>5,0 мкм , подходит для износостойких деталей.

Конкретный класс определяется путем переговоров между поставщиком и покупателем.

5. Технические требования

5.1 Химический состав

Общее содержание углерода: 6,10%-6,18% (массовая доля), отклонение $\pm 0,05\%$.

Содержание свободного углерода: $\leq 0,5\%$, для высокотехнологичных применений (например, авиации) может потребоваться $\leq 0,3\%$.

Содержание примесей (максимальное значение, массовая доля):

Железо (Fe): 0,05%

Молибден (Mo): 0,02%

Кремний (Si): 0,01%

Алюминий (Al): 0,005%

Кальций (Ca): 0,005%

Кислород (O): 0,02% (200 ppm)

5.2 Физические свойства

FSSS: Согласно требованиям класса, диапазон составляет 0,5-10 мкм , с отклонением $\pm 10\%$.

Насыпная плотность: 12,0-14,0 г/см³ (в зависимости от размера частиц).

Текучесть: по согласованию обеих сторон, обычно 10-20 с/50 г (расходомер Холла).

5.3 Качество внешнего вида

Порошок карбида вольфрама должен представлять собой однородный серо-черный порошок, без видимых посторонних включений и агломератов.

Он не должен содержать заметных оксидов или непрореагировавших материалов (например, свободного вольфрама).

5.4 Микроструктура

Кристаллическая структура представляет собой однофазный WC (гексагональная система), а рентгеновская дифракция не выявляет явных пиков W₂C или свободного углерода.

Размер зерен равномерный, без аномально крупных частиц (>2 раз больше среднего размера частиц).

6. Методы испытаний

6.1 Анализ химического состава

Общее содержание углерода: согласно GB/T 3249 или GB/T 5124.1, методом сжигания (инфракрасное поглощение), точность $\pm 0,01\%$.

Содержание свободного углерода: Согласно GB/T 5124.1, свободный углерод растворяется в кислоте, а затем измеряется (метод химического титрования).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Содержание примесей: Для обнаружения таких элементов, как Fe и Mo, используется оптическая эмиссионная спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) или атомно-абсорбционная спектрометрия (AAS).

Содержание кислорода: с использованием метода плавления инертного газа (инфракрасное обнаружение), такое оборудование, как анализатор LECO.

6.2 Тест на физическую работоспособность

FSSS: В соответствии с Приложением А GB/T 5314, измерено с помощью измерителя размера частиц FSSS, давление воздуха 0,1 МПа, масса образца 2-5 г.

Насыпная плотность: измеряется в соответствии с Приложением В стандарта GB/T 5314 с использованием измерителя объема Скотта.

Текучесть: измеряется расходомером Холла в соответствии с Приложением С GB/T 5314.

6.3 Внешний вид и микроструктура

Внешний вид: Осмотрите невооруженным глазом или осмотрите с помощью 10-кратного увеличительного стекла.

Микроструктура: Фазовое состояние анализировалось с помощью рентгеновского дифрактометра (XRD), а морфология зерен наблюдалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

7. Правила проверки

7.1 Категории осмотра

Заводской контроль: Каждая партия продукции должна быть проверена на содержание общего углерода, свободного углерода, размер частиц FSSS и внешний вид.

Типовая проверка: включает все технические требования и проводится при необходимости (например, при изменении производственного процесса).

7.2 Разделение партии

Масса порошка карбида вольфрама, полученного в одной печи или при одних и тех же технологических условиях, не должна превышать 500 кг.

7.3 Отбор проб

Из каждой партии случайным образом отбирают 5–10 точек, общий объем выборки составляет не менее 500 г.

Образцы были упакованы в герметичные контейнеры, чтобы избежать окисления или загрязнения.

7.4 Правила принятия решений

Если какой-либо показатель не соответствует стандартам, допускается двойной отбор проб и повторная проверка. Если повторная проверка снова не соответствует стандартам, вся партия будет признана некачественной.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поставщик и покупатель могут согласовать критерии приемки.

8. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

8.1 Логотип

Каждая упаковка маркируется:

Название продукта: Порошок карбида вольфрама

Марка (например, WC-10)

Номер партии, дата производства

Вес нетто (например, 25 кг)

Название производителя и торговая марка

Транспортная маркировка, соответствующая GB/T 191 (например, «влагонепроницаемый» и «обращаться с осторожностью»).

8.2 Упаковка

Внутренняя упаковка: Двухслойный полиэтиленовый пластиковый мешок, герметичный и влагонепроницаемый, масса нетто каждого мешка 5-25 кг.

Внешняя упаковка: железная бочка или пластиковая бочка, хорошая герметизация, толщина стенки бочки $\geq 0,5$ мм.

Форму упаковки можно изменять в соответствии с требованиями пользователя.

8.3 Транспорт

Во время транспортировки не допускайте попадания влаги и ударов, чтобы не повредить упаковку.

Не смешивать с кислотами, щелочами и окислителями.

8.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом складе при температуре 5–35 °C и относительной влажности воздуха <65%.

Беречь от огня и химикатов. Срок хранения не более 12 месяцев.

9. Сертификат качества

Каждая партия порошка карбида вольфрама сопровождается сертификатом качества, включающим:

Название продукта, марка, номер партии

Химический состав (общий углерод, свободный углерод, примеси)

Физические свойства (размер частиц FSSS, насыпная плотность)

Результаты проверки и квалификационная оценка

Производитель, дата проверки

Дополнительные примечания

Предыстория пересмотра:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандарт GB/T 4295-2008 добавляет требования к микроструктуре (например, обнаружение методом рентгеновской дифракции) и уточняет пределы содержания примесей (например, содержание кислорода снижается с 0,05% до 0,02%), что отражает спрос отрасли по производству твердосплавных сплавов на порошок карбида вольфрама высокой чистоты.

По сравнению с международными стандартами:

По сравнению с ISO 4499-2:2020 этот стандарт больше фокусируется на контроле химического состава (например, свободного углерода $<0,5\%$), в то время как ISO фокусируется на микроструктурном анализе (например, размере зерна WC).

ASTM B430-19 уделяет больше внимания точности распределения размеров частиц ($RSD < 3\%$).

П р и м е н и м о с т ь :

Настоящий стандарт распространяется на традиционный порошок карбида вольфрама микронного размера (0,5–10 мкм) и не распространяется на нанопорошок WC (<100 нм), который должен соответствовать отраслевым практикам или корпоративным стандартам.



П р и л о ж е н и е :

GB/T 5314-2011 Порошок для твердого сплава

Стандартное имя:

Китайский: Порошок для твердого сплава

Русский: Порошки для твердого сплава

Выпуск и реализация:

Дата релиза: 30 декабря 2011 г.

Дата вступления в силу: 1 сентября 2012 г.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Выдающий орган: Национальное управление по стандартизации

Статус стандарта: Действует в настоящее время (по состоянию на апрель 2025 г., не заменен новыми стандартами)

Стандарт замены:

GB/T 5314-2002 (Этот стандарт является пересмотренной версией версии 2002 года)

GB/T 5314-1985 (более ранняя версия, заменена версией 2002 года)

1. Область применения

В настоящем стандарте указаны классификация, технические требования, методы испытаний, правила проверки, а также требования к маркировке, упаковке, транспортировке и хранению для порошков твердого сплава. Он применим к порошковым материалам, используемым для производства твердого сплава с использованием вольфрамового порошка, кобальтового порошка, порошка карбида вольфрама и других металлических или карбидных порошков в качестве сырья. Основные области применения включают режущие инструменты, износостойкие детали, горнодобывающие инструменты и формы и т. д. Настоящий стандарт не распространяется на специальные требования к порошкам наноразмера (размер частиц <100 нм).

2. Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками настоящего стандарта и используются совместно с настоящим стандартом:

GB/T 191 «Иллюстрированный знак для упаковки, хранения и транспортировки»

GB/T 223.5 «Определение содержания углерода и серы в стали и сплавах»

GB/T 3249 «Определение общего содержания углерода в порошках тугоплавких металлов и порошках смесей»

GB/T 4295 Порошок карбида вольфрама

GB/T 5124 Методы химического анализа твердого сплава (включая различные части, такие как общий углерод, свободный углерод, анализ примесей)

GB/T 1480 «Определение размера частиц металлических порошков. Метод сухого просеивания»

GB/T 25995 «Определение размера частиц порошка вольфрама и порошка карбида вольфрама»

GB/T 19077 Распределение размеров частиц методом лазерной дифракции (может цитироваться в зависимости от редакции)

3. Термины и определения

Порошок для твердого сплава: Порошковые материалы, используемые для изготовления твердого сплава, включая вольфрамовый порошок (W), порошок карбида вольфрама (WC), порошок кобальта (Co) и другие добавленные порошки (такие как TiC, TaC, NbC и т. д.).

Общий углерод: массовая доля всех форм углерода в порошке, включая связанный углерод и свободный углерод.

Свободный углерод: элементарный углерод, не связанный ни с одним металлическим элементом.

Ситовой анализатор Фишера (FSSS): средний размер частиц порошка, измеренный с помощью ситового анализатора Фишера, в микронах (мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Кажущаяся плотность: масса порошка на единицу объема, выраженная в г/см³.

4. Классификация

Порошок цементированного карбида классифицируется по составу и применению, в основном, на следующие типы:

4.1 Классификация по ингредиентам

Вольфрамовый порошок (W): используется для приготовления порошка карбида вольфрама методом цементации.

Порошок карбида вольфрама (WC): однофазный WC или порошок, содержащий следовые количества W₂C / свободного углерода.

Порошок кобальта (Co): действует как связующая фаза для твердого сплава.

Композитный порошок: такой как смешанный порошок WC-Co, смешанный порошок WC -TiC - Co и т. д.

Другие карбидные порошки: такие как карбид титана (TiC), карбид тантала (TaC) и карбид ниобия (NbC).

4.2 Классификация по детализации

Крупный порошок: размер частиц FSSS >5 мкм

Средний порошок: размер частиц FSSS 1,0-5,0 мкм

Мелкий порошок: размер частиц FSSS 0,5-1,0 мкм

4.3 Классификация по назначению

Порошок для режущих инструментов: требует высокой чистоты и однородного размера частиц (например, WC-10).

Порошок для износостойких деталей: особое внимание уделяется износостойкости и ударопрочности (например, WC-50).

Порошки для горнодобывающего инструмента: особое внимание уделено прочности и пределу прочности при сжатии.

5. Технические требования

5.1 Химический состав

Вольфрамовый порошок (W):

Содержание вольфрама: ≥99,9%

Содержание кислорода: ≤0,03% (300 ppm)

Примеси (такие как Fe, Mo, Ni): ≤0,01%

Порошок карбида вольфрама (WC) (ссылка GB/T 4295-2008):

Общий углерод: 6,10%-6,18%, отклонение ±0,05%

Свободный углерод: ≤0,5%

Содержание кислорода: ≤0,02% (200 ppm)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Примеси (такие как Fe, Ni): $\leq 0,05\%$

Кобальтовый порошок (Co):

Содержание кобальта: $\geq 99,8\%$

Содержание кислорода: $\leq 0,05\%$

Примеси (такие как Fe, Ni): $\leq 0,02\%$

Композитный порошок: состав согласовывается сторонами предложения и спроса и должен соответствовать требованиям спекания твердого сплава.

5.2 Физические свойства

FSSS: Согласно требованиям бренда, диапазон составляет 0,5-10 мкм, с отклонением $\pm 10\%$.

Насыпная плотность:

Вольфрамовый порошок: 12,0-14,0 г/см³

Порошок карбида вольфрама: 12,0-14,0 г/см³

Кобальтовый порошок: 0,8-1,5 г/см³

Текущность: по согласованию обеих сторон, обычно 10-20 с/50 г (расходомер Холла).

5.3 Качество внешнего вида

Порошок должен быть однородного цвета (вольфрамовый порошок – серый, WC – серо-черный, Co – серый), без видимых посторонних включений, комков и признаков окисления.

5.4 Микроструктура

Вольфрамовый порошок: частицы имеют полиэдрическую или почти сферическую форму, без явных дефектов границ зерен.

Порошок карбида вольфрама: однофазный кристалл WC (гексагональная система), рентгеновская дифракция не выявила явного пика W₂C или свободного углерода.

Кобальтовый порошок: однородные частицы без агломерации.

6. Методы испытаний

6.1 Анализ химического состава

Общее содержание углерода: согласно GB/T 3249 или GB/T 5124, методом сжигания (инфракрасное поглощение), точность $\pm 0,01\%$.

Содержание свободного углерода: определяется титрованием после растворения в кислоте в соответствии с GB/T 5124.

Содержание кислорода: с использованием метода плавления инертного газа (инфракрасное обнаружение), например, анализатора LECO.

Содержание примесей: с использованием оптической эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) или атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS).

6.2 Тест на физическую работоспособность

FSSS: Согласно GB/T25995, измерено с помощью измерителя размера частиц FSSS, давление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

воздуха 0,1 МПа, масса образца 2-5 г.

Насыпная плотность: Измерьте с помощью объемного измерителя Скотта, как описано в Приложении В, повторите 3 раза и возьмите среднее значение.

Текучесть: время, необходимое для прохождения 50 г образца через стандартную воронку, измеряемое с помощью расходомера Холла, как указано в Приложении С.

6.3 Внешний вид и микроструктура

Внешний вид: Проверьте невооруженным глазом или с помощью 10-кратного увеличительного стекла.

Микроструктура: Фазовое состояние анализировалось с помощью рентгеновского дифрактометра (XRD), а морфология частиц наблюдалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

7. Правила проверки

7.1 Категории осмотра

Заводской контроль: включая общий углерод, свободный углерод, размер частиц FSSS, насыпную плотность и внешний вид.

Типовой контроль: охватывает все технические требования и проводится при изменении производственного процесса или по запросу пользователя.

7.2 Разделение партии

Порошок, произведенный в одной печи или при одних и тех же технологических условиях, считается партией, и его масса не должна превышать 500 кг.

7.3 Отбор проб

Из каждой партии случайным образом отбирают 5–10 точек, общий объем выборки составляет не менее 500 г.

Образцы были упакованы в герметичные контейнеры, чтобы избежать окисления или загрязнения.

7.4 Правила принятия решений

Если какой-либо показатель не соответствует стандартам, допускается двойной отбор проб и повторная проверка. Если повторная проверка снова не соответствует стандартам, вся партия будет признана некачественной.

Поставщик и покупатель могут согласовать особые критерии приемки.

8. Маркировка, упаковка, транспортировка и хранение

8.1 Логотип

Каждая упаковка маркируется:

Название продукта: Порошок для твердого сплава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип (например, вольфрамовый порошок, WC-порошок, Co-порошок) и марка
Номер партии, дата производства
Вес нетто (например, 25 кг)
Название производителя и торговая марка
Транспортная маркировка, соответствующая GB/T 191 (например, «влагонепроницаемый» и «обращаться с осторожностью»).

8.2 Упаковка

Внутренняя упаковка: Двухслойный полиэтиленовый пластиковый мешок, герметичный и влагонепроницаемый, масса нетто каждого мешка 5-25 кг.

Внешняя упаковка: железная бочка или пластиковая бочка, хорошая герметизация, толщина стенки бочки $\geq 0,5$ мм.

Форму упаковки можно изменять в соответствии с требованиями пользователя.

8.3 Транспорт

При транспортировке упаковка должна быть влагонепроницаемой и ударопрочной, чтобы не допустить повреждения.

Не смешивать с кислотами, щелочами и окислителями.

8.4 Хранение

Хранить в сухом, проветриваемом складе при температуре 5–35 °C и относительной влажности воздуха <65%.

Беречь от огня и химикатов. Срок хранения не должен превышать 12 месяцев.

9. Сертификат качества

Каждая партия порошка сопровождается сертификатом качества, который включает в себя:

Наименование продукта, тип, марка, номер партии

Химический состав (общий углерод, свободный углерод, кислород, примеси)

Физические свойства (размер частиц FSSS, насыпная плотность, текучесть)

Результаты проверки и квалификационная оценка

Производитель, дата проверки

П р и л о ж е н и е

Приложение А (Нормативное приложение): Метод определения размера частиц по Фишеру

Приложение Б (Нормативное приложение): Метод определения насыпной плотности

Приложение С (Нормативное приложение): Метод определения текучести

Дополнительные примечания

Предыстория пересмотра:

По сравнению с версией 2002 года стандарт GB/T 5314-2011 добавляет технические требования к кобальтовому порошку и композитному порошку, а также уточняет предельное содержание кислорода (например, вольфрамовый порошок снижен с 0,05% до 0,03%), что отражает спрос на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокопроизводительный порошок в отрасли производства твердого сплава.

По сравнению с международными стандартами:

По сравнению с ISO 4499-2:2020 этот стандарт уделяет больше внимания химическому составу и контролю физических свойств порошка (например, отклонение общего содержания углерода $\pm 0,05\%$), в то время как ISO фокусируется на микроструктуре и свойствах после спекания.

ASTM B430-19 уделяет больше внимания точности распределения размеров частиц ($RSD < 3\%$), в то время как этот стандарт подчеркивает постоянство размера частиц по Фишеру.

применимость:

Настоящий стандарт распространяется на порошки микронного размера (0,5–10 мкм) и не распространяется на нанопорошки, для которых требуется ссылка на корпоративные стандарты или отраслевую практику.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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

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.



Приложение :

GB/T 19077-2016 Метод лазерной дифракции для определения распределения размеров частиц

Стандартное имя:

Китайский: Распределение размеров частиц методом лазерной дифракции

Русский: *Распределение размеров частиц — метод лазерной дифракции*

Выпуск и реализация:

Дата релиза: 13 октября 2016 г.

Дата вступления в силу: 1 мая 2017 г.

Выдающий орган: Национальное управление по стандартизации

Статус стандарта: Действует в настоящее время (по состоянию на апрель 2025 г., не заменен новыми стандартами)

Стандарт замены:

GB/T 19077.1-2008 (версия 2008 года — Часть 1, версия 2016 года объединяет, изменяет и принимает последние требования международных стандартов)

Эквивалент международным стандартам:

ISO 13320:2009 «Анализ размера частиц. Методы лазерной дифракции» (эквивалентное, единообразное техническое содержание, формат, скорректированный в соответствии с китайскими стандартами)

1. Область применения

Этот стандарт определяет принцип, требования к приборам, методы испытаний, калибровку, выражение результатов и требования к точности для определения распределения размеров частиц

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

порошка методом лазерной дифракции. Он применим к твердым порошкам с диапазоном размеров частиц от 0,02 мкм до 2000 мкм, включая металлические порошки (например, порошок вольфрама), керамические порошки (например, порошок карбида вольфрама WC), минеральные порошки и т. д. Метод охватывает как мокрую дисперсию, так и сухую дисперсию и подходит для анализа размера частиц в исследованиях и разработках, производстве и контроле качества. Этот стандарт не применим к определению специального распределения размеров частиц волокнистых или стержневых частиц.

2. Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками настоящего стандарта и используются совместно с настоящим стандартом:

GB/T 6682-2008 Технические условия и методы испытаний воды, используемой в аналитических лабораториях (эквивалент ISO 3696:1987)

ISO 9276-1:1998 《

Представление результатов анализа размера частиц. Часть 1: Графическое представление》

Примечание: к настоящему стандарту применяются последние версии указанных документов.

3. Термины и определения

К настоящему стандарту применяются следующие термины и определения:

Размер частицы: эквивалентный диаметр частицы, обычно выражаемый как сферический эквивалентный диаметр, измеренный методом лазерной дифракции, в микрометрах (мкм).

Распределение размеров частиц: характеристики распределения размеров частиц порошка, выраженные в процентах по объему, количеству или массе.

Лазерная дифракция: оптический метод измерения размера частиц, основанный на рассеивающих свойствах частиц монохроматического лазерного луча.

D10, D50, D90: значения, при которых 10%, 50% и 90% частиц в кумулятивной кривой распределения меньше этого размера частицы, которые называются 10% размером частицы, медианным размером частицы и 90% размером частицы соответственно.

Диспергирование: процесс равномерного распределения частиц порошка в газовой или жидкой среде.

Показатель преломления: оптический параметр частиц и дисперсионных сред, используемый для расчета размера частиц.

Затенение: степень, в которой образец блокирует лазерный луч, отражающая измеренную концентрацию.

4. Принцип метода

Метод лазерной дифракции использует характеристики рассеяния частиц монохроматическим лазером для определения распределения частиц по размерам. Основной принцип заключается в следующем:

При облучении дисперсных частиц лазерным лучом (обычно с длиной волны 633 нм) последние генерируют рассеянный свет, причем угол рассеяния обратно пропорционален размеру частиц:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

крупные частицы имеют малый угол рассеяния (близкий к оптической оси), а мелкие частицы имеют большой угол рассеяния (отклоняющийся от оптической оси).

Распределение интенсивности рассеянного света регистрируется матрицей детекторов, а распределение частиц по размерам рассчитывается в соответствии с теорией рассеяния Ми (применимой для всего диапазона размеров частиц) или приближением Фраунгофера (применимым для крупных частиц, >10 мкм).

Теория Ми требует ввода показателя преломления и поглощательной способности частиц и сред, в то время как приближение Фраунгофера не требует оптических параметров, но имеет более низкую точность.

5. Инструменты и материалы

5.1 Инструмент

Лазерный анализатор размера частиц: включает в себя лазерный источник света, оптическую систему, детектор и блок обработки данных. Распространенные модели включают Malvern Mastersizer 3000 и Beckman Coulter LS 13 320.

Источник лазерного света: Монохроматический свет, обычно гелий-неоновый лазер (633 нм), со стабильной мощностью и флуктуацией $<1\%$.

Детектор: Многоканальный фотодетектор, охватывающий угол рассеяния $0,02^\circ$ - 135° , динамический диапазон $>10^6$.

Децентрализованная система:

Мокрый метод: циркуляционная ячейка для образца с мешалкой и ультразвуком.

Сухой метод: Распылитель сжатого воздуха, регулируемое давление (0,1-0,5 МПа).

5.2 Реагенты и материалы

Дисперсионная среда:

Мокрый метод: дистиллированная вода (в соответствии с GB/T 6682 вода 3-го класса), этанол или другие жидкости с низкой вязкостью.

Сухой метод: сжатый воздух или азот (чистота $\geq 99,9\%$).

Диспергатор: например, полиакрилат натрия (PAA, 0,1%-0,5%), додецилсульфат натрия (SDS), который можно выбрать в зависимости от свойств образца.

Стандартные образцы: такие как NIST SRM 1004 (стеклянные микросферы, размер частиц 10–100 мкм) или сертифицированные стандарты ISO, используемые для калибровки.

6. Методы испытаний

6.1 Подготовка образца

Отбор проб: отберите репрезентативную пробу массой 5–10 г из партии в соответствии с принципом случайной выборки, чтобы избежать сегрегации.

Предварительная обработка: сушка (105°C , 1 час) для удаления влаги или просеивание для удаления крупных частиц (>2000 мкм) при необходимости.

Хранение: хранить в герметичном сухом контейнере во избежание впитывания влаги и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

загрязнения.

6.2 Калибровка прибора

Откалибруйте прибор с помощью стандартного образца (например, NIST SRM 1004) и убедитесь, что отклонение D50 составляет <3%.

Проверьте интенсивность лазера и реакцию детектора, чтобы убедиться, что фоновый шум составляет <0,1%.

6.3 Определение влажной дисперсии

6.3.1 Дисперсия

Добавьте образец в дисперсионную среду (например, 50–100 мл воды) и добавьте диспергатор (0,1–0,5%).

Перемешивайте мешалкой (500–1000 об/мин) в течение 2–5 минут и при необходимости диспергируйте ультразвуком (50–100 Вт, 1–5 минут).

Проверьте дисперсность (отсутствие агломерации под микроскопом).

6.3.2 Измерение

Введите дисперсию в образец и отрегулируйте концентрацию до степени экранирования света 10–20 % (прибор указывает оптимальный диапазон).

Задайте показатель преломления (например, 2,5–3,0 для порошка карбида вольфрама, 1,33 для воды) и выберите расчет по теории Ми.

Время измерения составляло 10–30 секунд, повторялось 3 раза, затем брали среднее значение.

6.4 Определение сухой дисперсии

6.4.1 Дисперсия

Поместите образец в сухой диспергатор и отрегулируйте давление воздуха (0,1–0,3 МПа).

Контролируйте скорость впрыска и степень затемнения в пределах 5%-15%.

6.4.2 Измерение

Установите показатель преломления и модель расчета (Ми или Фраунгофера).

Время измерения составляет 10–30 секунд и повторяется 3 раза.

6.5 Настройки параметров

Диапазон измерения: 0,02–2000 мкм (в зависимости от модели прибора).

регистрируется перед каждым измерением и автоматически вычитается.

7. Обработка данных и представление результатов

7.1 Обработка данных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Программное обеспечение прибора рассчитывает распределение частиц по размерам на основе распределения интенсивности рассеянного света и выводит кумулятивное распределение и распределение частот.

Выбросы (такие как фоновый шум или помехи от пузырьков) были устранены, чтобы обеспечить относительное стандартное отклонение $< 5\%$.

7.2 Выражение результатов

Кривая распределения размера частиц: построена в объемных процентах и представлена в виде графика в соответствии с ISO 9276-1.

Характерный размер частиц:

D10: 10% частиц меньше этого значения

D50: средний размер частиц

D90: 90% частиц меньше этого значения

Ширина распределения: Размах = $(D90 - D10) / D50$

Средний размер частиц: среднеобъемный размер частиц $D[4,3]$ или среднечисленный размер частиц $D[1,0]$ (в зависимости от требований).

Единица измерения: Размер частиц выражается в мкм с двумя десятичными знаками.

7.3 Содержание отчета

Название образца, номер партии

Метод диспергирования (влажный/сухой), среда, диспергатор

Модель прибора, условия измерения (показатель преломления, степень затенения)

Данные о распределении размеров частиц (D10, D50, D90 и т.д.) и кривые

8. Точность и неопределенность

8.1 Повторяемость

Для одного и того же оператора и прибора отклонение D50 составляет $< 3\%$, а отклонение D10 и D90 составляет $< 5\%$.

8.2 Воспроизводимость

Отклонение D50 составляет $< 5\%$ среди разных лабораторий и приборов, а отклонение D10 и D90 составляет $< 10\%$.

8.3 Неопределенность

Источниками являются неравномерная дисперсия образца, ошибка показателя преломления, шум прибора и т. д., которые необходимо объяснить в отчете.

9. Примечания

Равномерность дисперсии: Избегайте чрезмерной обработки ультразвуком, которая приводит к разрушению частиц, или недостаточной обработки ультразвуком, которая приводит к агломерации.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Оптические параметры: Показатель преломления и поглощающая способность должны быть точными. Для порошка карбида вольфрама рекомендуются контрольные значения (например, 2,5-3,0, поглощающая способность 0,1).

Контроль окружающей среды: температура 20-25°C, влажность <65%, избегать вибрационных помех.

Техническое обслуживание прибора: Регулярно очищайте ячейку для образца и оптическую систему, а также проверяйте мощность лазера.

10. Приложение

Приложение А (информационное): контрольные значения показателя преломления и поглощательной способности

Пример: Карбид вольфрама (WC): показатель преломления 2,5-3,0, поглощательная способность 0,1-0,3

Вода: показатель преломления 1,33, поглощательная способность 0

Приложение В (информационное): примеры типичного распределения размеров частиц

Включая интерпретацию кривых унимодального и мультимодального распределения

Приложение С (информационное): Применимость теории Ми и приближения Фраунгофера

Ми: Полный диапазон размеров частиц, требуются оптические параметры

Фраунгофер: >10 мкм, упрощенный расчет

Дополнительные примечания

Предыстория пересмотра:

Стандарт GB/T 19077-2016 заменяет версию 2008 года и использует новейшие технологии ISO 13320:2009, расширяя применимость сухих и мокрых методов, повышая требования к настройке показателя преломления и точности, а также улучшая поддержку наноразмерных порошков (например, <100 нм).

По сравнению с международными стандартами:

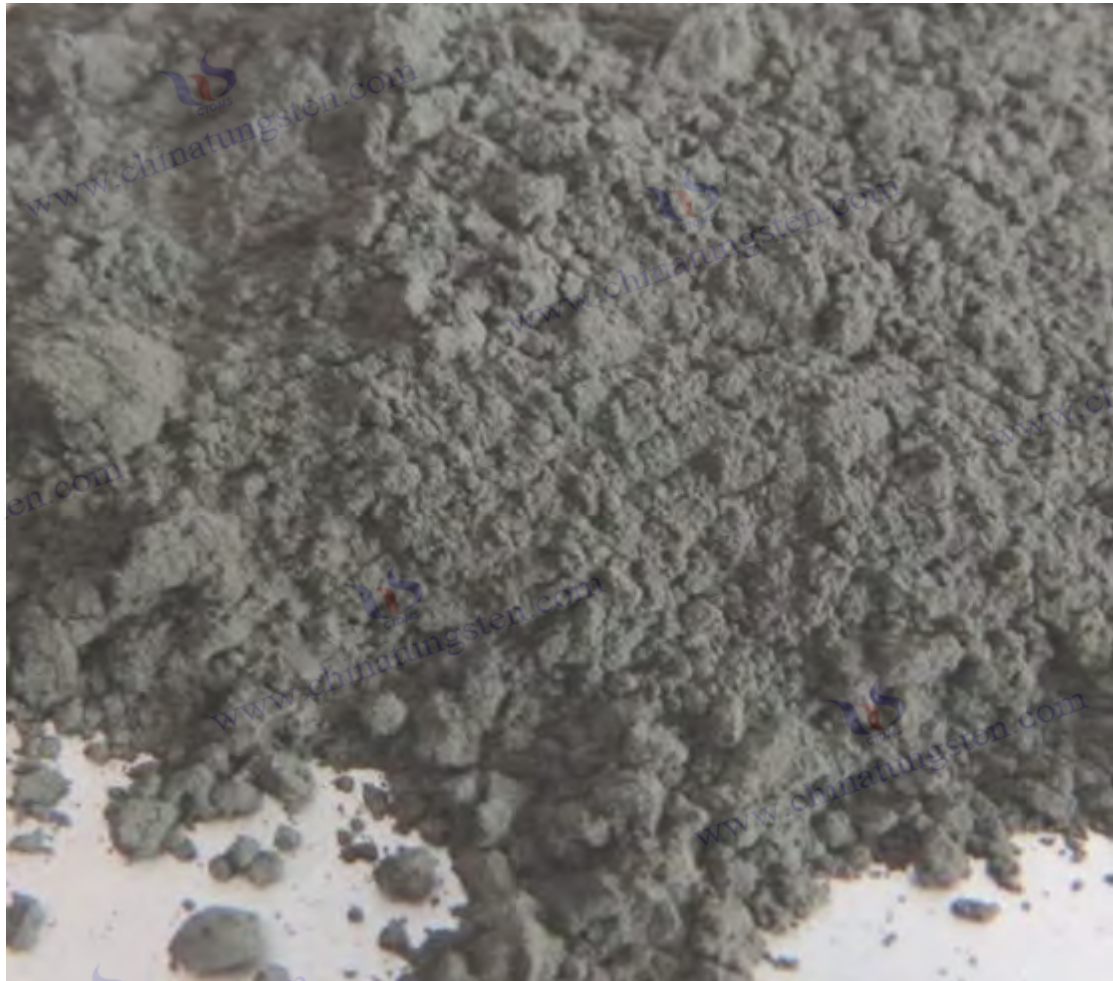
Эквивалент ISO 13320:2009, с тем же техническим содержанием и форматом, адаптированным в соответствии с китайскими стандартами.

По сравнению с ASTM E2490-09 этот стандарт уделяет больше внимания эксплуатационным деталям и калибровке приборов, в то время как ASTM фокусируется на обработке данных и анализе неопределенности.

применимость:

огнеупорные материалы, такие как порошок карбида вольфрама (0,1-10 мкм) и порошок вольфрама (1-50 мкм). Мокрый метод больше подходит для мелкого порошка, в то время как сухой метод подходит для грубого порошка.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

GB/T 5124-2008 Методы химического анализа твердого сплава

Стандартное имя:

Китайский: Метод химического анализа твердого сплава

Русский: Методы химического анализа твердого сплава

Выпуск и реализация:

GB/T 5124.1-2008 (Определение общего содержания углерода): Выпущен 16 июня 2008 г., вступает в силу 1 января 2009 г.

GB/T 5124.2-2008 (Определение содержания свободного углерода): Выпущен 16 июня 2008 г., вступает в силу 1 января 2009 г.

GB/T 5124.3-2008 (Определение содержания кобальта): Выпущен 16 июня 2008 г., вступает в силу 1 января 2009 г.

GB/T 5124.4-2008 (Определение примесных элементов): Выпущен 16 июня 2008 г., вступает в силу 1 января 2009 г.

Выдающий орган: Национальное управление по стандартизации

Статус стандарта: Действует в настоящее время (по состоянию на апрель 2025 г., не заменен новыми стандартами)

Стандарт замены:

GB/T 5124-1995 (версия 1995 года разделена на несколько частей, версия 2008 года пересмотрена и объединена)

1. Область применения

Этот стандарт определяет метод анализа химического состава твердого сплава, включая определение общего углерода (Total Carbon), свободного углерода (Free Carbon), кобальта (Co) и примесных элементов (таких как Fe, Mo, Ni и т. д.). Он применим к анализу химического состава сырья твердого сплава (такого как порошок карбида вольфрама WC, порошок кобальта Co) и спеченных изделий из твердого сплава. Этот стандартный метод также может быть использован в качестве эталона для анализа других карбидов металлов (таких как TiC, TaC, NbC). Результаты анализа используются для контроля качества, оптимизации процесса и приемки продукции.

2. Нормативные ссылки

Следующие документы являются нормативными ссылками настоящего стандарта и используются совместно с настоящим стандартом:

GB/T 223.5-2008 «Определение содержания углерода и серы в стали и сплавах»

GB/T 3249-2009 «Определение общего содержания углерода в порошках тугоплавких металлов и порошках смесей»

GB/T 4010-1994 Методы отбора и подготовки проб для химического анализа металлических материалов

GB/T 6682-2008 Технические условия и методы испытаний воды, используемой в аналитических

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

лабораториях (эквивалент ISO 3696:1987)

Примечание: к настоящему стандарту применяются последние версии указанных документов.

3. Общие положения

Лабораторные условия: Анализ следует проводить в чистом, непыльном помещении при температуре 20–25 °C и относительной влажности <65%.

Требования к образцу: подготовить в соответствии с GB/T 4010, чтобы избежать загрязнения или потери компонентов (например, окисления, улетучивания).

Чистота реагентов: Все реагенты были аналитической степени чистоты (AR) и высшей степени чистоты (GR) при необходимости.

Качество воды: Соответствует стандарту GB/T 6682, класс 3 или выше, чистая вода.

Калибровка прибора: откалибруйте прибор перед анализом, чтобы обеспечить точность и повторяемость.

Требования безопасности: При работе с кислотами, щелочами или высокими температурами необходимо выполнять работы в вытяжном шкафу и использовать средства индивидуальной защиты.

4. GB/T 5124.1-2008: Определение общего содержания углерода

4.1 Принцип метода

Образец цементированного карбида сжигается при высокой температуре в потоке кислорода, и весь углерод (включая связанный углерод и свободный углерод) превращается в CO₂. Общее содержание углерода определяется методом инфракрасного поглощения.

4.2 Реагенты и инструменты

Кислород: чистота ≥99,5%, регулируемая скорость потока.

Флюс:

олова высокой чистоты (Sn, чистота ≥99,9%): способствуют горению.

Порошок железа высокой чистоты (Fe, чистота ≥99,9%): снижает температуру плавления.

инструмент:

Высокочастотная индукционная печь для сжигания (мощность ≥ 2 кВт, температура 1350-1450°C).

Инфракрасный анализатор углерода и серы (например, LECO CS-600 или CS-844).

4.3 Образцы

Масса: 0,1-0,5 г (точность 0,0001 г).

Состояние: Измельчить до <0,2 мм (80 меш) для удаления масла и оксидного слоя.

4.4 Этапы тестирования

Взвесьте образец и поместите его в чистую фарфоровую лодочку.

Добавьте флюс (Sn 1,0 г, Fe 0,5 г) и тщательно перемешайте.

Поместите фарфоровую лодочку в печь для сжигания, подайте кислород (расход 2–3 л/мин), нагрейте до 1350–1450 °C и обжигайте в течение 5–10 секунд.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CO₂ измеряется инфракрасным детектором и регистрируется интенсивность пика поглощения. Прибор калибруется с использованием стандартного образца (например, NIST SRM 276b, содержание углерода 6,0% -6,5%), и рассчитывается общее содержание углерода.

4.5 Расчет результата

Общее содержание углерода (массовая доля, %) = (показания прибора × калибровочный коэффициент) / масса образца

Диапазон измерения: 0,1%-10%.

Точность: ±0,01% (ОСО повторяемости <2%).

4.6 Примечания

Образцы необходимо высушить (105°C, 1 час), чтобы избежать воздействия влаги.

Топку необходимо регулярно чистить, чтобы удалить остатки топлива.

Недостаточный приток кислорода может привести к неполному сгоранию, поэтому необходимо проверить газопровод.

5. GB/T 5124.2-2008: Определение содержания свободного углерода

5.1 Принцип метода

Свободный углерод (элементарный углерод) в образце растворяется кислотой и его содержание определяется окислительно-титрационным методом. Связанный углерод (углерод в WC) нерастворим в кислоте и не участвует в реакции.

5.2 Реагенты и инструменты

Смесь кислоты и азотной кислоты: H₂SO₄ (1+1, разбавленная 1:1 по объему) и HNO₃ (1+1) смешиваются в соотношении 1:1.

Дихромат калия (K₂Cr₂O₇): 0,1 моль/л стандартный раствор.

Дифениламинсульфонат натрия: индикатор, 0,2% (м/о) водный раствор.

инструмент:

Электрическая плита (регулировка температуры до 100°C).

Прибор для титрования (бюретка объемом 50 мл, точность 0,02 мл).

5.3 Образцы

Масса: 1,0-2,0 г (точность 0,0001 г).

Состояние: Измельчен до <0,2 мм, поверхностные загрязнения удалены.

5.4 Этапы тестирования

Взвесьте образец и поместите его в коническую колбу объемом 250 мл.

Добавьте 50 мл смеси серной и азотной кислот, накройте часовым стеклом и нагрейте на плитке до 80–90 °C.

После перемешивания в течение 30 минут свободный углерод окислился до CO₂, и раствор стал

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

прозрачным.

Охладите до комнатной температуры, промойте остаток дистиллированной водой до нейтральной реакции, профильтруйте в мерную колбу емкостью 100 мл и доведите до объема.

Возьмите 20 мл фильтрата, добавьте стандартный раствор $K_2Cr_2O_7$ и титруйте до пурпурно-красной конечной точки (без изменения цвета в течение 30 секунд), запишите потребленный объем.

5.5 Расчет результата

Содержание свободного углерода (массовая доля, %) = $(V \times C \times 0,012 \times 100) / m$

V: Объем израсходованного раствора $K_2Cr_2O_7$ (мл)

C: концентрация $K_2Cr_2O_7$ (моль/л)

0,012: Коэффициент преобразования молярной массы углерода (г/ммоль)

m: масса образца (г)

Диапазон измерения: 0,01%-1,0%.

Точность: $\pm 0,005\%$ (ОСО повторяемости $< 3\%$).

5.6 Примечания

Операция проводилась в вытяжном шкафу, чтобы избежать вдыхания паров кислоты.

Конечную точку титрования необходимо точно определить и при необходимости скорректировать с помощью холостого опыта.

Связанный углерод (например, WC) в образце не влияет на результаты, но необходимо убедиться в отсутствии других восстанавливающих примесей.

6. GB/T 5124.3-2008: Определение содержания кобальта

6.1 Принцип метода

Содержание кобальта определялось методом оптической эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (ИСП-ОЭС).

6.2 Реагенты и инструменты

Азотная кислота (HNO_3): раствор 1+1 (разбавление 1:1 по объему).

Соляная кислота (HCl): раствор 1+1.

Стандартный раствор кобальта: 10 мг/л (приготовлен с использованием $CoCl_2$, соответствует национальным стандартным веществам).

Инструмент: спектрометр ICP-OES (например, PerkinElmer Optima 8300 или Thermo iCAP7000).

6.3 Образец для испытаний

Масса: 0,5-1,0 г (точность 0,0001 г).

Состояние: Измельченный до $< 0,2$ мм, сухой.

6.4 Этапы тестирования

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Взвесьте образец и поместите его в стакан из политетрафторэтилена объемом 100 мл.
Добавьте 20 мл HNO_3 и 10 мл HCl , нагрейте до 80 °C и перемешивайте до полного растворения (примерно 30 мин).
После охлаждения перелейте в мерную колбу емкостью 100 мл и доведите объем до метки дистиллированной водой.
Линия излучения кобальта была измерена методом ICP-OES (рекомендованная длина волны 228,616 нм, второй вариант 231,160 нм).
Для расчета концентрации кобальта была построена калибровочная кривая с использованием стандартного раствора кобальта (0,1–10 мг/л).

6.5 Расчет результата

Содержание кобальта (массовая доля, %) = $(C \times V) / (m \times 10^{-4}) \times 100$

C: Концентрация кобальта в растворе (мг/л)

V: фиксированный объем (мл, обычно 100 мл)

m: масса образца (г)

Диапазон измерения: 0,1%-30%.

Точность: $\pm 0,02\%$ (ОСО повторяемости $< 2\%$).

6.6 Примечания

Вольфрамовая матрица может мешать. При необходимости добавьте маскирующий агент (например, ЭДТА, 0,1 моль/л) или оптимизируйте параметры прибора.

Стандартный раствор необходимо готовить каждый день, чтобы избежать ухудшения его свойств.

7. GB/T 5124.4-2008: Определение примесных элементов

7.1 Принцип метода

Образец растворяли в кислоте и определяли содержание примесных элементов (таких как Fe, Mo, Ni, Cr, Al и т. д.) методом ИСП-ОЭС.

7.2 Реагенты и инструменты

Азотная кислота (HNO_3): раствор 1+1.

Соляная кислота (HCl): раствор 1+1.

Стандартный раствор: концентрация каждого элемента (например, Fe, Mo, Ni) составляет 1–10 мг/л, что соответствует национальным стандартным веществам.

Прибор: спектрометр ICP-OES.

7.3 Образцы для испытаний

Масса: 0,5–1,0 г (точность 0,0001 г).

Состояние: шлифовка до $< 0,2$ мм.

7.4 Процедуры испытаний

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Образец растворяли таким же образом, как на шаге 6.4 (HNO₃ 20 мл, HCl 10 мл, растворяли при 80°C).

После охлаждения объем довели до 100 мл и определяли характерные спектральные линии каждого элемента методом ИСП-ОЭС:

Fe: 238,204 нм

Mo: 202,032 нм

Никель: 231,604 нм

Cr: 267,716 нм

Al: 396,152 нм

Используйте стандартные растворы каждого элемента (0,01–10 мг/л), чтобы построить калибровочную кривую и рассчитать концентрацию.

7.5 Расчет результата

Содержание примесей (массовая доля, %) = $(C \times V) / (m \times 10^4) \times 100$

C: концентрация элемента в растворе (мг/л)

V: фиксированный объем (мл, обычно 100 мл)

m: масса образца (г)

Диапазон измерения: 0,001%-1,0%.

Точность: $\pm 0,001\%$ (ОСО повторяемости $< 5\%$).

7.6 Примечания

Матрицы с высоким содержанием вольфрама могут создавать спектральные помехи, требующие корректировки длины волны или использования коррекции фона.

При одновременном измерении нескольких элементов следите за тем, чтобы спектральные линии не перекрывались.

8. Точность и неопределенность

8.1 Повторяемость

Один и тот же оператор и прибор имеют отклонения в результатах измерений:

Общий углерод: $\pm 0,01\%$

Свободный углерод: $\pm 0,005\%$

Кобальт: $\pm 0,02\%$

Примеси: $\pm 0,001\%$

8.2 Воспроизводимость

Результаты разных лабораторий и приборов имеют отклонение < 2 -кратного предела повторяемости.

8.3 Неопределенность

Источники включают однородность образца, калибровку прибора, чистоту реагента и т. д.,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

которые необходимо оценить в отчете.

9. Примечания

Подготовка образца: Чтобы избежать попадания примесей, таких как железо, во время измельчения, рекомендуется использовать карбидную ступку.

Техническое обслуживание прибора: Регулярно калибруйте печь для сжигания и ИСП-ОЭС, чтобы обеспечить чувствительность и стабильность.

Безопасная эксплуатация: Растворение кислоты и высокотемпературное сжигание необходимо проводить в вытяжном шкафу, надев защитные очки и перчатки.

Дополнительные примечания

Предыстория пересмотра:

Стандарт GB/T 5124-2008 обновил метод анализа по сравнению с версией 1995 года, введя ICP-OES вместо традиционной спектрофотометрии (например, определения кобальта), повысив точность и возможности многоэлементного анализа для удовлетворения спроса на сырье высокой чистоты в отрасли производства твердого сплава.

По сравнению с международными стандартами:

По сравнению с ISO 11876:2010 «Химический анализ твердого сплава» этот стандарт больше фокусируется на классических химических методах (таких как метод сжигания и метод титрования), в то время как ISO отдает предпочтение инструментальному анализу (например, ICP-MS).

Стандарт ASTM E1019-18 охватывает схожее содержание, но уделяет больше внимания автоматизации и одновременному определению нескольких элементов.

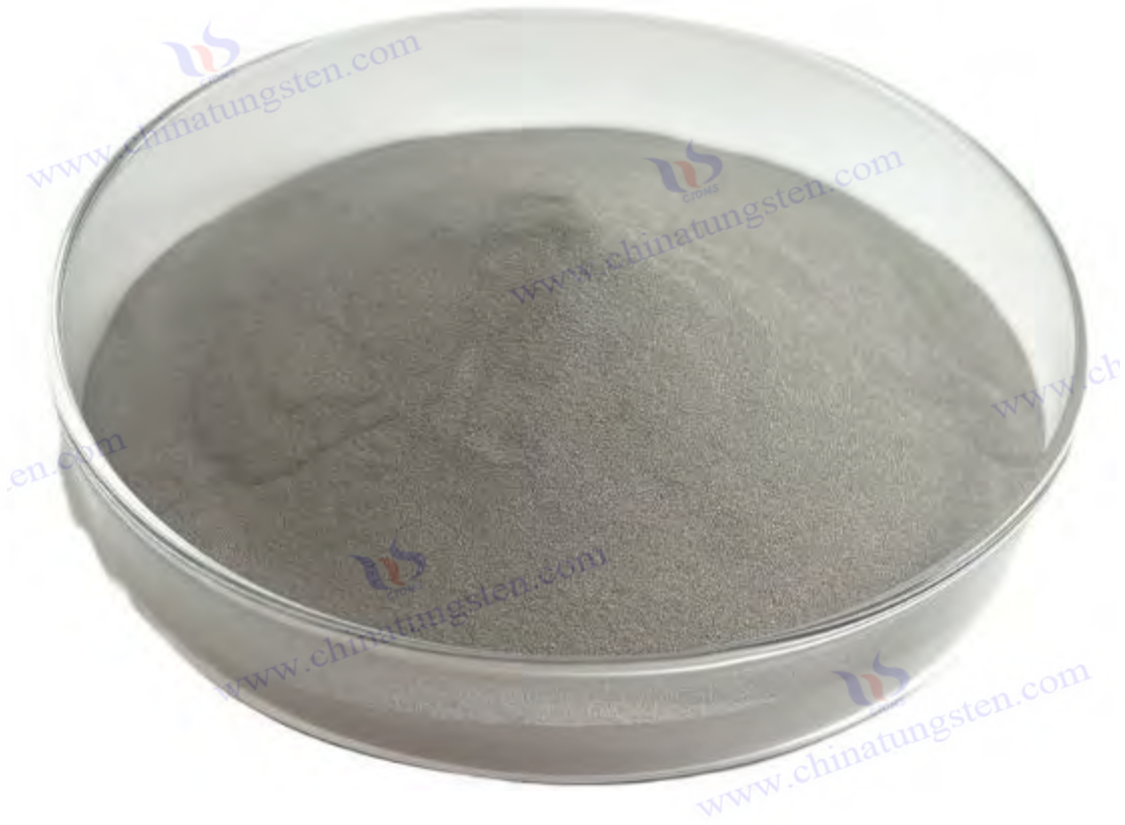
применимость:

Подходит для компонентного анализа порошка карбида вольфрама (WC), карбида WC-Co и композитных материалов (таких как WC- TiC), охватывая диапазон от следовых до высоких содержаний.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

www.chinatungsten.com

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Метод определения размера частиц Фишера

Fisher Sub-Sieve Sizer (FSSS) — это метод измерения среднего размера частиц порошков путем воздухопроницаемости. Он широко используется для анализа размера частиц металлических порошков (таких как порошок карбида вольфрама WC), керамических порошков и других мелкодисперсных материалов. Результат Fisher Sub-Sieve Sizer выражается в микронах (мкм), что представляет собой средний размер частиц порошка. Он особенно подходит для мелкодисперсных порошков с диапазоном размеров частиц 0,2–50 мкм. Этот метод косвенно оценивает размер частиц путем измерения сопротивления воздухопроницаемости в порошковом слое. Он прост в эксплуатации и имеет хорошую повторяемость. Это стандартный метод испытания размера частиц в порошковой металлургии и материаловедении.

1. Определение и принцип

Определение:

Размер частиц Фишера относится к среднему размеру частиц порошка, измеренному с помощью анализатора сит Фишера, обычно регистрируемому как размер частиц FSSS (единица: мкм). Он отражает эквивалентный сферический диаметр частиц порошка. В отличие от метода просеивания или лазерного метода определения размера частиц, FSSS больше подходит для характеристики тонких порошков, особенно при производстве сырья из цементированного карбида (такого как порошок WC).

Принцип измерения

Метод воздухопроницаемости :

Определение размера частиц по Фишеру основано на соотношении между сопротивлением воздуха, проходящего через сжатый слой порошка, и размером частиц. Когда воздух проходит через образец порошка с постоянной скоростью потока, мелкие частицы будут оказывать большее сопротивление из-за их большой удельной площади поверхности и малых пор, в то время как более крупные частицы будут иметь меньшее сопротивление.

Математическая основа :

Согласно уравнению Козени-Кармана, сопротивление воздухопроницанию связано с удельной площадью поверхности (S) и пористостью (ε) порошка:

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

в:

ΔP: Перепад давления (Па)

μ: Вязкость воздуха (Па·с)

v: скорость воздуха (м/с)

L: Толщина слоя порошка (м)

S: Удельная площадь поверхности (м²/кг)

ε: Пористость

можно преобразовать в средний размер частиц (D_FSSS) путем измерения ΔP и объединения его

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

с калибровочной кривой при стандартных условиях.

Предположения : Частицы имеют сферическую форму, слой порошка равномерно сжат, а поток воздуха ламинарный.

Функции

Применимый диапазон: 0,2–50 мкм, точность $\pm 0,05$ мкм.

Преимущества: Оборудование простое и подходит для быстрого обнаружения.

Ограничения: Чувствительность к форме частиц; несферические частицы могут вызывать отклонения.

2. Метод определения

Определение размера частиц по Фишеру осуществляется в соответствии со стандартными процедурами, такими как ASTM B330 или ISO 10070. Ниже приводится обзор общего метода.

оборудование

Анализатор субсита Fisher : включает в себя воздушный насос, манометр, трубку для отбора проб (внутренний диаметр обычно 5-10 мм), измеритель водяного столба или цифровой датчик давления.

Весы : точность 0,001 г, используются для взвешивания образцов.

Печь : используется для сушки образцов, температура поддерживается на уровне 100–120 °C.

Стандартный образец : Калибровочный порошок с известным размером частиц (например, стандартный порошок WC).

Процедура

Подготовка образца :

Отбор проб: Случайным образом отберите образцы массой 5–10 г из партии порошка, используя делитель проб для обеспечения репрезентативности.

Сушка: Удалите влагу в духовке (105°C, 2 часа) до содержания влаги $< 0,1\%$.

Охлаждение: Охладите до комнатной температуры в эксикаторе, чтобы избежать поглощения влаги.

Загрузка и сжатие образца :

Взвешивание: Точно взвесьте указанную массу (например, 2,5 г туалетного порошка, отрегулируйте в соответствии с плотностью).

Заполнение пробирки для образца: насыпьте порошок в пробирку для образца и сожмите его до фиксированной высоты (обычно 10 мм) с помощью уплотнителя при постоянном давлении (например, 2–5 кПа).

Проверка: Убедитесь, что поверхность порошкового слоя ровная, без трещин и имеет постоянную пористость ($\epsilon \approx 0,4–0,5$).

Калибровка прибора :

Откалибруйте прибор с помощью стандартного образца (например, порошка WC FSSS 1,0 мкм) и отрегулируйте скорость потока воздуха до стандартного значения (например, 0,1 л/мин).

Запишите разницу давления калибровки (ΔP), чтобы обеспечить соответствие стандартной кривой.

Измерение :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Запустите воздушный насос и отрегулируйте расход до постоянного значения.

Запишите разницу высот водяного столба (см H₂O) или цифровое значение давления (Па) и повторите 3 раза, чтобы получить среднее значение.

Преобразуйте $\Delta P \backslash \Delta P$ в размер частиц FSSS (мкм), используя встроенную в прибор таблицу преобразования или программное обеспечение.

Результаты проверки :

Одна и та же партия образцов была измерена трижды с отклонением <5%.

Сравните со стандартными образцами, чтобы убедиться, что погрешность составляет <0,1 мкм.

Экспериментальные данные

О б р а з е ц	Масса(г)	Высота сжатия (мм)	Разница давлений (см H ₂ O)	Размер частиц FSSS (мкм)
Туалетный порошок 1	2.5	10	15.2	1.2
Туалетный порошок 2	2.5	10	10.5	2.0
Туалетный порошок 3	2.5	10	6.8	3.5

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

3. Оборудование и этапы эксплуатации

Структура оборудования

Воздушная система : микронасос обеспечивает постоянный поток воздуха, который точно контролируется расходомером (0,05–0,2 л/мин).

Пробирка : стеклянная или металлическая, диаметром 5–10 мм, с фильтровальной бумагой для поддержки порошка.

Измерение давления : обычный манометр водяного столба (точность 0,1 см H₂O) или современный цифровой датчик (точность 1 Па).

Калибровочное устройство : стандартная диафрагма или порошок с известным размером частиц, используемые для калибровки нулевой точки и чувствительности прибора.

Подробные шаги

Прогрейте прибор : включите прибор и дайте ему поработать в течение 10 минут, чтобы стабилизировать поток воздуха и температуру (20–25 °C).

Взвесьте образец : взвесьте 2,5 г порошка WC с помощью аналитических весов (погрешность <0,001 г) и запишите массу.

Заполните пробирку для образца : медленно насыпьте порошок, осторожно постучите, чтобы удалить пузырьки, и уплотните его уплотнителем до высоты 10 мм и давления 2 кПа, поддерживая пористость $0,45 \pm 0,05$.

Подключите систему : установите трубку для отбора проб в прибор, обеспечив герметичность.

Отрегулируйте поток воздуха : установите скорость потока 0,1 л/мин и дождитесь стабилизации

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

давления (около 30 секунд).

Запись данных : определите разницу в водяном столбе (например, 15 см H₂O) и рассчитайте размер частиц FSSS, просмотрев таблицу или введя ее в программное обеспечение.

Очистите и повторите : достаньте образец, очистите трубку для образца сжатым воздухом, повторите измерение дважды и возьмите среднее значение.

Меры предосторожности

Сушка образца имеет решающее значение, влажность > 0,1% приведет к изменению пористости и увеличению размера частиц на 0,2–0,5 мкм .

Сила сжатия должна быть постоянной. Слишком сильное ($\epsilon < 0,4$) или слишком слабое ($\epsilon > 0,5$) повлияет на разницу давления.

Температура окружающей среды поддерживалась на уровне 20–25 °C, чтобы избежать изменения вязкости воздуха.

4. Факторы влияния и оптимизация

На точность определения размера частиц по Фишеру влияет множество факторов. Ниже приведены анализы и предложения по оптимизации.

Факторы влияния

Форма частиц :

Измеренное значение для сферических частиц близко к фактическому размеру частиц, в то время как значение FSSS для несферических (например, игольчатых) частиц больше (отклонение 10%-20%) из-за повышенного сопротивления.

Пористость :

Если пористость слишком низкая ($< 0,4$), сопротивление слишком большое, а размер частиц слишком маленький; если пористость слишком высокая ($> 0,5$), сопротивление недостаточное, а размер частиц слишком большой.

Содержание влаги :

Содержание влаги > 0,2% вызывает агломерацию частиц и увеличивает значение FSSS на 0,3–0,8 мкм .

Стабильность воздушного потока :

Колебание расхода > 0,01 л/мин, погрешность перепада давления $\pm 0,5$ см H₂O, отклонение размера частиц $\pm 0,1$ мкм .

Стратегия оптимизации

Предварительная обработка образца : сушка до влажности < 0,05%, ультразвуковое диспергирование в течение 5 минут для уменьшения агломерации.

Контроль сжатия : при использовании стандартного уплотнителя давление составляет 2–3 кПа, а пористость стабилизируется на уровне $0,45 \pm 0,02$.

Калибровка прибора : проводите калибровку ежемесячно с использованием стандартного порошка WC (FSSS 1,0 мкм), погрешность должна контролироваться в пределах $\pm 0,05$ мкм.

Управление окружающей средой : постоянная температура и влажность (25°C, влажность < 50%), стабилизированный поток воздуха на уровне $0,1 \pm 0,005$ л/мин.

Экспериментальные данные :

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

С о с т о я н и е	Влага(%)	Пористость	Разница давлений (см H ₂ O)	Размер частиц FSSS (мкм)
Невысушенный (0,3% влажности)	0,3	0,48	16.0	1.4
Сухое + Оптимизированное сжатие	0,05	0,45	15.2	1.2

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

5. Сценарии применения

Определение размера частиц по Фишеру широко используется в производстве и контроле качества порошковых материалов. Ниже приведены конкретные приложения.

Производство твердого сплава

Применение : Для измерения размера порошка WC и контроля размера зерна и свойств твердого сплава.

Случай : Группа определила, что FSSS порошка WC составляет 1,2 мкм, а твердость полученного твердого сплава — HV 2200, при этом однородность зерна увеличивается на 15% (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Термический спрей-порошок

Применение : Для оценки размера частиц распыляемого порошка WC-Co и обеспечения плотности распыляемого покрытия (>99%).

Случай : Исследование показало, что FSSS порошка WC-12Co составляет 3,5 мкм, твердость покрытия HVOF составляет HV 1350, а скорость износа составляет 0,06 мм³/Н·м (информация с сайта China Tungsten Online).

Порошковая металлургия

Применение : для определения размера частиц металлического порошка (например, W, Mo) и оптимизации производительности спекания.

Случай : Компания определила, что FSSS порошка W составляет 2,0 мкм, а плотность спеченного тела — 98,5% (информация с сайта China Tungsten Online).

Контроль качества

Применение : Для определения постоянства размера частиц между партиями. Отклонение составляет менее 0,1 мкм.

Подвести итог

Определение размера частиц Фишера использует метод воздухопроницаемости для определения среднего размера частиц порошка (0,2-50 мкм) на основе принципа Козени-Кармана и преобразует значение FSSS с использованием разницы давления. Метод включает сушку образца (влажность <0,1%), сжатие (пористость 0,45), измерение расхода воздуха (0,1 л/мин), простое оборудование и точность ±0,05 мкм. Необходимо оптимизировать такие влияющие факторы, как форма частиц и влажность, а приложение охватывает цементированный карбид, распыляемый порошок и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошковую металлургию для обеспечения постоянства характеристик материала (информация с веб-сайта China Tungsten Online).



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Насыпная плотность и метод ее определения

Насыпная плотность и метод ее определения

Насыпная плотность относится к массе порошка на единицу объема в естественно уложенном состоянии, обычно в г/см^3 или кг/м^3 , и является важным параметром для характеристики физических свойств порошка. Насыпная плотность отражает размер, форму, поверхностные характеристики и режим укладки частиц порошка и имеет руководящее значение для таких процессов, как порошковая металлургия, термическое напыление и производство цементированного карбида. Метод определения прост и эффективен, и обычно используются две формы: насыпная плотность и насыпная плотность после утряски, которые выполняются с помощью стандартных контейнеров и операций взвешивания.

1. Определение и значение определение

Насыпная плотность: отношение массы порошка к объему контейнера после заполнения контейнера порошком при определенных условиях (например, естественная насыпная упаковка или виброуплотнение).
Насыпная плотность = m/V Где:

m : масса порошка (г)

V : Объем, занимаемый порошком (см^3)

Насыпная плотность : состояние порошка, свободно падающего в контейнер без сжатия или вибрации.

Насыпная плотность после уплотнения: плотность порошка после его вибрации или уплотнения в контейнере, в результате чего частицы перестраиваются в более плотное состояние.

значение

Руководство по процессу : Насыпная плотность влияет на текучесть, эффективность заполнения и спекаемость порошка. Например, порошок карбида вольфрама (WC) имеет высокую насыпную плотность и лучшую плотность спекания.

Контроль качества : отражает постоянство между партиями порошка. Большие отклонения могут привести к дефектам формования.

Свойства материала : тесно связаны с размером частиц, формой и шероховатостью поверхности и являются важными показателями для характеристики порошков.

Типичное значение

Тип порошка	Насыпная плотность (г/см^3)	Плотность набивки (г/см^3)
Порошок WC (1мкм)	4,5-5,0	5,5-6,0
WC-12Co	4.0-4.5	4.8-5.2
Порошок W (5 мкм)	6.0-7.0	7,5-8,5

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Факторы влияния

На объемную плотность влияет множество факторов, которые подробно проанализированы ниже.

Размер частиц

Влияние : Чем меньше размер частиц, тем больше удельная площадь поверхности, больше пустот между частицами и ниже плотность упаковки; чем больше размер частиц, тем меньше пустот и выше плотность.

Экспериментальные данные :

Размер частиц WC (мкм)	Насыпная плотность (г/см ³)	Плотность набивки (г/см ³)
0,5	4.2	5.3
2.0	4.8	5.8
5.0	5.2	6.2

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

Форма частиц

Воздействие : Сферические частицы плотно упакованы и имеют высокую плотность; частицы неправильной или игольчатой формы имеют большие зазоры и низкую плотность.

Случай : Насыпная плотность сферического порошка WC (сферичность>95%) составляет 4,8 г/см³, тогда как насыпная плотность нерегулярного порошка WC составляет всего 4,3 г/см³.

Свойства поверхности

Воздействие : Порошки с шероховатой поверхностью или статическим электричеством легко агломерируются, пористость увеличивается, а плотность уменьшается; гладкие поверхности способствуют плотной укладке.

Эксперимент : Плотность необработанного порошка WC составляет 4,5 г/см³, а после плазменной сфероидизации достигает 5,0 г/см³.

Содержание влаги

Воздействие : Содержание влаги > 0,2% приводит к слипанию частиц, увеличению пористости и снижению плотности.

Данные : Насыпная плотность порошка WC с содержанием воды 0,5% составляет 4,3 г/см³, после высыхания она увеличивается до 4,8 г/см³.

Метод укладки

Воздействие : Плотность в рыхлом состоянии низкая. После уплотнения частицы перестраиваются, пустоты уменьшаются, а плотность увеличивается на 10%-20%.

3. Метод определения

Насыпная плотность определяется в соответствии со стандартными процедурами, такими как ASTM B212 (насыпной), ASTM B527 (насыпной) или ISO 3923. Ниже приводится обзор метода.

насыпная плотность

Принцип : Порошок свободно падает в контейнер без приложения внешней силы, и измеряется

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

плотность в естественном состоянии укладки.

шаг :

Подготовьте сухие образцы (влажность < 0,1%).

С помощью воронки медленно высыпьте порошок в стандартный мерный цилиндр (объемом 25 или 100 см³), оставляя каплю высотой 10–15 см.

Дождитесь, пока порошок соберется естественным образом, разгладьте поверхность скребком и запишите объем (V).

Взвесьте массу порошка в мерном цилиндре (m) и рассчитайте плотность (m/V).

насыпная плотность

Принцип : Под действием механической вибрации или удара частицы порошка перестраиваются и измеряется плотность в более плотном состоянии.

Шаг :

Заполните баллон методом свободной упаковки.

Поместите мерный цилиндр на вибратор и вибрируйте 100–300 раз (частота 50–60 раз/мин, амплитуда 3 мм) или постукивайте вручную до тех пор, пока объем не перестанет изменяться.

Запишите объем после уплотнения (V'), взвесьте массу (m) и рассчитайте плотность (m/V').

Экспериментальные данные

Образец	Масса(г)	Свободный объем (см ³)	Насыпная плотность (г/см ³)	Объем крана (см ³)	Плотность набивки (г/см ³)
WC (1мкм)	50	10.5	4.76	8.9	5.62
WC-12Co	50	11.8	4.24	10.2	4.90
W (5мкм)	50	7.8	6.41	6.5	7.69

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

4. Оборудование и этапы эксплуатации

оборудование

Мерный цилиндр : стандартный стеклянный мерный цилиндр (25, 50 или 100 см³), градуированный до ±0,1 см³.

Воронка : диаметр отверстия 5-10 мм, регулируемая высота падения.

Весы : точность 0,001 г, используются для взвешивания массы пороха.

Вибратор : Механическое уплотнительное устройство с амплитудой 1-5 мм и регулируемой частотой (50-60 Гц).

Печь : температура 100–120 °C, используется для сушки образцов.

Скребок : разгладьте поверхность порошка, чтобы избежать уплотнения.

Подробные шаги

Подготовка образца :

Отбор проб: Произвольно отберите 50–100 г из партии порошка, используя пробоотборник для обеспечения однородности.

Сушка: сушить в духовке при температуре 105°C в течение 2 часов, влажность <0,1%, остудить

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

до комнатной температуры (в эксикаторе).

Определение насыпной плотности :

Выберите мерный цилиндр объемом 100 см³ и запишите его пустой вес (m_0).

Медленно засыпайте порошок с помощью воронки, слоем 15 см, избегая ударов и вибрации.

Слегка поскоблите поверхность скребком и запишите общий вес (m_1) и объем (V).

Расчет: Насыпная плотность = $(m_1 - m_0) / V$.

Определение плотности набивки :

Заполните мерный цилиндр, как при методе насыпного заполнения, и запишите начальный объем.

Поместите его в уплотнитель, установите амплитуду 3 мм и уплотните 200 раз (или пока объем не стабилизируется).

Запишите уплотненный объем (V') и общий вес (m_1).

Расчет: Плотность насыпки = $(m_1 - m_0) / V'$.

Проверка повторяемости :

Измерение повторялось 3 раза, и среднее значение принималось, если отклонение составляло менее 2%.

Проверьте внутреннюю часть цилиндра, чтобы убедиться в отсутствии прилипшего порошка.

Меры предосторожности

Избегайте искусственного уплотнения, которое влияет на подлинность насыпной плотности.

Количество вибраций должно быть постоянным. Слишком малое количество вибраций (<100 раз) приведет к низкой плотности, а слишком большое количество вибраций (>300 раз) не приведет к существенным изменениям.

Влажность окружающей среды <50% для предотвращения помех от влаги.

5. Сценарии применения

Определение насыпной плотности имеет широкий спектр применения в области порошковых материалов. Ниже приведены конкретные сценарии и случаи.

Производство твердого сплава

Применение : Для оценки эффективности заполнения порошком WC и оптимизации процессов прессования и спекания.

Случай : Группа определила, что насыпная плотность порошка WC составила 4,8 г/см³, плотность уплотнения — 5,8 г/см³, плотность прессования прессованной заготовки увеличилась на 10%, а твердость составила HV 2200 (информация с сайта China Tungsten Online).

Термический порошок-спрей

Применение : Для проверки текучести и эффективности загрузки порошка WC-Co и обеспечения равномерности распыления.

Случай : Исследование показало, что плотность утряски WC-12Co составила 4,9 г/см³, пористость покрытия, нанесенного методом HVOF, составила <1%, а износостойкость улучшилась на 30% (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Порошковая металлургия

Применение : Для измерения насыпной плотности порошков W и Mo и контроля усадки при спекании.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Случай : Компания измерила плотность утряски порошка W, которая составила 7,7 г/см³, усадка спеченного тела была стабильной на уровне 15%-18%, а плотность достигла 99% (информация с сайта China Tungsten Online).

Контроль качества

Применение : Испытание на постоянство плотности между партиями, отклонение <5% считается допустимым.

Случай : Производственные испытания порошка WC с колебанием насыпной плотности <0,1 г/см³ гарантируют стабильную производительность партии (информация с сайта China Tungsten Online).

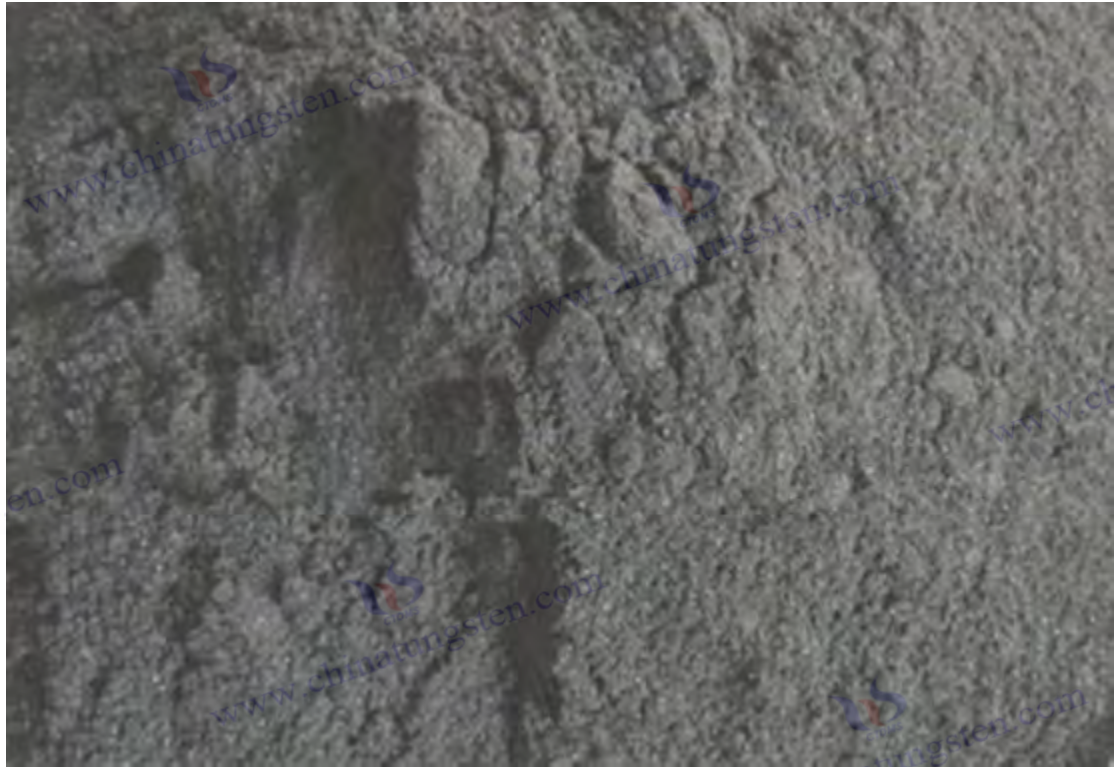
Оптимизация хранения и транспортировки

Применение : Для оценки объема упаковки порошка и снижения транспортных расходов.

Подвести итог

Насыпная плотность — это параметр, характеризующий соотношение между массой и объемом порошка. Она подразделяется на насыпную плотность (естественная упаковка) и плотность после постукивания (после постукивания), на которую влияют размер частиц, форма, поверхностные характеристики и влажность. Метод определения осуществляется с помощью стандартного мерного цилиндра и инструмента для постукивания. Насыпная плотность порошка WC составляет 4,5-5,0 г/см³, а плотность после постукивания — 5,5-6,0 г/см³ с точностью ±0,01 г/см³. С точки зрения применения он направляет процессы твердого сплава, термического напыления и порошковой металлургии для улучшения качества продукции и эффективности процесса (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Оптимизация влажности (<0,1%) и условий постукивания может повысить точность определения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение

Метод определения текучести порошка карбида вольфрама

Текучесть порошка карбида вольфрама (WC) относится к способности порошка свободно течь под действием силы тяжести или других внешних сил, обычно характеризуемой скоростью потока (секунды/50 г) или временем потока через стандартную воронку за единицу времени. Текучесть является важным физическим свойством порошковых материалов, которое напрямую влияет на эффективность его заполнения, однородность и стабильность процесса в термическом напылении, порошковой металлургии и производстве цементированного карбида. Метод скорости потока Холла обычно используется для измерения текучести порошка карбида вольфрама. Текучесть оценивается путем измерения времени, необходимого для прохождения 50 г порошка через стандартную воронку.

1. Определение и значение
определение

Текучесть : способность порошка свободно течь через определенное отверстие (например, отверстие диаметром 2,5 мм в воронке Холла) без внешнего давления.

Показатели определения :

Скорость потока Холла: время, необходимое для вытекания 50 г порошка (единица: секунды/50 г). Чем короче время, тем лучше текучесть.

Если порошок не течет свободно, запишите это как «Нет текучести».

значение

Влияние процесса : Порошки с хорошей текучестью (например, скорость потока порошка WC 13-15 секунд/50 г) равномерно распределяются во время распыления или прессования, что снижает пористость и дефекты.

Контроль качества : отражает постоянство между партиями порошка. Большие отклонения в скорости потока могут привести к колебаниям процесса.

Корреляция характеристик : тесно связана с размером частиц, формой и состоянием поверхности и является ключевым параметром для оптимизации подготовки и нанесения порошка.

Типичное значение

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Скорость потока (секунд/50 г)	Оценка ликвидности
WC (сферический)	15-45	13.5	отличный
WC (нерегулярный)	10-30	16.0	хороший
WC-Co (тонкий порошок)	5-15	>20 или неликвидный	Разница

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Факторы влияния

Текучесть порошка карбида вольфрама зависит от многих факторов. Ниже приведен подробный анализ.

Размер частиц

Влияние : Чем больше размер частиц, тем меньше трение между ними и выше текучесть. Если размер частиц слишком мал (<5 мкм), сила Ван-дер-Ваальса и электростатический эффект увеличатся, а текучесть уменьшится.

Экспериментальные данные :

Размер частиц WC (мкм)	Скорость потока (секунд/50 г)
5	>25 (нечекучий)
15-45	13.8
45-60	12.5

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

Форма частиц

Воздействие : Сферические частицы (сферичность>95%) имеют низкое сопротивление качению и хорошую текучесть; нерегулярные или хлопьевидные частицы имеют плохую текучесть из-за механического сцепления.

Случай : Скорость потока сферического WC-порошка составляет 13,5 секунд/50 г, а неправильного WC-порошка — 16,5 секунд/50 г.

Свойства поверхности

Воздействие : Порошки с гладкими поверхностями имеют меньшее трение и лучшую текучесть; порошки с шероховатой поверхностью или с оксидным слоем (WO_3) склонны к адгезии и имеют пониженную текучесть.

Эксперимент : Скорость потока плазменно-сфероидизированного порошка WC составляет 13,0 секунд/50 г, а необработанного порошка — 15,5 секунд/50 г.

Содержание влаги

Воздействие : Содержание влаги $> 0,2\%$ вызывает агломерацию частиц, значительно снижает текучесть и даже делает материал нетекучим.

Данные : Скорость потока порошка WC с содержанием влаги 0,5% составляет >20 секунд/50 г, а после высыхания (содержание влаги $<0,1\%$) она снижается до 14,0 секунд/50 г.

Условия окружающей среды

Влияние : Влажность $> 60\%$ увеличивает гигроскопичность порошка, а изменения температуры влияют на вязкость воздуха, оба эти фактора могут повлиять на текучесть.

3. Метод определения

Текучесть порошка карбида вольфрама обычно определяется методом расхода Холла в соответствии с такими стандартами, как ASTM B213 или ISO 4490. Ниже приведен обзор метода.

Метод Холла

Принцип : Измерьте время, необходимое для прохождения 50 г порошка через стандартную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

воронку Холла (отверстие 2,5 мм). Чем короче время, тем лучше текучесть.

шаг :

Приготовьте сухой порошок (влажность < 0,1%).

Насыпьте 50 г порошка в воронку Холла и аккуратно постучите, чтобы обеспечить равномерное заполнение.

Откройте перегородку в нижней части воронки и запишите время (в секундах), необходимое для полного высыпания порошка.

Если порошок не течет, запишите его как «нечекучий».

Вспомогательные методы

Метод наклона : измерение угла естественного откоса порошка. Чем меньше угол (<30°), тем лучше текучесть.

Метод уплотнения постукиванием : косвенная оценка текучести путем объединения изменения плотности постукивания.

Экспериментальные данные

Образец	Размер частиц (мкм)	Влага(%)	Скорость потока (секунд/50 г)	Угол естественного откоса(°)
WC (сферический)	15-45	0,05	13.5	28
WC (нерегулярный)	10-30	0.10	16.0	35
WC (мелкий порошок)	5-15	0.20	>25 (нечекучий)	45

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

4. Оборудование и этапы эксплуатации

оборудование

Воронка Холла :

Материал: нержавеющая сталь или латунь.

Технические характеристики: Диаметр нижнего отверстия 2,5 мм, угол конуса 60°, объем около 100 см³.

Таймер : точность 0,1 секунды.

Весы : точность 0,001 г, взвешивание 50 г пороха.

Духовка : температура 100-120°C, высушите образец.

Приемный контейнер : емкость >50 см³, собирает вытекающий порошок.

Вибратор (опционально) : помогает при тестировании нетекучих порошков.

Подробные шаги

Подготовка образца :

Для обеспечения однородности из партии порошка случайным образом отбирали 100 г с помощью делителя проб.

Сушить в духовке при температуре 105°C в течение 2 часов, влажность <0,1%, охладить до комнатной температуры (в эксикаторе).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Калибровка прибора :

Проверьте отверстие воронки Холла ($2,5 \pm 0,01$ мм), чтобы убедиться в отсутствии закупорки.
Проверьте точность прибора, используя стандартный порошок (например, FSSS 3,0 мкм WC, скорость потока 14,0 с/50 г).

Процесс определения :

Взвесьте $50,0 \pm 0,01$ г порошка WC, высыпьте его в воронку Холла и осторожно постучите по ней три раза, чтобы избежать образования сводов.

Откройте нижнюю перегородку и одновременно запустите таймер, чтобы зафиксировать время полного высыпания порошка.

Если порошок застрял, постучите по воронке, если он все равно не течет, запишите это как «не течет».

Обработка данных :

Повторите измерение три раза и возьмите среднее значение, если отклонение составляет менее 0,5 секунды.

Проверьте массу порошка в приемной емкости, чтобы убедиться в отсутствии остатка (погрешность $< 0,1$ г).

Меры предосторожности

Воронку следует располагать вертикально, чтобы избежать наклона, который может повлиять на скорость потока (отклонение $\pm 0,2$ секунды).

Контроль окружающей среды: температура 20-25°C, влажность $< 50\%$, не допускать впитывания влаги.

Мелкий порошок (< 10 мкм) может потребовать использования вибрации, в противном случае он подвержен засорению.

5. Сценарии применения

Измерение текучести порошка карбида вольфрама имеет важные приложения во многих областях. Ниже приведены конкретные сценарии и случаи.

Процесс термического напыления

Применение: Для оценки равномерности подачи порошка WC-Co в HVOF или APS. Скорость потока < 15 сек/50 г является отличной.

Случай : Группа определила, что скорость потока WC-12Co составила 13,8 секунд/50 г, пористость напыленного покрытия составила $< 1\%$, а износостойкость улучшилась на 30% (информация с сайта China Tungsten Online).

Производство твердого сплава

Применение : Для проверки текучести WC-порошка и обеспечения однородности прессованных заготовок.

Случай : Исследование показало, что скорость потока порошка WC составила 14,0 секунд/50 г, плотность прессованных деталей улучшилась на 10%, а твердость составила HV 2250 (информация с сайта China Tungsten Online).

Порошковая металлургия

Применение : Для оптимизации эффективности заполнения порошком W или WC. Слишком

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокая скорость потока (>20 секунд/50 г) может привести к расслоению.

Случай : Компания определила, что скорость потока сферического порошка W составляет 12,5 секунд/50 г, а плотность спеченного тела — 99% (информация с сайта China Tungsten Online).

Контроль качества

Применение : Для проверки постоянства текучести между партиями. Отклонение расхода составляет менее 1 секунды.

Случай : Производственная компания измерила, что колебание расхода порошка WC составило $<0,5$ с/50 г, что гарантирует стабильность партии (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Проектирование систем хранения и транспортировки

Применение : для оценки характеристик текучести порошков в силосах и оптимизации системы транспортировки.

Подвести итог

Текущность порошка карбида вольфрама измеряется методом расхода Холла, характеризующимся временем (секунды/50 г), за которое 50 г порошка протекают через воронку с отверстием 2,5 мм, с типичным значением 13-16 секунд/50 г. Текущность зависит от размера частиц, формы, состояния поверхности и влажности. Для измерения требуется сухой порошок (влажность $<0,1\%$), стандартное оборудование и точная работа. С точки зрения применения он направляет процессы термического напыления, цементированного карбида и порошковой металлургии для повышения эффективности заполнения и качества продукции (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Оптимизация сферичности частиц и условий сушки может значительно улучшить текущность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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

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.



Приложение :

Плотность утряски порошка карбида вольфрама и метод ее определения

Плотность насыпки относится к массе на единицу объема порошка карбида вольфрама (WC) после того, как частицы перестраиваются в плотное состояние при определенных условиях вибрации или стука, обычно в г/см³. Плотность насыпки является ключевым параметром физических свойств порошков, отражающим компактность упаковки частиц, и ближе к состоянию заполнения в реальном процессе, чем свободная плотность. В цементированном карбиде, термическом напылении и порошковой металлургии плотность насыпки напрямую влияет на эффективность прессования, производительность спекания и качество конечного продукта материала. Метод определения обычно принимает метод насыпки, который выполняется с помощью стандартного измерительного цилиндра и оборудования для насыпки.

1. Определение и значение

определение

Плотность утряски : Плотность порошка карбида вольфрама, когда зазоры между частицами уменьшены и порошок достигает стабильного состояния укладки после механической вибрации или ручного утряски.

$$\text{振实密度} = \frac{m}{V}$$

В:

m: масса порошка (г)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

V: Объем после уплотнения (см³)

Отличие от насыпной плотности : насыпная плотность — это естественное состояние укладки, в то время как плотность уплотнения делает частицы более компактными под действием внешней силы, и ее значение обычно на 10–20 % выше.

значение

Руководство по процессу : порошок WC с высокой плотностью утряски (например, 5,5–6,0 г/см³) более эффективен при прессовании или заполнении и имеет лучшую плотность после спекания.

Контроль качества : отражает постоянство характеристик укладки порошка между партиями. Большие отклонения могут привести к неравномерному формованию.

Корреляция характеристик : связана с размером частиц, формой и состоянием поверхности и является важной основой для оптимизации приготовления и нанесения порошка.

Типичное значение

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Насыпная плотность (г/см³)	Плотность набивки (г/см³)
WC (ультратонкий)	0,5-1	4.2-4.5	5.3-5.6
WC (средний)	2-5	4.8-5.0	5.8-6.2
WC-Co (композит)	15-45	4.0-4.5	4.8-5.2

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

2. Факторы влияния

Значение плотности насыпки порошка карбида вольфрама зависит от многих факторов. Ниже приведен подробный анализ.

Размер частиц

Воздействие : Чем больше размер частиц, тем выше эффективность заполнения промежутков между ними и увеличивается плотность уплотнения; если размер частиц слишком мал (<1 мкм), поверхностная сила увеличивается, промежутки трудно сжимать, а плотность низкая.

Экспериментальные данные :

Размер частиц WC (мкм)	Насыпная плотность (г/см³)	Плотность набивки (г/см³)	Увеличивать(%)
0,5	4.2	5.3	26
2.0	4.8	5.8	двадцать один
5.0	5.0	6.2	двадцать четыре

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

Форма частиц

Воздействие : Сферические частицы (сферичность>95%) плотно располагаются после вибрации и имеют высокую плотность; частицы неправильной или игольчатой формы имеют высокую пористость и низкую плотность из-за интеркаляции.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Случай : Плотность сферического порошка WC составляет 6,0 г/см³, тогда как плотность нерегулярного порошка WC составляет всего 5,5 г/см³.

Свойства поверхности

Воздействие : Порошки с гладкими поверхностями имеют меньшее трение, легко перестраиваются после вибрации и имеют высокую плотность; порошки с шероховатыми поверхностями или с оксидными слоями (WO₃) липкие и имеют низкую плотность.

Эксперимент : Плотность сфероидизированного плазмой порошка WC составляет 6,2 г/см³, а необработанного порошка — 5,7 г/см³.

Содержание влаги

Воздействие : Содержание влаги > 0,2% приводит к агломерации частиц, что затрудняет вибрационное сжатие зазоров, и плотность уменьшается.

Данные : Плотность после утряски порошка WC с содержанием воды 0,5% составляет 5,2 г/см³, а после высыхания (содержание воды <0,1%) она увеличивается до 5,8 г/см³.

Условия уплотнения

Влияние : Амплитуда, частота и количество вибраций влияют на эффективность перегруппировки частиц. Недостаточная вибрация приведет к низкой плотности, а чрезмерная вибрация не приведет к значительным изменениям.

Эксперимент : Плотность порошка WC составляет 5,6 г/см³ после 100 вибраций, возрастает до 5,8 г/см³ после 300 вибраций и остается неизменной после 500 вибраций.

3. Метод определения

Плотность утряски порошка карбида вольфрама определяется в соответствии со стандартными процедурами, такими как ASTM B527 или ISO 3953. Ниже приводится обзор метода.

Метод вибрации

Принцип : Путем механической вибрации или ручного постукивания частицы порошка WC перестраиваются и измеряется плотность в стабильном состоянии.

шаг :

Приготовьте сухой порошок (влажность < 0,1%).

Высыпьте порошок в стандартный мерный цилиндр (25 или 100 см³) и запишите начальный объем. с помощью вибратора или постукивайте вручную до тех пор, пока громкость не перестанет меняться, и запишите громкость после вибрации (V').

Взвесьте массу порошка (m) и рассчитайте плотность утряски (m/V').

Экспериментальные данные

Образец	Масса(г)	Начальный объем (см ³)	Объем крана (см ³)	Плотность набивки (г/см ³)
WC (1мкм)	50	11.0	8.9	5.62
WC (5мкм)	50	10.2	8.1	6.17
WC-12Co	50	12.0	10.2	4.90

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Оборудование и этапы эксплуатации

оборудование

Мерный цилиндр : стандартный стеклянный мерный цилиндр (25, 50 или 100 см³), градуированный до $\pm 0,1$ см³.

Весы : точность 0,001 г, взвешивание массы пороха.

Вибрационный уплотнитель :

Тип: Механическое уплотняющее устройство (например, Scott Volumeter).

Параметры: амплитуда 1-5 мм, частота 50-60 Гц.

Духовка : температура 100-120°C, высушите образец.

Воронка : отверстие диаметром 5–10 мм для облегчения заполнения.

Скребок : разгладьте поверхность порошка.

Подробные шаги

Подготовка образца :

Из партии порошка WC случайным образом отбирали 50–100 г и использовали делитель образцов для обеспечения однородности.

Сушить в духовке при температуре 105°C в течение 2 часов, влажность <0,1%, охладить до комнатной температуры (в эксикаторе).

Загрузка образца :

Выберите мерный цилиндр объемом 100 см³ и запишите его пустой вес (m_0).

С помощью воронки медленно насыпьте в пробирку 50 г порошка, опуская капли на высоту 10–15 см, чтобы избежать уплотнения, и запишите начальный объем.

Слегка разгладьте поверхность скребком.

Процесс уплотнения :

Поместите мерный цилиндр в вибратор, установите амплитуду 3 мм, частоту 60 Гц и вибрируйте 200 раз (или пока громкость не стабилизируется).

вибрируя вручную, постучите по дну мерного цилиндра 200 раз на высоте 2-3 см.

Запишите уплотненный объем (V') и общий вес (m_1).

рассчитать :

Плотность наплавки = $(m_1 - m_0) / V'$.

Измерение повторялось 3 раза, и среднее значение принималось, если отклонение составляло менее 2%.

Очистка : используйте сжатый воздух для очистки измерительного цилиндра, чтобы избежать попадания остатков, влияющих на следующее измерение.

Меры предосторожности

Количество раз уплотнения должно быть постоянным. Слишком малое количество раз (<100 раз) приведет к низкой плотности, а слишком большое количество раз (>300 раз) не приведет к значительному улучшению.

Внутренняя стенка мерного цилиндра должна быть сухой; влажность >50% может привести к прилипанию порошка.

Для мелких порошков (<1 мкм) может потребоваться увеличенная амплитуда (5 мм) для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

преодоления поверхностных сил.

5. Сценарии применения

Измерение плотности насыпки порошка карбида вольфрама имеет важные приложения во многих областях. Ниже приведены конкретные сценарии и случаи.

Производство твердого сплава

Применение : Для оценки прессуемости и спекания порошка WC. Высокая плотность уплотнения (например, $5,8 \text{ г/см}^3$) способствует уплотнению.

Случай : Группа определила, что плотность утряски порошка WC составила $5,8 \text{ г/см}^3$, плотность прессованной заготовки увеличилась на 12%, а твердость составила HV 2250 (информация с сайта China Tungsten Online).

Процесс термического напыления

Применение : Для проверки эффективности наполнения порошка WC-Co плотность насыпки составляет $4,8\text{-}5,2 \text{ г/см}^3$, чтобы обеспечить равномерность распыления.

Случай : Исследование показало, что плотность утряски WC-12Co составила $4,9 \text{ г/см}^3$, пористость покрытия HVOF составила $<1\%$, а износостойкость улучшилась на 35% (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Порошковая металлургия

Применение : Оптимизация усадки при спекании порошка WC или W, увеличение плотности утряски и снижение пористости.

Случай : Компания определила, что плотность утряски порошка WC составляет $6,0 \text{ г/см}^3$, а плотность спеченного тела — 99,5% (информация с сайта China Tungsten Online).

Контроль качества

Применение : Тест на постоянство плотности между партиями. Отклонение $<0,1 \text{ г/см}^3$ допускается.

Случай : Производственная компания измерила, что колебание плотности утряски порошка WC составило $<0,05 \text{ г/см}^3$, что гарантирует стабильность партии (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Проектирование систем хранения и транспортировки

Применение : Для оценки плотности порошка в силосе и оптимизации объема упаковки.

Подвести итог

Плотность насыпки порошка карбида вольфрама представляет собой массу на единицу объема порошка после вибрации, с типичным значением $5,3\text{-}6,2 \text{ г/см}^3$ (мономер WC) или $4,8\text{-}5,2 \text{ г/см}^3$ (WC-Co), на которую влияют размер частиц, форма, состояние поверхности и влажность. Метод измерения использует метод вибрации, используя измерительный цилиндр и вибрационный прибор, вибрирующий 200-300 раз, с точностью $\pm 0,01 \text{ г/см}^3$. С точки зрения применения, он направляет процессы цементированного карбида, термического напыления и порошковой металлургии, улучшает эффективность прессования и качество продукции (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Оптимизация условий сушки (влажность $<0,1\%$) и вибрации может повысить точность измерения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Приложение :

Насыпная плотность порошка карбида вольфрама и метод ее определения

Насыпная плотность относится к массе на единицу объема порошка карбида вольфрама (WC) в естественном состоянии укладки без внешнего сжатия или вибрации, обычно в г/см³. Насыпная плотность является основным параметром физических свойств порошков, отражающим эффективность укладки частиц в естественном состоянии и тесно связана с текучестью, заполняющей способностью и последующими процессами (такими как прессование и спекание) порошка. В областях твердого сплава, термического напыления и порошковой металлургии насыпная плотность является важным показателем для контроля качества и оптимизации процесса. Метод определения прост, обычно выполняется стандартным измерительным цилиндром и операцией взвешивания.

1. Определение и значение

О п р е д е л е н и е

Насыпная плотность : Плотность порошка карбида вольфрама, когда он свободно падает в контейнер без какой-либо внешней силы.

Насыпная плотность = m/V Где:

m: масса порошка (г)

V: свободный объем (см³)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Особенности : Отражает естественное состояние укладки порошка. По сравнению с плотностью насыпки значение ниже, а пористость выше.

значение

Руководство по процессу : порошок WC с низкой насыпной плотностью (например, 4,2-4,5 г/см³) имеет низкую эффективность заполнения и может повлиять на равномерность прессования; высокая плотность (например, 5,0 г/см³) способствует стабильности процесса.

Контроль качества : Проверьте постоянство характеристик частиц между партиями. Большие отклонения могут привести к колебаниям процесса.

Корреляция характеристик : связана с размером частиц, формой и состоянием поверхности и является основными данными для оценки свойств порошка.

Типичное значение

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Насыпная плотность (г/см³)	Истинная плотность (г/см³)
WC (ультратонкий)	0,5-1	4.2-4.5	15.63
WC (средний)	2-5	4.8-5.0	15.63
WC-Co (композит)	15-45	4.0-4.5	12-14

Источник данных: Проверено лабораторией в 2023 году, информация с China Tungsten Online.
Примечание: Истинная плотность — это теоретическое значение.

2. Факторы влияния

На величину насыпной плотности порошка карбида вольфрама влияет множество факторов. Ниже приведен подробный анализ.

Размер частиц

Влияние : чем больше размер частиц, тем выше эффективность заполнения промежутков между ними и увеличивается насыпная плотность; если размер частиц слишком мал (<1 мкм), поверхностная сила (например, сила Ван-дер-Ваальса) увеличивается, промежутки увеличиваются, а плотность уменьшается.

Экспериментальные данные :

Размер частиц WC (мкм)	Насыпная плотность (г/см³)	Коэффициент пустотности (%)
0,5	4.2	73
2.0	4.8	69
5.0	5.0	68

Источник данных: Лабораторные испытания 2023 г., информация с сайта China Tungsten Online.
Коэффициент пустотности = (1 - насыпная плотность/истинная плотность) × 100%.

Форма частиц

Воздействие : Сферические частицы (сферичность>95%) естественно плотно упакованы и имеют высокую плотность; нерегулярные или хлопьевидные частицы имеют высокую пористость и низкую плотность из-за интеркаляции.

Случай : Насыпная плотность сферического порошка WC составляет 5,0 г/см³, а нерегулярного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

порошка WC — 4,5 г/см³.

Свойства поверхности

Воздействие : Порошки с гладкими поверхностями имеют меньшее трение, компактно упакованы и имеют высокую плотность; порошки с шероховатыми поверхностями или оксидными слоями (WO₃) склонны к адгезии и имеют низкую плотность.

Эксперимент : Насыпная плотность сфероидизированного в плазме порошка WC составляет 5,1 г/см³, а необработанного порошка — 4,6 г/см³.

Содержание влаги

Воздействие : Содержание влаги > 0,2% вызывает агломерацию частиц, повышенную пористость и пониженную плотность.

Данные : Насыпная плотность порошка WC с влажностью 0,5% составляет 4,3 г/см³, а после высыхания (влажность <0,1%) она увеличивается до 4,8 г/см³.

Метод укладки

Воздействие : Высота падения и скорость высыпания порошка влияют на равномерность укладки. Слишком большое падение (>20 см) может привести к сегрегации частиц и низкой плотности.

3. Метод определения

Насыпная плотность порошка карбида вольфрама определяется в соответствии со стандартными процедурами, такими как ASTM B212 или ISO 3923-1. Ниже приведен обзор метода.

Метод свободного монтажа

Принцип : Позвольте порошку WC свободно падать в стандартный мерный цилиндр через воронку, чтобы измерить плотность в естественном состоянии укладки.

шаг :

Приготовьте сухой порошок (влажность < 0,1%).

С помощью воронки медленно высыпьте порошок в мерный цилиндр (объемом 25 или 100 см³), оставляя каплю высотой 10–15 см.

Разгладьте поверхность скребком и запишите объем (V).

Взвесьте массу порошка (m) и рассчитайте насыпную плотность (m/V).

Экспериментальные данные

Образец	Масса(г)	Объем (см ³)	Насыпная плотность (г/см ³)
WC (1мкм)	50	11.0	4.55
WC (5мкм)	50	10.2	4.90
WC-12Co	50	11.8	4.24

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

4. Оборудование и этапы эксплуатации

Оборудование

Мерный цилиндр : стандартный стеклянный мерный цилиндр (25, 50 или 100 см³), градуированный до ±0,1 см³.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

воронка :

Материал: нержавеющая сталь или стекло.

Технические характеристики: Диаметр отверстия 5-10 мм, регулируемый перепад.

Весы : точность 0,001 г, взвешивание массы пороха.

Духовка : температура 100-120°C, высушите образец.

Скребок : разгладьте поверхность порошка, чтобы избежать уплотнения.

Делитель образца : обеспечивает однородность образца.

Подробные шаги

Подготовка образца :

Случайным образом отберите 50–100 г из партии порошка WC и с помощью делителя проб отберите равномерную пробу.

Сушить в духовке при температуре 105°C в течение 2 часов, влажность <0,1%, охладить до комнатной температуры (в эксикаторе).

Загрузка образца :

Выберите мерный цилиндр объемом 100 см³ и запишите его пустой вес (m_0).

Закрепите воронку над мерным цилиндром на высоте 15 см и медленно всыпьте 50 г порошка, избегая ударов и вибрации.

Слегка поскребите поверхность скребком и запишите общий вес (m_1) и объем (V).

рассчитать :

Насыпная плотность = $(m_1 - m_0) / V$.

Измерение повторялось 3 раза, и среднее значение принималось, если отклонение составляло менее 2%.

Очистка : используйте сжатый воздух для очистки мерного цилиндра и воронки, чтобы избежать остатков, которые могут повлиять на следующее измерение.

Меры предосторожности

Избегайте искусственного уплотнения или вибрации, чтобы обеспечить естественное состояние штабелирования.

Высота падения должна контролироваться на уровне 10–15 см. Слишком высокая высота (>20 см) может привести к расслоению частиц и низкой плотности.

Влажность окружающей среды должна быть <50%, чтобы порошок не впитывал влагу.

5. Сценарии применения

Определение насыпной плотности порошка карбида вольфрама имеет важные приложения во многих областях. Ниже приведены конкретные сценарии и случаи.

Производство твердого сплава

Применение : Для оценки начальной эффективности заполнения порошком WC и управления процессом прессования.

Случай : Группа определила, что насыпная плотность порошка WC составила 4,8 г/см³, однородность прессованной заготовки улучшилась на 8%, а твердость составила HV 2200 (информация с сайта China Tungsten Online).

Процесс термического напыления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение : Для проверки стабильности подачи порошка WC-Co. Насыпная плотность 4,0-4,5 г/см³ способствует равномерному распылению.

Случай : Исследование показало, что насыпная плотность WC-12Co составляет 4,2 г/см³, пористость покрытия HVOF составляет <1,5%, а износостойкость улучшается на 25% (информация с сайта China Tungsten Online).

Порошковая металлургия

Применение : Для оптимизации эффективности заполнения порошком WC или W высокая насыпная плотность может снизить колебания усадки при спекании.

Случай : Компания определила, что насыпная плотность порошка WC составляет 5,0 г/см³, а плотность спеченного тела — 98,5% (информация с сайта China Tungsten Online).

Контроль качества

Применение : Тест на постоянство плотности между партиями. Отклонение <0,1 г/см³ допускается.

Случай : Производственная компания измерила, что колебание насыпной плотности порошка WC составило <0,05 г/см³, что гарантирует стабильность партии (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

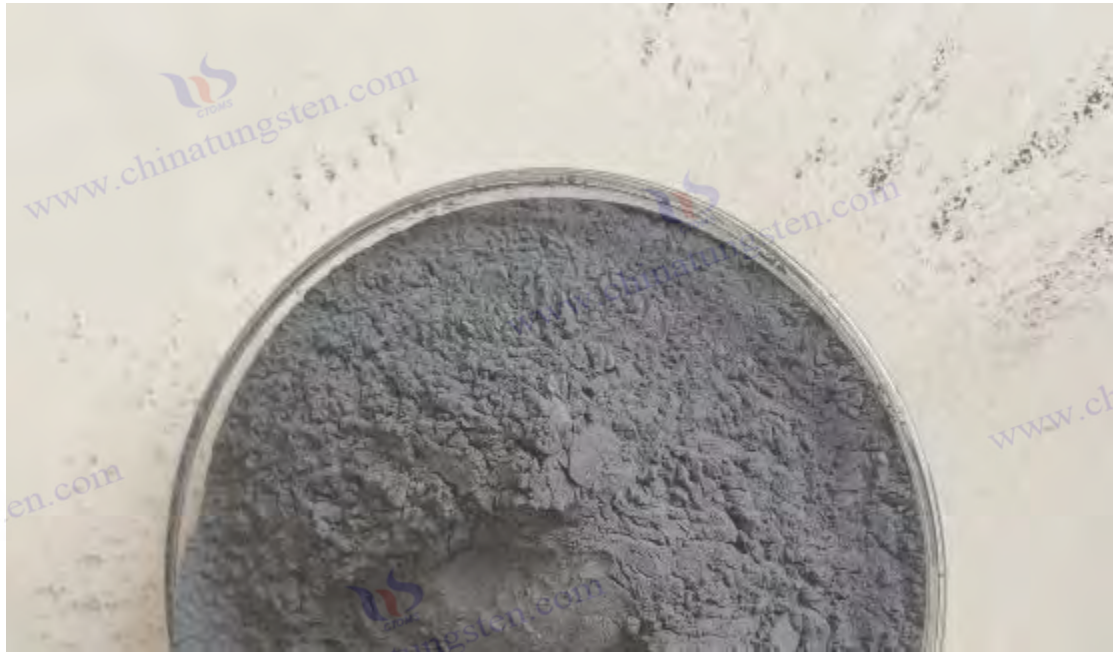
Проектирование систем хранения и транспортировки

Применение : Для оценки естественного насыпного объема порошков и оптимизации эффективности упаковки и транспортировки.

Подвести итог

Насыпная плотность порошка карбида вольфрама представляет собой единицу объемной массы порошка в естественном состоянии укладки, с типичным значением 4,2-5,0 г/см³ (мономер WC) или 4,0-4,5 г/см³ (WC-Co), на которую влияют размер частиц, форма, состояние поверхности и влажность. Метод определения использует метод насыпного измерения с использованием мерного цилиндра и воронки с точностью $\pm 0,01$ г/см³. С точки зрения применения он направляет процессы цементированного карбида, термического напыления и порошковой металлургии для повышения эффективности заполнения и качества продукции (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Оптимизация сушки (содержание влаги <0,1%) и условий падения может повысить точность определения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Приложение :

Каковы показатели плотности порошка карбида вольфрама?

Плотность порошка карбида вольфрама (WC) — это физическая величина, которая характеризует соотношение между его массой и объемом. Она имеет несколько представлений в различных сценариях применения и условиях испытаний. Представление плотности не только отражает внутренние характеристики и поведение укладки порошка, но и напрямую влияет на оптимизацию производительности и контроль качества таких процессов, как цементация карбида, термическое напыление и порошковая металлургия. Плотность порошка карбида вольфрама обычно включает истинную плотность, насыпную плотность, плотность после утряски, кажущуюся плотность и т. д. Каждая плотность имеет определенное определение, метод измерения и прикладное значение.

1. Определение и классификация плотности

Плотность — это масса вещества на единицу объема, формула: $\rho = m/V$

в:

ρ : плотность (г/см³)

m: масса (г)

V: Объем (см³) Для

порошка карбида вольфрама выражение плотности меняется в зависимости от условий измерения и состояния порошка.

Плотность порошка карбида вольфрама в основном включает в себя следующее:

Истинная плотность: теоретическая плотность самих частиц порошка, исключая поры и пустоты.

Насыпная плотность: плотность порошка в его естественном состоянии укладки, включая пространство между частицами.

Плотность после уплотнения: плотность порошка в более уплотненном состоянии после вибрации или уплотнения.

Кажущаяся плотность: плотность порошка в определенных условиях испытаний (например, с помощью расходомера Холла), которая часто аналогична насыпной плотности.

Другие производные плотности: такие как плотность в уплотненном состоянии (в процессе прессования) или плотность в спеченном состоянии (спеченные изделия).

Различная плотность отражает характеристики частиц (такие как размер и форма) и поведение порошка при укладке, а также определяет конструкцию процесса.

Истинная плотность используется для анализа состава материала, насыпная/уплотненная плотность влияет на эффективность упаковки, а кажущаяся плотность связана с текучестью.

2. Истинная плотность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

определение

Истинная плотность — это плотность твердых частиц порошка карбида вольфрама, исключая поры внутри частиц или промежутки между частицами, отражающая теоретическое отношение массы к объему самого материала .

Для чистого WC истинная плотность определяется его кристаллической структурой (гексагональной сингонией).

Числовой

Чистый WC: Истинная плотность составляет 15,63 г/см³ (теоретическое значение, основанное на параметрах решетки a=2,906 Å, c=2,837 Å).

Композитный порошок: например, WC-Co, истинная плотность которого снижена за счет добавления связующей фазы (например, плотность Co 8,90 г/см³).

Тип порошка	Адгезионная фаза (%)	Истинная плотность (г/см ³)
Туалет	0	15.63
WC-12Co	Co: 12	14,0-14,5
WC-10Co-4Cr	Co: 10, Cr: 4	13.8-14.2

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

Метод определения

Метод вытеснения газа (метод удельного веса гелия):

Принцип: Заполните поры порошкообразного образца гелием и определите объем твердого вещества.

Оборудование: гелиевый пикнометр (например, Micromeritics AccuPyc).

Процедура: Взвесьте образец (5 г), поместите его в герметичную камеру, введите гелий, запишите объем выхлопа и рассчитайте истинную плотность.

формула:

$$\rho_{\text{true}} = \frac{m}{V_{\text{solid}}}$$

Где V твердый — объем твердого тела.

Точность: ±0,01 г/см³.

приложение

Проверьте чистоту порошка (например, свободный углерод < 0,1% в WC).

Рассчитайте теоретическую плотность композитных материалов для определения рецептуры.

3. Насыпная плотность

определение

Насыпная плотность — это плотность порошка карбида вольфрама в естественно уложенном состоянии после его свободного падения в контейнер, включая пространство между частицами, без вибрации или сжатия.

Числовой

Чистый WC: 4,2-5,0 г/см³, чем меньше размер частиц, тем ниже плотность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Композитный порошок: например, WC-12Co, 4,0-4,5 г/см³, из-за меньшей плотности связующей фазы.

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Насыпная плотность (г/см ³)	Коэффициент пустотности (%)
WC (ультратонкий)	0,5-1	4.2-4.5	71-73
WC (средний)	2-5	4.8-5.0	68-69
WC-12Co	15-45	4.0-4.5	68-71

Источник данных: Лабораторные испытания 2023 г., информация с сайта China Tungsten Online. Коэффициент пустотности = $(1 - \text{насыпная плотность} / \text{истинная плотность}) \times 100\%$.

Метод определения

Стандарт: ASTM B212 или ISO 3923-1.

Принцип: Через воронку засыпьте порошок в мерный цилиндр, чтобы определить естественный объем накопления.

шаг:

Порошок высушивали (105°C, 2 ч, влажность < 0,1%).

С помощью воронки (отверстие 5–10 мм) насыпьте 50 г порошка в мерный цилиндр объемом 100 см³ с высотой капли 10–15 см.

Выровняйте поверхность скребком, запишите объем (V) и взвесьте массу (m).

Расчет: Насыпная плотность = m/V.

Точность: ±0,01 г/см³.

Факторы влияния

Малый размер частиц, высокая пористость и низкая плотность.

Неравномерные частицы или влажность (>0,2%) снижают плотность.

приложение

Оцените эффективность начальной загрузки и руководите процессами прессования и распыления.

Проверьте постоянство характеристик частиц между партиями.

4. Плотность набивки

определение

Плотность после утряски — это плотность порошка карбида вольфрама после того, как частицы перестраиваются в более плотное состояние в результате вибрации или постукивания, а пористость ниже, чем насыпная плотность.

Числовой

Чистый WC: 5,3–6,2 г/см³, на 10–20 % выше насыпной плотности.

Композитный порошок: например, WC-12Co, 4,8-5,2 г/см³.

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Плотность набивки (г/см ³)	Увеличивать(%)
WC (ультратонкий)	0,5-1	5.3-5.6	24-26
WC (средний)	2-5	5.8-6.2	20-24

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тип порошка	Размер частиц (мкм)	Плотность набивки (г/см³)	Увеличивать(%)
WC-12Co	15-45	4.8-5.2	15-20

Проверено лабораторией в 2023 году, информация с сайта China Tungsten Online. Увеличение = (плотность после уплотнения - насыпная плотность) / насыпная плотность × 100%.

Метод определения

Стандарт: ASTM B527 или ISO 3953.

Принцип: Частицы порошка перестраиваются с помощью вибратора и определяется стабильный объем.

шаг:

как в методе насыпной загрузки, и запишите начальный объем.

Поместите в вибрационный уплотнитель (амплитуда 3 мм, частота 60 Гц) и вибрируйте 200 раз или до тех пор, пока объем не стабилизируется.

объем (V') после уплотнения и взвесьте массу (m).

Расчет: Плотность намотки = m/V' .

Точность: $\pm 0,01$ г/см³.

Факторы влияния

После вибрации сферические частицы располагаются плотно и имеют высокую плотность.

Если количество циклов уплотнения недостаточно (<100 раз), плотность будет низкой, а если слишком много (>300 раз), существенных изменений не произойдет.

приложение

Управлять процессами прессования и спекания, прогнозировать плотность.

Оптимизируйте эффективность заполнения силосов.

5. Кажущаяся плотность и другие выражения плотности

Кажущаяся плотность

Определение: Плотность порошка, измеренная в определенном приборе (например, расходомере Холла). Обычно она похожа на насыпную плотность, но больше связана с текучестью.

Значение: порошок WC 4,0-5,0 г/см³, порошок WC-Co 4,0-4,5 г/см³.

Метод определения:

Стандарт: ASTM B212 или ISO 3923-2.

Процедура: Соберите 50 г порошка с помощью расходомера Холла (отверстие 2,5 мм), запишите объем и рассчитайте плотность.

Применение: Оценка поведения порошка в динамических процессах, таких как подача порошка распылением.

Другие представления плотности

Плотность уплотнения:

Определение: Плотность порошка в процессе прессования, близкая к плотности утряски, но на которую влияет давление.

Значение: WC порошок 6,0-8,0 г/см³ (после прессования).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение: Формовка карбида.

Плотность после спекания:

Определение: Плотность цельного блока после спекания порошка, близкая к истинной плотности.

Значение: карбид вольфрама на основе WC 14,0-15,5 г/см³.

Применение: Проверка качества спекания.

Кажущаяся плотность:

Определение: Кажущееся отношение массы к объему порошка в определенном контейнере, обычно используемом для хранения и транспортировки.

Значение: Аналогично насыпной плотности, 4,0-5,0 г/см³.

Экспериментальные данные

Тип порошка	Истинная плотность (г/см³)	Насыпная плотность (г/см³)	Плотность набивки (г/см³)	Кажущаяся плотность (г/см³)
WC (1мкм)	15.63	4.55	5.62	4.50
WC (5мкм)	15.63	4.90	6.17	4.85
WC-12Co	14.2	4.24	4.90	4.20

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, информация взята с сайта China Tungsten Online.

Подвести итог

Плотность порошка карбида вольфрама включает истинную плотность (15,63 г/см³, мономер WC), насыпную плотность (4,2-5,0 г/см³), плотность после утряски (5,3-6,2 г/см³), кажущуюся плотность (4,0-5,0 г/см³) и другие производные плотности (такие как плотность уплотнения и спекания). Каждая плотность измеряется определенным методом, таким как метод вытеснения гелия (истинная плотность), метод измерительного цилиндра (насыпная/утрашенная плотность), метод расхода Холла (кажущаяся плотность), отражающий различные характеристики порошка. При применении эти плотности направляют процессы цементированного карбида, термического напыления и порошковой металлургии для обеспечения эффективности заполнения и качества продукции (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Оптимизация формы частиц и условий сушки может повысить точность измерения плотности.



Глава 2: Метод приготовления порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама (WC) является основным материалом для твердосплавных и износостойких покрытий. Его свойства (такие как твердость HV 2000-2500 и размер зерна 0,1-10 мкм) напрямую зависят от метода приготовления. Процесс приготовления развился от лабораторных исследований в конце 19 века до современного промышленного производства, и было сформировано множество технических маршрутов. В этой главе систематически представлены основные методы приготовления порошка карбида вольфрама, включая традиционную высокотемпературную цементацию, химическое осаждение из паровой фазы (CVD), механическое легирование, плазменный метод и новые технологии, такие как метод термического растворения, анализируются его принципы, параметры процесса, характеристики продукта, а также преимущества и недостатки, и предоставляется читателям всесторонняя техническая перспектива.

2.1 Метод высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Метод высокотемпературной цементации порошка карбида вольфрама является наиболее широко используемой технологией в промышленном производстве. Его история восходит к разработке инструментов Widia в Германии в начале 20 века. В настоящее время он стал основным процессом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в промышленности по производству твердого сплава. Этот метод напрямую реагирует с вольфрамовым порошком и источником углерода при высокой температуре для получения порошка карбида вольфрама (WC). Благодаря своему зрелому процессу, большой производительности и контролируемой стоимости он составляет более 80% мирового производства порошка карбида вольфрама (ITIA 2023). В этом разделе всесторонне анализируется этот основной метод подготовки с точки зрения механизма реакции, технологического процесса, выбора оборудования, оптимизации параметров, характеристик продукта, промышленного применения и технических ограничений.

2.1.1 Основные принципы высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Метод высокотемпературной карбонизации основан на твердофазной диффузионной реакции. Порошок вольфрама (W) и источник углерода (такой как сажа) химически соединяются при высоких температурах (1800-2000 °C) для образования порошка карбида вольфрама (WC). Основная формула реакции:

$W + C \rightarrow WC$ Реакция является экзотермическим процессом со стандартным изменением энтальпии $\Delta H = -38,1$ кДж/моль (25 °C), но для активации атомов углерода для диффузии в решетку вольфрама требуется высокое тепло. Объемно-центрированная кубическая структура вольфрама (ОЦК, $a=3,165$ Å) рекомбинирует с атомами углерода при высоких температурах, образуя гексагональный WC (пространственная группа $R\bar{6}m2$, $a=2,906$ Å, $c=2,837$ Å, JCPDS 51-0939). Анализ рентгеновской дифракции показывает, что характерные пики продукта расположены при $2\theta=35,641^\circ$ (кристаллическая плоскость 100) и $48,298^\circ$ (кристаллическая плоскость 101), что подтверждает образование однофазного WC.

Реакцию необходимо проводить в восстановительной (например, H_2) или инертной (например, Ar) атмосфере, чтобы избежать окисления вольфрама до WO_3 (температура плавления $1473^\circ C$).

Побочные реакции включают:



недостаточном количестве углерода, $<6,10\%$) $WC \rightarrow W_2C + WC \rightarrow W_2C + C$ (разложение $>2100^\circ C$).

Контроль содержания углерода является ключевым, теоретическое значение составляет 6,13% (массовая доля), промышленный диапазон составляет 6,10%-6,18% (GB/T 4295-2008), а отклонения влияют на фазовое состояние и производительность.

2.1.2 Технологическая схема высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Метод высокотемпературной цементации для промышленного получения порошка карбида вольфрама включает следующие этапы, каждый из которых необходимо точно контролировать для обеспечения однородности продукта:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Выбор и подготовка сырья

Вольфрамовый порошок

Чистота >99,9%, содержание кислорода <0,03% (300 ppm), размер частиц FSSS 1-10 мкм (GB/T 25995). Источником обычно является восстановленный водородом WO_3 (например, восстановленный АРТ вольфрамовый порошок, произведенный в Чжучжоу, Китай).

Источник углерода

Высокоочищенный технический углерод (С, чистота > 99,9%, размер частиц < 1 мкм, удельная площадь поверхности > 10 м²/г) или графитовый порошок (размер частиц 5-20 мкм, более низкая стоимость, но немного менее активный).

Соотношение

Молярное соотношение W:C составляет 1:1,03–1,05 с небольшим избытком углерода для компенсации улетучивания и побочных реакций (таких как образование W_2C).

смешивание

Используйте планетарную шаровую мельницу (например, Fritsch Pulverisette 6) с соотношением шаров к материалу 5:1–10:1, шарами из WC или стали и скоростью вращения 150–300 об/мин в течение 2–4 часов.

добавка

0,5%-1% стеариновой кислоты (для предотвращения агломерации), однородность смешивания проверяли с помощью СЭМ (ОСО распределения частиц < 5%).

среда

Инертная атмосфера (Ar) или вакуум для предотвращения окисления.

Загрузка и предварительная обработка

Смешанный порошок загружали в графитовую лодочку (чистота >99,95%, размер 50×20×10 см) с плотностью упаковки 0,5-0,8 г/см³.

Разогреть

300-500°C, пропускают H_2 (0,2-0,5 л/мин) для удаления влаги и летучих веществ в течение 30-60 минут.

Высокотемпературная карбонизация

оборудование

Трубчатая печь (одинарная труба, внутренний диаметр 10–20 см) или лодочная печь непрерывного действия (несколько лодок, производительность >100 кг/партия).

температура

1800-2000°C, скорость нагрева 5-10°C/мин, поддержание тепла 2-4 часа.

атмосфера

H_2 (расход 0,5–1 л/мин) снижает WO_x , а Ar (0,2–0,5 л/мин) предотвращает перегорание.

монитор

Термопара (тип W-Re, точность ±5°C), онлайн-газоанализатор (обнаружение CO, CO₂).

Охлаждение и последующая обработка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Охладить естественным путем до $<100^{\circ}\text{C}$ (атмосфера Ar , 6-8 часов) для предотвращения трещин, вызванных быстрым охлаждением.

Шлифовка

Воздухоструйная мельница или шаровая мельница, настроенная на FSSS 1-5 мкм , просеянная (200 меш, удалить частицы >10 мкм).

Уборка

При необходимости промойте разбавленной HCl (5%) для удаления поверхностных оксидов и высушите (80°C , 2 ч).

2.1.3 Параметры процесса и контроль высокотемпературной цементации порошка карбида вольфрама

Т е м п е р а т у р а

Диапазон: $1800-2000^{\circ}\text{C}$.

$<1700^{\circ}\text{C}$: Реакция не завершена, остаются W и W_2C (рентгеновская дифракция обнаруживает пик W_2C , $2\theta=39,5^{\circ}$).

2100°C : WC разлагается с образованием свободного углерода ($>6,18\%$) и W_2C , а твердость снижается ($\text{HV } 1600-2000$).

Оптимизация: $1900^{\circ}\text{C} \pm 20^{\circ}\text{C}$, эффективность карбонизации $>98\%$ (подтверждено химическим титрованием).

Содержание углерода

Цель: $6,10\% - 6,18\%$ (GB/T 4295-2008).

Контроль: Начальное соотношение $\text{W}:\text{C}$ составляет 1:1,05 с учетом улетучивания углерода (около $0,02\%-0,05\%$).

Испытание: метод сжигания (GB/T 5124.1), отклонение $\pm 0,05\%$, свободный углерод $<0,5\%$.

А т м о с ф е р а

N_2 : расход $0,5-1$ л/мин, давление $0,1-0,2$ МПа, удаление примесей кислорода ($\text{O}_2 < 10$ ppm).

Ar : чистота $>99,99\%$, чтобы предотвратить осаждение свободного углерода, вызванное чрезмерным восстановлением N_2 .

Переключение: $>1500^{\circ}\text{C}$ можно переключить на Ar для снижения энергопотребления.

Время изоляции

Диапазон: 2-4 часа.

<2 часов: скорость карбонизации $<95\%$, остаточный W (рентгеновская дифракция обнаружила пик W , $2\theta=40,3^{\circ}$).

4 часа: Зерна увеличиваются (>10 мкм , наблюдение с помощью СЭМ), а твердость уменьшается.

Оптимизация: 3 часа ± 15 минут, однородность зерна наилучшая ($\text{RSD} < 10\%$).

Скорость нагрева

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5-10°C/мин. Слишком быстро (>15°C/мин) приведет к градиенту температуры в лодочке (>50°C) и неравномерному продукту.

2.1.4 Оборудование и индустриализация высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Тип устройства

Трубчатая печь: одноразовая загрузка 10-50 кг, подходит для малых и средних предприятий (например, лабораторий или небольших заводов).

Пример: завод в Чанше, Китай, использует трубчатую печь с внутренним диаметром 15 см и производит 30 кг в день.

Печь с толкающим лодочным прессом: непрерывное производство, одна печь >100 кг/партия, основной промышленный выбор.

Пример: завод по производству цементированного карбида в Чжучжоу использует 10-поддонную печь с годовой производительностью 10 000 тонн.

Основные компоненты: графитовая лодочка (температурная стойкость >2200°C), термопара W-Re, нагревательный элемент SiC.

Потребление энергии и эффективность

Потребление энергии: около 5000-6000 кВтч на тонну порошка карбида вольфрама (включая отопление и изоляцию).

Эффективность: Цикл работы одной печи составляет 12-16 часов (включая охлаждение), а коэффициент использования оборудования печи-толкача достигает 90%.

Автоматизация

Современное оборудование оснащено ПЛК-контролем (Siemens S7-300) для контроля температуры, атмосферы и состава выхлопных газов ($CO < 0,1\%$) в режиме реального времени.

2.1.5 Характеристики продукта, полученного методом высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Химический состав

Общее содержание углерода: 6,10%-6,18% (метод сжигания, GB/T 5124.1).

Свободный углерод: <0,5% (метод титрования, GB/T 5124.2).

Примеси: Fe<0,05%, O<0,02% (ICP-OES, GB/T 5124.4).

Физические свойства

Размер зерна: 1-5 мкм (FSSS, GB/T 25995), регулируется до 0,5-10 мкм (проверка с помощью СЭМ).

Насыпная плотность: 12,0-14,0 г/см³ (волюмометр Скотта, GB/T 5314).

Морфология: Полиэдрические частицы с острыми краями и шероховатостью поверхности Ra 0,1-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

0,5 мкм (измерено методом АСМ).

Удельная поверхность: 0,5-2 м²/г (метод БЭТ), увеличивается с уменьшением размера частиц.

Микроструктура

Однофазный WC (XRD, самый сильный пик при $2\theta=35,641^\circ$), нет пиков W₂C или свободного углерода.

Границы зерен четкие, дефектов немного (наблюдения с помощью просвечивающего электронного микроскопа, ширина полосы решетки $d=2,518 \text{ \AA}$).

Производительность

Твердость: HV 2000-2200 (ASTM E384, нагрузка 1 кг).

Прочность на сжатие: >4000 МПа после спекания (WC-Co, Co 10%).

2.1.6 Промышленное применение и случаи высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Твердосплавные инструменты

Завод по производству твердосплавных сплавов в Чжучжоу, Китай: годовой объем производства 12 000 тонн порошка карбида вольфрама (2023 г.), FSSS 2–5 мкм, для токарных инструментов и фрез (твердость HV 1500–1800, срок службы > 500 минут).

Sandvik, Швеция: используйте порошок WC размером 1–3 мкм для подготовки инструментов с ЧПУ со скоростью резания >200 м/мин.

Износостойкие детали

Kennametal, США: порошок WC размером 5–10 мкм используется для изготовления горнодобывающих буровых коронок с ударпрочностью >25 Дж/см² и сроком службы, увеличенным в 3 раза.

Шахта в Лояне, Китай: порошок WC используется в инструментах для бурения горных пород, а его износостойкость лучше, чем у быстрорежущей стали (скорость износа <0,01 мм³/Н·м).

Международные стандарты

GB/T 4295-2008: Отклонение общего содержания углерода $\pm 0,05\%$, свободного углерода <0,5%.

ISO 4499-2:2020: Требования к однородности размера зерна (RSD < 10%).

2.1.7 Преимущества, недостатки и направления совершенствования высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Преимущества

Зрелая технология: 100-летняя история, глобальное применение, стабильная технология.

Большая производительность: одна печь > 100 кг, удовлетворяющая промышленный спрос (например, на Китай приходится 50% мирового производства, около 30 000 тонн/год).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Низкая стоимость: 50–80 юаней/кг (China Tungsten Online 2023), что экономичнее метода CVD (500–1000 юаней/кг).

Контролируемое качество: соответствие стандартам твердого сплава (HV 1500-2200).

Недостаток

Высокое энергопотребление: 5000-6000 кВтч/тонну, выбросы углерода около 2-3 тонн CO₂/тонну (в основном электрическое отопление).

Крупные зерна: >1 мкм, что затрудняет получение наноразмерного WC (<100 нм), ограничивая возможности высокотехнологичных приложений.

Изменчивость партии: градиент температуры между лодочками ($\pm 20^{\circ}\text{C}$) привел к широкому распределению размеров частиц (размах >1,5).

Направление улучшения

Низкотемпературная карбонизация: добавление катализатора (например, Ni, 0,1%-0,5%), снижение температуры до 1500-1600°C, экономия энергии 20% (на стадии исследования).

Измельчение зерна: исходный вольфрамовый порошок <1 мкм, сокращение времени выдержки (<2 часов), целевой размер <0,5 мкм.

Экологичность: переработка остаточного газа H₂, сокращение использования технического углерода и снижение углеродного следа.

2.1.8 Промышленное состояние и перспективы высокотемпературной карбонизации порошка карбида вольфрама

Глобальная ситуация

Китай: Годовой объем производства составляет 30 000 тонн, что составляет 50% мирового объема (China Tungsten Online 2023), основными районами производства являются провинции Хунань и Цзянси.

Европа и Америка: Kennametal из США и Ceratizit из Германии производят около 5000 тонн/год, уделяя особое внимание качеству (чистота >99,95%).

Тенденции развития технологий

Автоматизация: Интегрированные датчики в лодочную печь (мониторинг O₂, CO) для повышения стабильности.

Энергосбережение: печь сопротивления была модернизирована до индукционной печи, а потребление энергии снижено до 4000 кВтч/тонну (на пилотной стадии).

Нанообработка: в сочетании с последующим механическим измельчением получается порошок WC <0,5 мкм, отвечающий требованиям 3D-печати.

Будучи краеугольным камнем производства порошка карбида вольфрама, метод высокотемпературной цементации будет и дальше совершенствоваться с точки зрения эффективности, защиты окружающей среды и усовершенствования в будущем.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2 Химическое осаждение из паровой фазы (CVD) порошка карбида вольфрама

2.2.1 Основные принципы метода химического осаждения из газовой фазы порошка карбида вольфрама

Химическое осаждение из паровой фазы (CVD) напрямую генерирует порошок карбида вольфрама через реакцию в газовой фазе. Типичная реакция: $WCl_6 + CH_4 + H_2 \rightarrow WC + 6HCl$ (900-1100°C). Газообразный прекурсор разлагается при высокой температуре, а атомы углерода и вольфрама осаждаются, образуя кристаллы WC, которые подходят для приготовления наноразмерных порошков.

2.2.2 Технологическая схема метода химического осаждения из газовой фазы порошка карбида вольфрама

Газификация сырья: WCl_6 (температура кипения 347°C) нагревается и газифицируется, а CH_4 и H_2 смешиваются в пропорции.

Реакция: Газ вводится в реакционную камеру (кварцевая трубка, 900-1100°C, давление 10-100 Па) для осаждения и получения WC.

Сбор: Продукт собирается через конденсатор, а остаточный газ (HCl) нейтрализуется щелочным раствором.

Последующая обработка: слегка измельчить и просеять для получения частиц нужного размера (<100 нм).

2.2.3 Параметры процесса CVD-метода порошка карбида вольфрама

Температура: 900-1100°C. Если температура слишком высокая, будет образовываться W_2C . Если температура слишком низкая, реакция будет неполной.

Давление: 10-100 Па, низкое давление способствует образованию наночастиц.

Соотношение газов: $CH_4 : WCl_6 = 1 : 1-1,5:1$, H_2 в избытке (в 10-20 раз) для снижения WCl_6 .

2.2.4 Характеристики продукта из порошка карбида вольфрама, полученного методом химического осаждения из газовой фазы

Размер зерна: 20-100 нм (измерение с помощью просвечивающего электронного микроскопа).

Чистота: >99,95%, содержание кислорода <50 ppm.

Морфология: Почти сферическая, удельная поверхность 20-50 м²/г (метод БЭТ).

2.2.5 Преимущества и недостатки метода химического осаждения из газовой фазы порошка карбида вольфрама

Преимущества: малый размер частиц, высокая чистота, подходит для высокоточных применений.

Недостатки: сложное оборудование (вакуумная система), низкая производительность (кг уровень/партия), высокая стоимость (около 500-1000 юаней/кг).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.2.6 Применение метода химического осаждения из газовой фазы порошка карбида вольфрама

Используется для авиационных покрытий и носителей катализаторов. Например, GE в США использует метод CVD для получения покрытий WC (твердость HV 2600) с температурной стойкостью $>1200^{\circ}\text{C}$.

2.3 Механическое легирование порошка карбида вольфрама

2.3.1 Основные принципы механического легирования порошка карбида вольфрама

Механическое легирование (МА) использует высокоэнергетическое шаровое измельчение, чтобы заставить вольфрамовый порошок и углеродный порошок реагировать в твердом состоянии с образованием WC. Механическая энергия вызывает атомную диффузию и реконструкцию решетки, а формула реакции та же, что и при высокотемпературной цементации ($\text{W} + \text{C} \rightarrow \text{WC}$).

2.3.2 Технологическая схема механического легирования порошка карбида вольфрама

Смешивание сырья: Вольфрамовый порошок (1-5 мкм) и технический углерод (<1 мкм) смешиваются в молярном соотношении 1:1,05.

Шаровое измельчение: поместить в высокоэнергетическую шаровую мельницу (планетарную, соотношение шаров к материалу 10:1, скорость вращения 300-500 об/мин), измельчать в течение 20-50 часов в инертной атмосфере (Ar).

Постобработка: просеивание для удаления крупных частиц, размер частиц продукта <100 нм.

2.3.3 Параметры процесса механического легирования порошка карбида вольфрама

Скорость вращения: 300-500 об/мин. Слишком низкая приведет к неполной реакции, а слишком высокая приведет к появлению примесей (например, Fe).

Время измельчения: 20-50 часов, рентгенодифракционное обнаружение образования фазы WC.

Соотношение шариков и материала: 10:1–15:1. Обычно используются шарики WC, чтобы избежать загрязнения.

2.3.4 Характеристики продукта механического легирования порошка карбида вольфрама

Размер зерна: 50-100 нм (ПЭМ).

Чистота: $>99\%$, примесь железа $<0,1\%$ (ИСП-ОЭС).

Морфология: частицы неправильной формы с множеством дефектов границ зерен.

2.3.5 Преимущества и недостатки механического легирования порошка карбида вольфрама

Преимущества: низкая температура ($<100^{\circ}\text{C}$), низкое энергопотребление, подходит для нано-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

туалетов.

Недостатки: риск попадания примесей и длительный производственный цикл (часы).

2.3.6 Применение метода механического легирования порошка карбида вольфрама

Для сверхтонкого твердого сплава, например, для микросверления печатных плат (зерно $<0,5$ мкм, твердость HV 2200).

2.4 Плазменный метод получения порошка карбида вольфрама

2.4.1 Основные принципы метода плазменной обработки порошка карбида вольфрама

Плазменный метод использует высокотемпературную плазму ($>5000^{\circ}\text{C}$), чтобы заставить вольфрамовый порошок и источник углерода мгновенно реагировать для получения WC. Горячая плазма обеспечивает высокую плотность энергии и способствует реакции в газовой фазе или жидкой фазе.

2.4.2 Технологическая схема плазменного метода получения порошка карбида вольфрама

Подача сырья: Вольфрамовый порошок и CH_4 подаются в плазменную пушку через газ-носитель (Ar).

Реакция: Плазма (мощность 10-50 кВт, температура $5000-10000^{\circ}\text{C}$) разлагает CH_4 , а вольфрам плавится и вступает в реакцию с углеродом.

Охлаждение: Продукт быстро охлаждали в конденсационной камере (10^{-6} $^{\circ}\text{C}/\text{с}$) и собирали порошок.

2.4.3 Параметры процесса плазменной обработки порошка карбида вольфрама

Мощность: 10-50 кВт, влияет на размер частиц.

Расход газа: Ar 20-50 л/мин, CH_4 1-5 л/мин.

Скорость охлаждения: $>10^{-5}$ $^{\circ}\text{C}/\text{с}$, чтобы избежать роста зерен.

2.4.4 Характеристики продукта плазменного метода получения порошка карбида вольфрама

Размер зерна: 50-200 нм.

Чистота: $>99,9\%$, содержание кислорода <100 ppm.

Внешний вид: Сферические частицы, хорошая текучесть (>20 с/50 г).

2.4.5 Преимущества и недостатки метода плазменной обработки порошка карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Преимущества: мелкие и сферические частицы, пригодные для распыления.

Недостатки: Дорогостоящее оборудование (миллионы долларов) и высокое потребление энергии.

2.4.6 Применение метода плазменной обработки порошка карбида вольфрама

Используется для покрытий, наносимых методом HVOF, например, WC-порошок производства шведской компании Sandvik (твердость HV 1200-1400).

2.5 Сольвотермический метод порошка карбида вольфрама

2.5.1 Основные принципы сольвотермического метода получения порошка карбида вольфрама

Сольвотермальный метод синтезирует WC при более низкой температуре ($<300^{\circ}\text{C}$) посредством жидкофазной реакции, используя высокое давление растворителя и разложение источника органического углерода в автоклаве. Например: $\text{WO}_3 + \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \rightarrow \text{WC} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$.

2.5.2 Поток процесса получения порошка карбида вольфрама методом растворяющей термической обработки

Подготовка сырья: WO_3 и глюкозу ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) растворяют в воде в молярном соотношении 1:2.

Реакция: Раствор помещают в автоклав при температуре $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$ и давлении 10-20 МПа на 12-24 часа.

Последующая обработка: фильтрация, промывка (деионизированная вода), сушка (80°C) и измельчение до $<100\text{ нм}$.

2.5.3 Параметры процесса сольвотермического метода получения порошка карбида вольфрама

Температура: $200\text{--}300^{\circ}\text{C}$, ниже 200°C реакция не завершается.

Давление: 10-20 МПа, влияет на эффективность карбонизации.

Время: 12–24 часа, рентгеновская дифракция обнаруживает фазу WC.

2.5.4 Характеристики продукта из порошка карбида вольфрама, полученного сольвотермическим методом

Размер зерна: 20-50 нм.

Чистота: $>99\%$, содержание кислорода $<200\text{ ppm}$.

Морфология: Почти сферическая, с меньшей агломерацией.

2.5.5 Преимущества и недостатки сольвотермического метода для порошка карбида вольфрама

Преимущества: низкая температура и энергосбережение, малый размер частиц, экологичность.

Недостатки: низкий выход (сорта/партия), процесс еще не отработан.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2.5.6 Применение сольвотермального метода для порошка карбида вольфрама

Фаза исследований, для использования в электродах топливных элементов (удельная площадь поверхности $> 50 \text{ м}^2/\text{г}$).

Ссылки

GB/T 4295-2008, *Порошок карбида вольфрама*, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008.

Определены технические требования и методы испытаний порошка карбида вольфрама, применимые для контроля качества продукции таких процессов, как высокотемпературная цементация.

GB/T 5124.1-2008, Методы химического анализа твердого сплава. Часть 1: Определение общего содержания углерода, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008.

Метод сжигания предназначен для определения общего содержания углерода в твердом сплаве и используется для проверки состава порошка карбида вольфрама.

GB/T 5124.2-2008, Методы химического анализа твердого сплава. Часть 2: Определение содержания свободного углерода, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008.

Метод кислотного растворения-титрования предназначен для определения свободного углерода и используется для оценки чистоты продукта, полученного методом высокотемпературной карбонизации.

Карбид - Часть 4: Определение примесных элементов, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008.

Метод ICP-OES предназначен для определения примесей, таких как Fe, и используется для качественного анализа методов высокотемпературной цементации и механического легирования.

GB/T 5314-2011, *Порошки для твердого сплава*, Национальное управление по стандартизации Китая, 2011.

Определяет технические требования и испытания физических свойств для порошков твердого сплава, применимых к различным методам приготовления.

GB/T 25995-2010, Вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама — Определение размера частиц на ситовом фильтре Фишера (FSSS), Национальное управление по стандартизации Китая, 2010.

Метод определения размера частиц анализатора Фишера предназначен для контроля размера частиц в таких процессах, как высокотемпературная карбонизация.

Чжан Лидэ, *Наноматериалы и наноструктуры*, Science Press, 2002.

Ознакомить с технологией получения наноматериалов, включая основные принципы химического осаждения из газовой фазы и механического легирования.

развития китайской вольфрамовой промышленности, Metallurgical Industry Press, 1998.

Описывает процесс индустриализации порошка карбида вольфрама в Китае, включая случаи применения метода высокотемпературной цементации.

Ласснер, Э. и Шуберт, В. Д. (1999). *Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавы и химические соединения*. Springer.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Всестороннее введение в свойства и технологию получения вольфрама и его соединений, охватывающее высокотемпературную цементацию, химическое осаждение из газовой фазы и другие методы.

Uradhyaya, GS (1998). *Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства и испытания*. William Andrew Publishing.

Подробно описаны промышленное производство и эксплуатационные испытания порошка карбида вольфрама с упором на высокотемпературную цементацию и механическое легирование.

Герман, Р. М. (1994). *Наука о порошковой металлургии*. Федерация металлургической промышленности.

Систематическое введение в технологию порошковой металлургии, включая теорию и практику механического легирования и плазменные методы.

Международная ассоциация вольфрамовой промышленности (ITIA) (2023). «Статистика вольфрама 2023», *Ежегодный отчет ITIA*.

Предоставляет данные о мировом производстве порошка вольфрама и карбида вольфрама, отражающие основное положение метода высокотемпературной цементации.

ASTM E384-17 (2017). *Стандартный метод испытания твердости материалов при микровдавливании*. ASTM International.

Определяет метод испытания на микротвердость, используемый для оценки свойств порошка карбида вольфрама после спекания.

ISO 4499-2:2020 (2020). *Твердые сплавы — Металлографическое определение микроструктуры — Часть 2: Измерение размера зерна WC*. Международная организация по стандартизации.

Определяет метод микроскопического определения размера зерна WC, подходящий для контроля качества продуктов высокотемпературной карбонизации.

Бенджамин, Дж. С. (1970). «Дисперсионно-упрочненные суперсплавы с помощью механического легирования», *Metallurgical Transactions*, т. 1, стр. 2943-2951.

Впервые предложена технология механического легирования, что положило начало ее использованию при получении порошка карбида вольфрама.

Сурьянараяна, К. (2001). «Механическое легирование и фрезерование», *Progress in Materials Science*, т. 46, стр. 1-184.

Рассмотрены параметры процесса и области применения механического легирования с использованием наноразмеров порошка карбида вольфрама.

Японская ассоциация стандартов (2005). JIS H 7803:2005, Методы испытаний порошка карбида вольфрама. Японская ассоциация стандартов.

Химические и физические методы испытаний порошка карбида вольфрама можно отнести к анализу продукта методом высокотемпературной цементации.

ГОСТ 25599.1-83 (1983). «Порошки твердые сплавы. Метод определения содержания углерода», Государственный комитет СССР по стандартам.

Советский стандарт устанавливает метод химического анализа содержания углерода в порошке твердого сплава, применимый к методу высокотемпературной цементации.

DIN EN ISO 4499-2:2020 (2020). *Твердый сплав — Металлургическое определение микроструктуры — Часть 2: Измерение размера зерна WC*. Немецкий институт стандартизации.

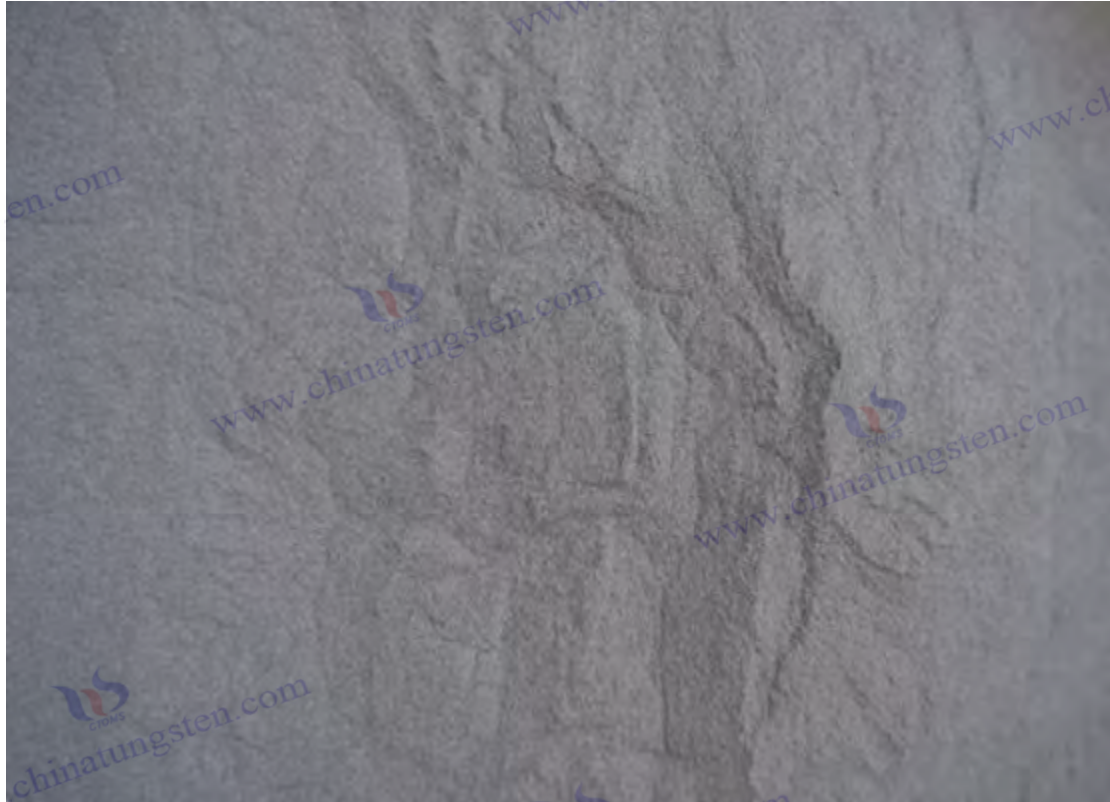
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Немецкая версия стандарта ISO, соответствующая ISO 4499-2, для анализа зерна при высокотемпературной цементации.

KS D 9502:2015 (2015). Определение распределения размеров частиц порошка карбида вольфрама.

Корейская ассоциация стандартов.

Корейский стандарт определяет метод испытания гранулометрического состава порошка карбида вольфрама, который может быть использован для изделий, полученных методом высокотемпературной цементации.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



Глава 3: Микроструктура и технология определения характеристик порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама (WC) является ядром твердого сплава, износостойких покрытий и высокопроизводительных инструментальных материалов. Его микроструктура и эксплуатационные характеристики совместно определяют качество конечного продукта. От расположения кристаллов на атомном уровне до морфологического распределения частиц, от точного контроля химического состава до комплексной оценки физико-механических свойств, характеристики порошка карбида вольфрама являются как продуктом процесса приготовления, так и краеугольным камнем эффекта применения. Например, инструменты WC с твердостью до HV 2000-2500 могут оставаться острыми при высокоскоростной резке, а покрытия WC с превосходной износостойкостью (скорость износа $<0,01 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$) могут продлить срок их службы в суровых условиях, и все это благодаря уникальности его микроструктуры. Целью данной главы является систематическое представление микроструктурных характеристик и методов характеризации порошка карбида вольфрама посредством содержательных обсуждений

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на естественном языке в сочетании с научными данными и промышленной практикой, охватывающих рентгеновскую дифракцию (XRD), сканирующую электронную микроскопию (SEM), химический анализ и методы испытаний производительности, показывающих, как эти характеристики переходят из лаборатории на производственную линию, и предоставляющих всеобъемлющие рекомендации по исследованиям, разработкам и применению в отрасли производства твердого сплава.

3.1 Характеристики микроструктуры порошка карбида вольфрама

Микроструктура порошка карбида вольфрама является внутренним корнем его производительности, охватывая кристаллическую структуру, размер зерна, морфологию частиц и характеристики дефектов. Эти характеристики не только отражают различия в процессах подготовки (такие как крупнозернистость метода высокотемпературной цементации или наномасштабная структура метода CVD), но и играют ключевую роль в процессе спекания, прессования или распыления.

3.1.1 Кристаллическая структура

Ядро порошка карбида вольфрама лежит в его гексагональной кристаллической структуре (пространственная группа $P6m2$, $a=2,906 \text{ \AA}$, $c=2,837 \text{ \AA}$, JCPDS 51-0939). Такое близкое расположение атомов придает ему превосходную твердость и химическую стабильность. Атомы вольфрама и атомы углерода располагаются поочередно, и каждый атом вольфрама окружен шестью атомами углерода, образуя стабильную гексагональную плотноупакованную сеть. Анализ рентгеновской дифракции показывает, что характерные дифракционные пики WC расположены при $2\theta=35,641^\circ$ (кристаллическая плоскость 100) и $48,298^\circ$ (кристаллическая плоскость 101). Эти положения пиков являются «отпечатками пальцев», по которым можно судить о чистоте порошка. Однако идеальный однофазный WC не всегда легко доступен в реальном производстве. Если содержание углерода недостаточно ($<6,10\%$), будет образовываться фаза W_2C ($2\theta=39,5^\circ$), которая имеет низкую твердость (HV около 1800); если содержание углерода избыточно ($>6,18\%$), будет выпадать свободный углерод ($2\theta=26,6^\circ$), ослабляя прочность спекания. Это тонкое изменение напоминает нам, что соотношение источника углерода и контроль атмосферы в процессе приготовления имеют решающее значение.

3.1.2 Размер и распределение зерна

Размер зерна является ключевой переменной в микроструктуре и напрямую влияет на механические свойства порошка карбида вольфрама. В промышленности размер зерна варьируется от нанометров ($<100 \text{ нм}$) до микрометров ($1-10 \text{ мкм}$), с общей спецификацией $1-5 \text{ мкм}$. Метод высокотемпературной цементации легко генерирует зерна размером более 5 мкм из-за длительной высокотемпературной реакции ($1800-2000^\circ\text{C}$), в то время как метод механического легирования или плазменного метода может контролироваться ниже 100 нм за счет высокого

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подвода энергии и быстрого охлаждения. Равномерность распределения зерна измеряется значением Span $((D_{90}-D_{10})/D_{50})$, а для высококачественного порошка требуется $<1,5$ и $RSD < 10\%$ (ISO 4499-2:2020). Мелкие зерна (<1 мкм) улучшают твердость ($HV > 2200$) и износостойкость, а крупные зерна (>5 мкм) повышают ударопрочность (>25 Дж/см²). Этот баланс между размером и производительностью является искусством промышленного дизайна.

3.1.3 Морфология частиц

Морфология частиц - это «внешний вид» порошка карбида вольфрама, который влияет на текучесть (>20 с/50 г) и поведение при спекании. WC, полученный методом высокотемпературной карбонизации, в основном является полиэдрическим, с острыми краями и шероховатостью поверхности Ra 0,1-0,5 мкм (измерение ACM); плазменный метод или метод CVD генерируют почти сферические частицы с удельной площадью поверхности до 20-50 м²/г (метод БЭТ) и лучшей текучестью. Наноразмерный WC легко агломерируется из-за его высокой поверхностной энергии, а жесткая агломерация должна быть $<5\%$ (наблюдение СЭМ), в противном случае во время прессования легко возникают дефекты. Разнообразие морфологии предоставляет возможности для различных применений, например, сферический WC больше подходит для распыления, а полиэдрический WC способствует спеканию.

3.1.4 Дефекты и примеси

Микроструктура не идеальна, а дефекты границ зерен и примеси являются факторами, которые нельзя игнорировать. ТЭМ показывает, что плотность дислокаций границ зерен WC обычно $<10^6$ /см². Слишком высокая ($>10^7$ /см²) снизит прочность спекания (<4000 МПа). Примеси, такие как Fe ($<0,05\%$), Mo ($<0,01\%$) и O ($<0,02\%$), присутствуют в следовых количествах, но влияют на производительность: железо поступает из загрязнений шаровой мельницы, а кислород — из-за окисления. Оба могут образовывать хрупкие фазы (например, Fe₃C) или оксиды (WO₃) при высоких температурах, ослабляя ударную вязкость ($K_{IC} < 10$ МПа·м^{1/2}). Контроль дефектов и примесей является ключом к улучшению качества порошка.

3.2 Метод характеристики порошка карбида вольфрама

Технология характеристики является «глазом» для исследования микроструктуры порошка карбида вольфрама, обеспечивая многомерную аналитическую перспективу от кристаллической структуры до морфологии поверхности. Эти методы способствуют базовому пониманию в научных исследованиях и обеспечивают постоянство качества в промышленности.

3.2.1 Рентгеновская дифракция (РДА)

XRD использует дифракцию рентгеновских лучей и решеток для выявления фазового состояния и параметров кристаллов порошка карбида вольфрама. Оборудование, такое как Bruker D8

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Advance, использует излучение $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$), сканирует $2\theta = 20^\circ - 80^\circ$, шаг $0,02^\circ$ и скорость $2^\circ/\text{мин}$. Объем образца составляет всего 0,5-1 г, и его можно тестировать после выравнивания. Результаты показывают, что основной пик WC составляет $2\theta = 35,641^\circ$. Если появляется W_2C ($39,5^\circ$) или W ($40,3^\circ$), это указывает на неполную карбонизацию, а точность определения содержания фаз составляет $\pm 0,5\%$. XRD является неразрушающим и эффективным, но размер нанозерна необходимо оценивать в сочетании с формулой Шеррера (погрешность $\pm 10 \text{ нм}$).

3.2.2 Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

SEM использует сканирование электронным лучом для представления морфологии частиц и распределения размеров порошка карбида вольфрама. Оборудование ZEISS Sigma 300, напряжение 5-15 кВ, увеличение 100-50000 $\times$, разрешение 1 нм. Образец должен быть позолочен (10 нм), а степень вакуума должна быть $< 10^{-5}$ Па. Изображение показывает, что размер зерна составляет 0,1-10 мкм, относительное стандартное отклонение однородности составляет $< 10\%$, а агломерацию можно идентифицировать. SEM интуитивно понятен, но ограничен поверхностью и должен быть дополнен другими методами.

3.2.3 Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

ТЕМ проникает глубоко на атомный уровень для анализа решетки и дефектов. Оборудование FEI Tecnai G2 F20 (200 кВ), образец диспергируется ультразвуком в этаноле (50 Вт, 5 минут), наносится капельным способом на медную сетку, разрешение составляет 0,24 нм. Результаты показывают полосы решетки WC ($d = 2,518 \text{ \AA}$), а плотность дислокаций составляет $< 10^6 / \text{см}^2$, что указывает на высокое качество. Хотя ТЕМ является точным, подготовка образца сложна, и он в основном используется для научных исследований.

3.2.4 Атомно-силовая микроскопия (АСМ)

АСМ измеряет шероховатость поверхности порошка карбида вольфрама путем сканирования зондом. Оборудование Bruker Dimension Icon, кремниевый зонд, сканирование $10 \times 10 \text{ мкм}$, результат R_a 0,1-0,5 мкм, что соответствует удельной площади поверхности метода БЭТ (отклонение $< 5\%$). АСМ подходит для анализа поверхности нано WC, но его репрезентативность ограничена небольшими областями.

3.3 Анализ химического состава порошка карбида вольфрама

Химический состав является краеугольным камнем качества порошка карбида вольфрама, влияющим на его стабильность и производительность. Метод анализа должен учитывать как точность, так и практичность.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.3.1 Анализ общего углерода и свободного углерода

Общее содержание углерода определяется методом высокочастотного сжигания-инфракрасного поглощения (GB/T 5124.1-2008), оборудование LECO CS-844 работает в потоке кислорода 1350°C (2-3 л/мин), с точностью $\pm 0,01\%$, а результат должен быть между 6,10% и 6,18%. Свободный углерод определяется методом кислотного растворения-титрования (GB/T 5124.2-2008), H_2SO_4 - HNO_3 (1:1) растворяется в течение 30 минут, с точностью $\pm 0,005\%$ и $< 0,5\%$. Отклонение содержания углерода напрямую влияет на фазовое состояние и твердость.

3.3.2 Анализ примесных элементов

Для определения примесей, таких как Fe и Mo, использовался ICP-OES (GB/T 5124.4-2008). Для растворения образца в HNO_3 + HCl использовалось оборудование PerkinElmer Optima 8300. Результаты показали, что $\text{Fe} < 0,05\%$, $\text{Mo} < 0,01\%$, а предел обнаружения составил 0,001%. Контроль примесей необходимо начинать с сырья и процессов.

3.3.3 Анализ содержания кислорода

Содержание кислорода определяется методом плавления в инертном газе (ASTM E1019-18), оборудование LECO ONH836 работает в гелии при 1900°C, микронный WC < 100 ppm, нанометровый WC < 200 ppm. Избыток кислорода снизит плотность спекания.

3.4 Испытание физических свойств порошка карбида вольфрама

Испытания физических свойств позволяют оценить характеристики обработки и применения и являются связующим звеном между микро- и макроуровнями.

3.4.1 Размер и распределение частиц

Метод лазерной дифракции (GB/T 19077-2016) использует Malvern Mastersizer 3000, показатель преломления 2,5, непрозрачность 10%-20%, $D_{50} = 1-5$ мкм, $\text{Span} < 1,5$. Измеритель размера частиц Fisher (GB/T 25995-2010) измеряет 0,5-10 мкм, повторяемость $< 3\%$. Размер частиц определяет баланс между твердостью и ударопрочностью.

3.4.2 Насыпная плотность и текучесть

Насыпная плотность измеряется с помощью волюметра Скотта (GB/T 5314-2011), 12,0-14,0 г/см³, $\text{RSD} < 2\%$. Текучесть измеряется с помощью расходомера Холла (ASTM B213-20), > 20 с/50 г. Высокая плотность и текучесть обеспечивают однородность формования.

3.4.3 Удельная площадь поверхности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Метод БЭТ (ISO 9277:2010) с использованием Micromeritics ASAP 2020, дегазация при 200°C, размер микрона 0,5-2 м²/г, наноразмер 20-50 м²/г. Высокая удельная площадь поверхности улучшает активность спекания.

3.5 Механические свойства и промышленное применение порошка карбида вольфрама

Механические свойства отражают практическую ценность порошка карбида вольфрама и должны быть проверены посредством стандартных испытаний.

3.5.1 Твердость

Испытание на твердость по Виккерсу (ASTM E384-17), нагрузка 1 кг, 15 с, результат HV 2000-2500, отклонение < 50. Высокая твердость обусловлена мелкими зернами и однофазной структурой.

3.5.2 Износостойкость

Испытание резинового колеса на сухом песке (ASTM G65-16), песок 50-70 меш, нагрузка 130 Н, скорость износа < 0,01 мм³ / Н · м, лучше, чем Cr₃C₂.

3.5.3 Прочность на сжатие

Испытание на одноосное сжатие (ISO 3327:2009), оборудование Instron 5985, >4000 МПа (WC-Co, Co 10%), деформация разрушения <1%.

3.5.4 Случаи промышленного применения

Китайская компания по производству твердого сплава использует порошок WC FSSS 2 мкм, HV 2200, а срок службы инструмента составляет >500 минут. Sandvik использует порошок WC D50 <1 мкм, а износостойкость покрытия увеличивается на 40%, что используется для лопаток авиационных турбин.

Ссылки

GB/T 4295-2008, Порошок карбида вольфрама, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008. Определяет технические требования и методы испытаний для порошка карбида вольфрама.

GB/T 5124.1-2008, Методы химического анализа твердого сплава. Часть 1: Определение общего содержания углерода, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008. В нем указано, что общее содержание углерода должно определяться методом сжигания.

GB/T 5124.2-2008, Методы химического анализа твердого сплава. Часть 2: Определение

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержания свободного углерода , Национальное управление по стандартизации Китая, 2008. В нем указано, что свободный углерод должен определяться методом кислотного растворения-титрования.

Карбид - Часть 4: Определение примесных элементов, Национальное управление по стандартизации Китая, 2008. В нем указано, что для определения примесных элементов следует использовать метод ICP-OES.

GB/T 5314-2011, Порошки для твердого сплава , Национальное управление по стандартизации Китая, 2011. Определяет методы испытаний эксплуатационных характеристик порошков твердого сплава.

GB/T 19077-2016, *Распределение размеров частиц — метод лазерной дифракции* , Национальное управление по стандартизации Китая, 2016.

Для определения распределения размеров частиц предназначен метод лазерной дифракции.

GB/T 25995-2010, Вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама — Определение размера частиц на ситовом фильтре Фишера (FSSS) , Национальное управление по стандартизации Китая, 2010. Определяет метод определения размера частиц на ситовом фильтре Фишера (FSSS).

Ласснер, Э. и Шуберт, В. Д. (1999). *Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавы и химические соединения* . Springer. Знакомит с микроструктурой и свойствами соединений вольфрама.

Uradhyaya, GS (1998). *Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства и испытания* . William Andrew Publishing. Подробное описание испытаний и применения порошка карбида вольфрама.

ASTM B213-20 (2020). *Стандартные методы испытаний расхода металлических порошков с использованием воронки расходомера Холла* . ASTM International. Определяет использование расходомера Холла для определения текучести.

ASTM E384-17 (2017). *Стандартный метод испытания твердости материалов при микровдавливании* . ASTM International.

Определяет метод испытания твердости по Виккерсу.

ASTM G65-16 (2016). Стандартный метод испытаний для измерения абразивного износа с использованием прибора «сухой песок/резиновый круг». ASTM International.

ASTM E1019-18 (2018). *Стандартные методы испытаний для определения содержания углерода, серы, азота и кислорода в сплавах стали, железа, никеля и кобальта различными методами сжигания и плавления в среде инертного газа* . ASTM International. Устанавливает метод определения содержания кислорода.

ISO 3327:2009 (2009). *Твердые сплавы — Определение прочности на поперечный разрыв* . Международная организация по стандартизации. Устанавливает метод испытания прочности на сжатие.

ISO 4499-2:2020 (2020). *Твердые сплавы — Металлографическое определение микроструктуры — Часть 2: Измерение размера зерна WC*. Международная организация по стандартизации. Устанавливает метод микроскопического определения размера зерна WC.

ISO 9277:2010 (2010). *Определение удельной площади поверхности твердых тел методом*

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

адсорбции газа — метод БЭТ. Международная организация по стандартизации. Устанавливает метод БЭТ для определения удельной площади поверхности.

Ассоциация по стандартам Японии (2005). JIS H 7803:2005, Методы испытаний порошка карбида вольфрама, Ассоциация по стандартам Японии. Определяет химические и физические методы испытаний порошка карбида вольфрама.

ГОСТ 25599.1-83 (1983). «Порошки твердые сплавы. Метод определения содержания углерода», Государственный комитет СССР по стандартам.

Метод химического анализа для определения содержания углерода в порошках твердого сплава.

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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

CTIA GROUP 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.



Глава 4: Применение порошка карбида вольфрама

Как душа твердого сплава, порошок карбида вольфрама (WC) применяется в машиностроении, аэрокосмической промышленности, электронной промышленности и медицине, и его можно назвать «твердым ядром» современной промышленности. С тех пор как немецкая компания Widia в начале 20 века объединила порошок карбида вольфрама с кобальтом, чтобы разработать первое поколение твердого сплава, этот материал полностью перевернул шаблон традиционных инструментальных материалов благодаря своей удивительной твердости (HV 2000-2500), сверхнизкой скорости износа ($<0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$) и превосходной высокотемпературной стабильности ($>1000 \text{ }^\circ\text{C}$). От высокоскоростных режущих инструментов до износостойких форм и прецизионных медицинских приборов, применение порошка карбида вольфрама не только способствовало скачку промышленной эффективности, но и открыло новые горизонты для высокоточного производства. В этой главе будет систематически рассмотрено применение порошка карбида вольфрама в производстве твердого сплава, износостойких покрытий и других областях, и с помощью богатых случаев и данных будет показано, как он трансформировался из химической реакции в лаборатории в основной материал на производственной линии. Первая часть посвящена производству твердого сплава, глубокому анализу роли порошка карбида вольфрама в режущих инструментах, износостойких деталях и прецизионных инструментах для обработки, а также показу его разнообразного технического очарования.

4.1 Применение порошка карбида вольфрама в производстве твердого сплава

Твердый сплав изготавливается из порошка карбида вольфрама в качестве ядра и смешивается с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

металлическими связующими, такими как кобальт (Co) и никель (Ni) посредством порошковой металлургии для получения материалов с высокой твердостью, высокой прочностью и износостойкостью. С тех пор как немецкий химик Шретер впервые спекал WC и Co в твердый сплав в 1923 году, эта технология претерпела почти сто лет эволюции и теперь стала незаменимым краеугольным камнем обрабатывающей промышленности. Применение порошка карбида вольфрама в твердом сплаве зависит не только от его собственных физических и химических свойств (таких как стабильность гексагональной кристаллической структуры), но также тесно связано с выбором связующей фазы, регулированием размера зерна и оптимизацией процесса спекания. В этом разделе будет подробно объяснено, как порошок карбида вольфрама проявляет себя в производстве твердосплавных изделий с трех сторон: режущие инструменты, износостойкие детали и прецизионные инструменты для обработки, в сочетании с историческим развитием, научными принципами и промышленной практикой.

4.1.1 Применение порошка карбида вольфрама в режущих инструментах

Режущие инструменты являются самой ранней областью применения порошка карбида вольфрама, и это также его самая ослепительная стадия. По сравнению с традиционной быстрорежущей сталью (HSS, твердость HRC 60-65, скорость резания <100 м/мин), карбид на основе WC увеличивает скорость резания до 200-300 м/мин, а срок службы инструмента увеличивается в 5-10 раз, становясь стандартом современной обработки. Порошок карбида вольфрама смешивается с кобальтом для образования карбида WC-Co, который имеет идеальный баланс твердости и прочности, что позволяет ему оставаться острым и стабильным в условиях высокой скорости и высокой нагрузки.

4.1.1.1 Токарные инструменты и фрезы

Токарные резцы и фрезы являются «главной силой» в режущих инструментах, широко используемых для токарной обработки и фрезерования стали, чугуна и жаропрочных сплавов. Применение порошка карбида вольфрама в таких инструментах в основном основано на формуле WC-Co, а содержание кобальта обычно составляет от 6% до 12%. Это соотношение было проверено промышленностью на протяжении десятилетий, и оно не только обеспечивает твердость (HV 1500-1800), но и обеспечивает достаточную устойчивость к скалыванию (вязкость разрушения K_{IC} 10-15 МПа·м^{1/2}). Кобальт, как связующая фаза, плавится и обволакивает частицы WC во время процесса спекания (1450-1500°C, жидкофазное спекание), образуя плотную микроструктуру. Выбор размера зерна WC имеет решающее значение, и 1-3 мкм является основной спецификацией, поскольку он учитывает как твердость, так и износостойкость, а также позволяет избежать проблемы агломерации наноразмерного WC (<100 нм) и недостаточной прочности крупных зерен (>5 мкм).

С научной точки зрения высокая твердость WC обусловлена его гексагональной кристаллической

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

структурой ($a=2,906 \text{ \AA}$, $c=2,837 \text{ \AA}$). Атомы углерода встроены в решетку вольфрама, образуя прочные ковалентные связи, что делает его сопротивление деформации намного выше, чем у металлических материалов. Добавление кобальта повышает пластичность и ударопрочность материала через интерфейс между металлическими связями и частицами WC. Экспериментальные данные показывают, что скорость резания токарных инструментов WC-Co может достигать 200-300 м/мин, что на 50%-100% выше, чем у HSS. Красностойкость (600-800 °C по-прежнему сохраняет $HV>1200$) дает ему очевидные преимущества при высокотемпературной резке.

В промышленных случаях обработка блока цилиндров автомобильных двигателей является типичным применением токарных инструментов WC-Co. Китайские токарные инструменты марки YG8 (WC 92%, Co 8%) имеют скорость резания 250 м/мин при обработке блоков цилиндров из серого чугуна, срок службы более 100 000 штук и эффективность более чем в 3 раза выше, чем у инструментов HSS. Этот успех обусловлен однородностью порошка WC ($\text{Span} < 1,5$) и оптимизированным соотношением кобальта, что делает инструмент менее склонным к сколам или износу при высокоскоростной резке. Линия по производству блоков цилиндров Toyota Motor в Японии также использует аналогичные фрезы WC-Co. При обработке головок цилиндров из алюминиевого сплава шероховатость поверхности $Ra < 0,8 \text{ мкм}$, а выход годного увеличивается до 99,8%, что подчеркивает незаменимую роль порошка карбида вольфрама в современном производстве.

Что касается будущих тенденций, токарные инструменты WC-Co развиваются в сторону более мелкозернистых материалов ($< 1 \text{ мкм}$) и композитных покрытий (таких как TiN - TiC - Al_2O_3) для дальнейшего повышения износостойкости и термостойкости в целях удовлетворения высокоскоростных и высокоточных требований интеллектуального производства.

4.1.1.2 Сверла и буровой инструмент

Сверла и расточные инструменты играют ключевую роль в обработке глубоких отверстий, таких как масляные отверстия коленчатого вала автомобиля, каналы лопаток авиационных турбин и т. д., а требования к производительности порошка карбида вольфрама более строгие. Порошок WC микронного сорта (1-3 мкм) является первым выбором из-за его твердости ($HV 1600$) и стойкости к скалыванию ($K_{IC} > 12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$) и превосходной производительности при резке глубоких отверстий. Формула WC-Co (Co 6%-10%) готовится путем вакуумного спекания (1450 °C, 10^{-2} Па), чтобы гарантировать отсутствие внутренних пор и чистоту поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм}$. Высокая температура и высокое давление при обработке глубоких отверстий (температура в зоне резания $> 600 \text{ °C}$, осевое усилие $> 500 \text{ Н}$) подвергают испытанию красностойкость и износостойкость инструмента, в то время как высокая температура плавления WC (2870 °C) и низкий коэффициент теплового расширения ($5,2 \times 10^{-6} / \text{K}$) делают его идеальным выбором.

появилась технология многослойного покрытия WC- TiC. С помощью процесса CVD на

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подложку WC-Co наносится слой TiC толщиной 5-10 мкм (твердость HV 3000), а затем покрывается слоем TiN (термостойкость $>1000^{\circ}\text{C}$), что увеличивает износостойкость в 3 раза и продлевает срок службы инструмента до глубины сверления 500-1000 метров. Это покрытие не только повышает твердость поверхности, но и снижает коэффициент трения (с 0,4 до 0,2) и уменьшает накопление тепла резания. Сверло WC-Co для глубоких отверстий Sandvik Coromant в Швеции использует многослойное покрытие WC- TiC - TiN . При обработке стали 42CrMo скорость резания составляет 200 м/мин, глубина сверления — 500 мм, сопротивление скалыванию — $12,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, а температура резания контролируется ниже 800°C . Данная технология стала стандартной конфигурацией для производства авиационных двигателей.

С глобальной точки зрения, расточные резцы от Kennametal в США также имеют место в обработке глубоких отверстий. Его матрица WC-Co (Co 8%) в сочетании с покрытием PVD (TiAlN) демонстрирует превосходную антиадгезию и износостойкость при обработке титановых сплавов, а единичный срок службы увеличивается до 300 штук, что намного превышает 50 штук расточных резцов HSS. В будущем, с ростом спроса на сверхглубокую обработку отверстий (соотношение сторон $>20:1$), измельчение порошка WC ($<1 \text{ мкм}$) и интеллектуализация технологии покрытия станут горячими точками исследований и разработок.

4.1.1.3 Специальные режущие инструменты

Специальные режущие инструменты используются для высокоточной или сверхтвердой обработки материалов, такой как микросверление печатных плат (PCB) и авиационная композитная оснастка. Порошок карбида вольфрама должен соответствовать чрезвычайно высоким требованиям к производительности в таких приложениях. Диаметр микросверления печатных плат составляет $<0,1 \text{ мм}$, а для обеспечения тонкой структуры и высокой твердости требуется порошок WC нанокласса ($<100 \text{ нм}$). В процессе спекания используется горячее изостатическое прессование (HIP, 1450°C , 100-200 МПа), а высокое давление используется для подавления роста зерен (контролируется на уровне 0,2-0,5 мкм). Твердость готового продукта достигает HV 2000-2200, а прочность на сжатие составляет $>4500 \text{ МПа}$. Микросверло WC-Co (Co 6%), произведенное компанией Xiamen Jinlu Special Alloy Co., Ltd. в Китае, достигает точности $\pm 0,005 \text{ мм}$ при сверлении печатных плат. Каждое сверло может обрабатывать 50 000–80 000 отверстий, что намного превышает 10 000 отверстий традиционных стальных сверл. Его успех заключается в высокой удельной площади поверхности нано-WC ($>20 \text{ м}^2/\text{г}$) и эффекте уплотнения процесса HIP (плотность $>99,8\%$).

В авиационной отрасли для обработки композитов из углеродного волокна (CFRP) и титановых сплавов требуются специальные инструменты WC. Благодаря своей высокой твердости и слоистой структуре волокон CFRP предъявляет чрезвычайно высокие требования к износостойкости и остроте инструмента. Порошок Nano WC ($<100 \text{ нм}$) изготавливается в инструментах методом HIP-спекания с твердостью HV 2200, скоростью резания $>250 \text{ м/мин}$ и точностью $\pm 0,005 \text{ мм}$. Инструмент WC-Co (Co 10%), разработанный Kennametal в США для крыла

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Boeing 787, имеет срок службы более 500 штук при обработке CFRP, а его эффективность резки на 20% выше, чем у инструментов с алмазным покрытием, но стоимость снижена на 30%. Это преимущество достигается за счет сочетания высокой твердости WC и прочности кобальта, что позволяет избежать дефекта легкого отслаивания алмазного покрытия.

Будущее направление развития специальных режущих инструментов включает в себя исследования и разработки и интеллектуальное производство композитных материалов на основе WC (таких как WC- TiC-TaC). Например, путем добавления TaC (1%-2%) для повышения стойкости к термическому растрескиванию или комбинирования технологии лазерной микрообработки для повышения точности геометрии инструмента, что в дальнейшем отвечает высоким требованиям аэрокосмической и электронной промышленности.

4.1.2 Применение порошка карбида вольфрама в износостойких деталях

Износостойкие детали являются еще одной важной областью применения порошка карбида вольфрама. Благодаря своей высокой твердости и низкой скорости износа он широко используется в сценариях с высокой нагрузкой, таких как пресс-формы и подшипники. По сравнению с традиционной сталью (например, Cr12MoV, срок службы <100 000 раз) прочность цементированного карбида на основе WC увеличивается в 5-10 раз, что делает его предпочтительным материалом для штамповки, волочения и герметизации.

4.1.2.1 Штампы для штамповки

Штампы для штамповки используются для холодной штамповки стальных пластин, алюминиевых пластин и других металлов. Штампы WC-Co, изготовленные из порошка карбида вольфрама, известны своим сверхдолгим сроком службы. Типичная формула - WC 90%-94%, Co 6%-10%, приготовленная путем жидкофазного спекания (1500°C, 30 МПа), а готовое изделие имеет твердость HV 1400-1600 и прочность на сжатие >4000 МПа. Высокая твердость WC гарантирует, что поверхность штампа выдерживает истирание стальной пластины, в то время как прочность кобальта поглощает удар штамповки (>20 Дж/см²). Данные показывают, что срок службы матриц WC-Co может достигать 500 000–1 миллиона раз, что в 5–10 раз превышает аналогичный показатель Cr12MoV (<100 000 раз), а шероховатость поверхности Ra сохраняется ниже 0,05 мкм .

В автомобильном производстве штамповка дверных панелей является типичным применением пресс-форм WC-Co. Пресс-форма WC-Co (Co 8%), производимая CTIA GROUP, непрерывно работает уже полгода при штамповке стальных пластин толщиной 0,8 мм, при этом износ пресс-формы <0,01 мм, а затраты на техническое обслуживание при простоях сократились на 70%. Немецкая линия по производству автомобилей BMW также использует аналогичные пресс-формы WC, которые показывают отличную усталостную прочность при высокоскоростной штамповке (>100 раз/минуту), а срок службы одного комплекта пресс-форм достигает 800 000 штук. В

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

будущем совершенствование пресс-форм WC-Co (например, зерно $<0,5$ мкм) и поверхностных покрытий (например, CrN) станет направлением улучшения срока службы и точности.

4.1.2.2 Волоочильная и экструзионная матрица

Волоочильные и экструзионные фильеры используются для формирования металлической проволоки и трубок. Мелкозернистый порошок WC ($0,5-1$ мкм) популярен из-за его высокой твердости (HV 1800) и сверхнизкой шероховатости поверхности ($Ra < 0,02$ мкм). Формула WC-Co (Co 6%-8%) изготавливается путем вакуумного спекания (1450°C). Точность отверстия фильеры составляет $\pm 0,001$ мм, а скорость износа составляет $< 0,001 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, что намного ниже, чем у стальных фильер ($0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$). В процессе волочения проволоки высокая твердость WC противостоит трению металла, в то время как мелкозернистость обеспечивает гладкие стенки отверстия и уменьшает поверхностные дефекты проволоки.

Кабельная промышленность является важным сценарием применения фильер для волочения проволоки. Фильера для волочения проволоки WC-Co (Co 8%) на заводе в Цзянси, Китай, непрерывно работала в течение 6 месяцев, волоча медную проволоку диаметром $0,1$ мм. Изменение размера отверстия фильеры составляет $<0,002$ мм, скорость волочения проволоки составляет 20 м/с, а шероховатость поверхности проволоки Ra составляет $<0,01$ мкм. Такая производительность обусловлена однородностью порошка WC (FSSS $0,8$ мкм) и оптимизацией процесса спекания. Экструзионная фильера WC компании Sumitomo Electric Industries, Япония, используется для формирования алюминиевых труб со сроком службы более 1 миллиона метров, что подчеркивает потенциал мелкозернистого WC в высокоточной формовке. В будущем наноразмерные (<100 нм) и самосмазывающиеся покрытия (такие как DLC) фильеры на основе WC еще больше улучшат износостойкость и эффективность.

4.1.2.3 Износостойкие подшипники и уплотнения

Износостойкие подшипники и уплотнения должны выдерживать высокоскоростное вращение и трение при высоких нагрузках. Предпочтительны композитные материалы WC-Ni из-за их коррозионной стойкости и низкого коэффициента трения ($<0,1$). Формула: WC 85%-90%, Ni 10%-15%, и изготавливается методом горячего изостатического прессования (HIP, 1450°C , 150 МПа). Готовый продукт имеет термостойкость $>800^{\circ}\text{C}$ и прочность на сжатие >3800 МПа. Никель имеет лучшую кислото- и щелочестойкость, чем кобальт, и подходит для химических и морских сред. Немецкая компания FAG использует подшипники WC-Ni для высокоскоростных двигателей ($50\,000$ об/мин) с коэффициентом трения $0,08$, сроком службы в 2 раза и рабочей температурой, контролируемой ниже 600°C . Американская компания Flowserve использует в химических насосах уплотнения WC-Ni, которые устойчивы к коррозии H_2SO_4 и могут работать непрерывно более 1 года.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Процесс HIP является ключом к успеху деталей WC-Ni. Он устраняет микропоры посредством высокого давления (100-200 МПа), достигает плотности 99,9% и значительно улучшает износостойкость и усталостную прочность. В будущем оптимизация микроструктуры WC-Ni (например, добавление Cr для улучшения коррозионной стойкости) и интеллектуальный мониторинг (например, встроенные датчики) будут способствовать его применению в экстремальных рабочих условиях.

4.1.3 Применение порошка карбида вольфрама в прецизионных обрабатывающих инструментах

Инструменты для прецизионной обработки предъявляют чрезвычайно высокие требования к размеру частиц, чистоте и точности обработки порошка карбида вольфрама и широко используются в области медицины, оптики и микроэлектроники. Сверхтонкий порошок WC (<1 мкм) и передовая технология спекания (например, HIP) являются его основной опорой.

4.1.3.1 Стоматологические и медицинские инструменты

Дентальные сверла и медицинские инструменты требуют микрообработки (диаметр 0,3–1 мм), а инструменты WC-Co из порошка карбида вольфрама (1–2 мкм) известны своей твердостью HV 1800 и биосовместимостью (ISO 10993-5). После спекания поверхность полируется до Ra < 0,05 мкм, чтобы гарантировать отсутствие раздражения при резке зубной эмали. Дентальное сверло WC-Co (Co 6%) от Komet, Германия, имеет диаметр 0,5 мм, долговечность > 1000 раз в стоматологической хирургии, точность $\pm 0,01$ мм и скорость резания 5000 об/мин. Его успех обусловлен высокой чистотой порошка WC (примеси < 0,02%) и утонченностью процесса полировки. Скальпель WC от компании Dentsply (США) также хорошо зарекомендовал себя в ортопедии, увеличивая срок службы инструмента на 50% при резке костей.

С научной точки зрения биосовместимость WC обусловлена его химической инертностью (нерастворимостью в жидкостях организма), а его мелкие зерна обеспечивают остроту и низкий уровень термического повреждения. В будущем наноразмеры (<100 нм) и антибактериальные покрытия (например, ионы Ag) медицинских инструментов на основе WC еще больше улучшат производительность.

4.1.3.2 Оптическая форма

Оптические формы используются для прессования стеклянных линз и оптических компонентов. Ультратонкий порошок WC (0,2-0,5 мкм) изготавливается методом спекания HIP (1450°C, 200 МПа) с точностью поверхности <10 нм и сроком службы >100 000 раз. Высокая твердость (HV 2000) и низкий коэффициент теплового расширения ($5,2 \times 10^{-6}$ /K) WC гарантируют, что форма не деформируется во время высокотемпературного прессования (>600°C). В сочетании с зеркальной полировкой и покрытием WC (например, CVD-напылением слоя WC толщиной 5 мкм) пресс-

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

форма WC японской компании HOYA имеет выход годных изделий 99,9% при производстве линз для мобильных телефонов, а шероховатость поверхности пресс-формы $Ra < 0,005$ мкм значительно превосходит показатели традиционных стальных пресс-форм ($Ra > 0,02$ мкм).

В области точной оптики успех форм WC также обусловлен их антиадгезионными свойствами, что позволяет избежать проблемы прилипания стекла к форме. Немецкая компания Zeiss использует формы WC для формования инфракрасных линз, и срок службы увеличивается до 150 000 раз, что подчеркивает высокоточный потенциал сверхтонкого WC. В будущем интеллектуализация оптических форм на основе WC (например, контроль температуры в реальном времени) и исследования и разработки композитных материалов (например, WC- TiC) будут способствовать их применению в устройствах AR/VR.

4.2 Применение порошка карбида вольфрама в технологии нанесения покрытий на поверхности

Технология нанесения покрытий на поверхность является еще одной важной областью применения порошка карбида вольфрама. С помощью термического напыления, плазменного напыления, лазерной наплавки и других процессов порошок карбида вольфрама осаждается на поверхности подложки, образуя износостойкий, коррозионно-стойкий и высокотемпературный защитный слой. С момента своего возникновения в середине 20-го века эта технология стала ключевым средством для продления срока службы механических деталей и повышения производительности. По сравнению с общим производством цементированного карбида, технология нанесения покрытий широко распространена за ее гибкость (можно покрывать сложные формы), экономичность (в качестве подложки можно использовать недорогую сталь) и эффективность (локальное укрепление). Применение порошка карбида вольфрама в покрытиях широко используется в аэрокосмических двигателях, инструментах для бурения нефтяных скважин, химическом оборудовании и других областях благодаря его высокой твердости (HV 2000-2500), отличной износостойкости (скорость износа $< 0,01$ мм³/Н·м) и термической стабильности (температура плавления 2870°C). В этом разделе будут объединены научные принципы и промышленные практики из трех аспектов: термическое напыление, плазменное напыление и лазерная наплавка, стойкость к высоким температурам и специальные покрытия, а также подробно рассмотрено, как порошок карбида вольфрама может расширить возможности современной промышленности с помощью технологий поверхностной инженерии.

4.2.1 Применение порошка карбида вольфрама при газотермическом напылении

Технология термического напыления использует высокотемпературное пламя или высокоскоростной поток воздуха для расплавления или полурасплавления порошка карбида вольфрама, а затем распыляет его на поверхность подложки для формирования плотного износостойкого покрытия. С тех пор как первое поколение оборудования для термического напыления было разработано компанией Union Carbide в США в 1940-х годах, технология

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

эволюционировала от простого пламенного напыления до эффективного высокоскоростного кислородно-топливного напыления (HVOF), став основным выбором для авиационной, сельскохозяйственной и энергетической отраслей. Преимущество порошка карбида вольфрама при термическом напылении заключается в его высокой твердости и низкой пористости, что позволяет покрытию оставаться стабильным в суровых рабочих условиях.

4.2.1.1 Высокоскоростное газопламенное напыление

Высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF) является вершиной технологии термического напыления. Оно использует сверхзвуковое пламя (>2000 м/с) для распыления порошка карбида вольфрама на подложку для формирования высокоплотного, малопористого, износостойкого покрытия. Порошок WC-Co (содержание кобальта 10%-12%) является основным материалом для HVOF. Кобальт, как связующая фаза, частично плавится в процессе напыления и обволакивает частицы WC (зерна 1-5 мкм), образуя покрытие с твердостью HV 1200-1400 и скоростью износа $<0,01$ мм³/Н·м. С научной точки зрения высокая температура плавления и стойкость к окислению WC гарантируют, что он не разлагается при высокотемпературном напылении (температура пламени $>3000^{\circ}\text{C}$), а пластичность кобальта снижает внутреннее напряжение покрытия (<200 МПа) и повышает прочность сцепления (>70 МПа).

Эффективность покрытий HVOF обусловлена точным контролем параметров процесса. Соотношение кислорода и топлива (например, керосина) в распылительном пистолете (1:2-1:3) определяет температуру и скорость пламени, скорость частиц порошка достигает 600-800 м/с, а скорость охлаждения составляет $>10^6$ °C/с, что делает пористость покрытия $<1\%$ и толщину контролируемой в диапазоне 100-500 мкм. Данные показывают, что износостойкость покрытий WC-Co более чем в 10 раз выше, чем у непокрытых подложек (например, сталь 45, скорость износа $0,1$ мм³/Н·м), а коррозионная стойкость превышает 1000 часов в испытаниях в солевом тумане.

Лопатки авиационных двигателей являются классическим примером HVOF-напыления. Лопатки двигателей CF6 компании General Electric (GE) в США используют покрытие WC-Co (Co 12%). При газовой очистке (>1200 °C) и пескоструйной обработке срок службы превышает 3000 часов, что в 6 раз больше, чем у непокрытых лопаток (500 часов). Этот успех обусловлен высокой твердостью WC для сопротивления истиранию и прочностью кобальта для смягчения теплового удара. Rolls-Royce в Великобритании также использует покрытие WC-Co HVOF для двигателей серии Trent. Толщина покрытия составляет 250 мкм, твердость — HV 1300, а скорость износа лопаток во время работы составляет $<0,005$ мм/1000 часов, что подчеркивает надежность порошка карбида вольфрама в экстремальных условиях. В будущем технология HVOF будет развиваться в направлении сверхтонкого порошка WC (<1 мкм) и композитных покрытий (таких как WC-Co-Cr) для удовлетворения более высоких требований к износостойкости и коррозионной стойкости.

4.2.1.2 Газопламенное напыление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Газопламенное напыление — традиционный процесс термического напыления. Он использует кислородно-ацетиленовое пламя (температура около 3000 °C) для расплавления порошка карбида вольфрама и последующего распыления его на подложку. Подходит для недорогих износостойких покрытий. Порошок WC-Ni (содержание никеля 10%-15%) является распространенным выбором, поскольку никель стоит дешевле кобальта и имеет более высокую коррозионную стойкость. В процессе напыления частицы WC (5-10 мкм) частично расплавляются, а никель полностью разжижается, образуя покрытие с прочностью сцепления >50 МПа и толщиной 100-300 мкм. Твердость покрытия составляет HV 900-1100, что ниже, чем у HVOF, но достаточно для работы в условиях умеренного износа.

Преимуществами пламенного напыления являются простота оборудования (стоимость < 100 000 юаней) и гибкая эксплуатация, которая подходит для малых и средних предприятий. Параметры распыления, такие как поток кислорода (20-30 л/мин) и скорость подачи порошка (50-80 г/мин), определяют качество покрытия. Пористость обычно составляет 5%-10%, что немного выше, чем у HVOF (<1%). Эксплуатационные испытания показывают, что износостойкость покрытия WC-Ni в 3-5 раз выше, чем у подложки (например, стали Q235), что подходит для низкоскоростных сценариев с высоким трением, таких как сельскохозяйственная техника.

Лезвия сельскохозяйственной техники являются типичным применением пламенного напыления. John Deere из США наносит покрытие WC-Ni (Ni 12%) на лезвия комбайнов толщиной 200 мкм, что увеличивает износостойкость в 4 раза и продлевает срок службы за один сезон с 500 до 2000 часов. Это улучшение обусловлено высокой твердостью WC и стойкостью к окислению никеля (>600 °C), который эффективно противостоит истиранию почвой и растительными остатками. Некий завод сельскохозяйственной техники в Шаньдуне, Китай, также использует аналогичную технологию для распыления лезвий тракторных плугов, что увеличивает стоимость на 20 юаней за штуку, но продлевает срок службы в 3 раза, при этом значительно снижая затраты. В будущем пламенное напыление может улучшить плотность и коррозионную стойкость покрытия путем очистки порошка WC (<5 мкм) и добавления Cr (1% -2%).

4.2.2 Применение порошка карбида вольфрама при плазменном напылении и лазерной наплавке

Плазменное напыление и лазерная наплавка представляют собой высокотехнологичное направление технологии покрытия поверхности, использующее высокотемпературную плазму или лазерный луч для осаждения порошка карбида вольфрама на подложку для формирования высокопроизводительного покрытия. Эти две технологии имеют свои собственные преимущества в стойкости к высокотемпературной коррозии и локальном упрочнении.

4.2.2.1 Плазменное напыление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Плазменное напыление использует плазменную дугу (температура >15000 °C) для расплавления порошка карбида вольфрама и распыления его на подложку, что подходит для высокотемпературных коррозионно-стойких покрытий. Композитный порошок WC-Cr₃C₂ (WC 70%-80%, Cr₃C₂ 20%-30%) является распространенной формулой. Добавление Cr₃C₂ улучшает стойкость к окислению (>1000 °C) и коррозионную стойкость. В процессе напыления частицы порошка (10-20 мкм) полностью расплавляются в потоке плазмы со скоростью 300-500 м/с, образуя покрытие с пористостью <2% и толщиной 200-600 мкм. Твердость покрытия составляет HV 1000-1200, а температура стойкости к окислению достигает 1100°C, что значительно выше, чем у одинарного покрытия WC (<900°C).

Научная основа плазменного напыления заключается в высокой плотности энергии высокотемпературной плазмы, которая позволяет WC и Cr₃C₂ образовывать однородную композитную структуру. Такие параметры процесса, как расход аргона (40-50 л/мин) и мощность (30-40 кВт), определяют степень расплавления и эффективность осаждения. Эксплуатационные испытания показывают, что износостойкость покрытия WC-Cr₃C₂ в 8 раз выше, чем у подложки, а коррозионная стойкость испытания в соляном тумане составляет >1500 часов.

Лопатки газовых турбин являются типичным примером применения плазменного напыления. Компания Pratt & Whitney в США использует покрытия WC-Cr₃C₂ на лопатках двигателя F135 толщиной 300 мкм, рабочей температурой 1200 °C и сроком службы >5000 часов, что в 5 раз больше, чем у лопаток без покрытия (1000 часов). Компания Siemens в Германии также использует аналогичные покрытия в газовых турбинах. Синергетический эффект стойкости к окислению и износостойкости позволяет лопаткам оставаться стабильными при высокотемпературной газовой очистке. В будущем плазменное напыление может дополнительно улучшить производительность за счет добавления Ni (5%-10%) или оптимизации параметров напыления для снижения пористости (<1%).

4.2.2.2 Лазерная наплавка

Лазерная наплавка использует высокоэнергетический лазерный луч (мощность 2-10 кВт) для расплавления порошка карбида вольфрама и нанесения его на подложку для формирования толстого покрытия с высокой твердостью, которое особенно подходит для поверхностного упрочнения крупных компонентов, таких как инструменты для бурения нефтяных скважин. Порошок WC (зерно 5-15 мкм) непосредственно впрыскивается в расплавленную ванну лазера и металлургически связывается с подложкой (например, сталью 42CrMo). Толщина покрытия составляет 0,5-2 мм, а твердость - HV 1300. Лазерная наплавка имеет низкий подвод тепла (<200 Дж/мм²), зону термического влияния подложки (ЗТВ) <0,1 мм, пористость покрытия <0,5% и прочность сцепления >100 МПа, что значительно превышает термическое напыление (50-70 МПа).

В принципе, высокая плотность энергии лазера (>10⁶ Вт/см²) заставляет частицы WC быстро плавиться и образовывать слой сплава с подложкой. Высокая твердость WC и прочность

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

подложки работают вместе. Такие параметры процесса, как мощность лазера (4 кВт), скорость сканирования (5-10 мм/с) и скорость подачи порошка (20-40 г/мин) определяют качество покрытия. Эксплуатационные испытания показывают, что износостойкость слоя покрытия WC в 15 раз выше, чем у подложки, а коррозионная стойкость составляет более 2 лет в 10% растворе NaCl.

Глубоководная бурильная труба является типичным примером лазерной наплавки. Компания Halliburton, США, наносит на поверхность бурильной трубы покрытие WC (толщиной 1,5 мм), которое эксплуатируется более 2 лет в глубоководной морской среде с соленой водой на глубине 5000 метров, с износом менее 0,02 мм и коррозионной стойкостью в 10 раз выше, чем у непокрытой бурильной трубы. China Petroleum также использует похожую технологию для укрепления буровых инструментов с твердостью HV 1350 и ударопрочностью >30 Дж/см², чтобы удовлетворить потребности добычи нефти и газа из глубоких пластов. В будущем лазерная наплавка может улучшить толщину и однородность покрытия с помощью композитного порошка WC-Ni и технологии многопроходной наплавки.

4.2.3 Применение порошка карбида вольфрама в высокотемпературных и специальных покрытиях

Высокая термостойкость и специальные покрытия Для экстремальных условий, таких как высокотемпературные формы и химическое оборудование, порошок карбида вольфрама должен обладать термостойкостью, коррозионной стойкостью и стойкостью к тепловым ударам в таких применениях.

4.2.3.1 Покрытие, устойчивое к термическому удару

Термостойкие покрытия используются для высокотемпературных форм и оборудования для горячей обработки. Покрытия на основе WC известны своим низким коэффициентом теплового расширения ($<5 \times 10^{-6}$ /°C) и термостойкостью ($>1200^\circ\text{C}$). Композитный порошок WC- TiC -Ni (WC 70%, TiC 20%, Ni 10%) изготавливается методом HVOF или плазменного напыления с твердостью покрытия HV 1100-1300 и толщиной 200-400 мкм . Добавление TiC улучшает высокотемпературную твердость ($>1000^\circ\text{C}$ по-прежнему сохраняет HV >1000), а Ni повышает стойкость к термической усталости. Во время процесса скорость напыления (500-700 м/с) и скорость охлаждения ($>10^{-5}$ °C/с) гарантируют, что внутреннее напряжение покрытия составляет <150 МПа.

Высокотемпературные формы являются основным применением термостойких покрытий. Toyota Motors в Японии использует покрытия WC- TiC -Ni для форм для литья под давлением из алюминиевого сплава. Температура формы составляет 800-1000 °C, цикл термоудара составляет >5000 раз, а срок службы увеличивается в 3 раза. ThyssenKrupp в Германии также использует аналогичные покрытия в стальных пластинчатых горячештамповочных формах,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

которые устойчивы к температурам 1200 °C и имеют лучшую трещиностойкость, чем традиционные покрытия Cr. В будущем многофазные композиты (например, добавление Al_2O_3) и конструкции градиентной структуры покрытий на основе WC еще больше улучшат термостойкость.

4.2.3.2 Химически стойкое покрытие

Химические коррозионно-стойкие покрытия используются для химических трубопроводов и клапанов. Покрытие WC-CoCr (WC 80%, Co 10%, Cr 10%) привлекло внимание своей превосходной коррозионной стойкостью. Полученное методом HVOF-напыления, покрытие имеет твердость HV 1200 и толщину 150-300 мкм. Добавление Cr образует пассивирующий слой Cr_2O_3 , а кислотостойкость (pH <2) увеличивается в 5 раз. Эксплуатационные испытания показывают, что скорость коррозии покрытия WC-CoCr в 10% растворе H_2SO_4 составляет <0,001 мм/год, а стойкость к окислению >900 °C.

Химические клапаны являются типичным применением. Американская компания Emerson использует покрытие WC-CoCr на клапанах трубопроводов сернистого природного газа. После трех лет эксплуатации износ и коррозия составляют менее 0,01 мм, а срок службы в три раза больше, чем у клапанов без покрытия (<1 года). Химический завод в Китае также использует покрытие WC-CoCr на клапанах насосов серной кислоты, и коррозионная стойкость превышает 4 года в 20% H_2SO_4 . В будущем химическая коррозионная стойкость покрытия WC-CoCr может быть дополнительно улучшена путем добавления Mo (5%-10%) или оптимизации процесса напыления (например, холодного напыления).

4.3 Применение порошка карбида вольфрама в горнодобывающем и строительном инструменте

Инструменты для горнодобывающей промышленности и строительства являются важными областями применения порошка карбида вольфрама. Его высокая твердость (HV 2000-2500), отличная износостойкость (скорость износа <0,01 мм³ / Н · м) и ударопрочность (>25 Дж/см²) делают его основным материалом для оборудования для бурения горных пород, строительства туннелей и дробления. С тех пор как в горнодобывающей промышленности в конце 19 века начали использовать цементированный карбид, порошок карбида вольфрама постепенно заменил традиционную сталь и стал «оружием» для современных проектов в горнодобывающей промышленности и строительстве. От буровых коронок до щитовых резцов и молотков дробилок порошок карбида вольфрама значительно улучшил срок службы и эффективность инструментов с помощью порошковой металлургии, инкрустации или композитной технологии, особенно в сценариях с высокими нагрузками, таких как добыча твердых пород, строительство туннелей метро и переработка руды. В этом разделе будут объединены научные принципы и промышленные практики из трех аспектов: инструменты для бурения горных пород, щитовые резцы и оборудование для проходки тоннелей, а также износостойкие футеровки и дробильное

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

оборудование, чтобы глубоко изучить ключевую роль порошка карбида вольфрама в области горнодобывающей промышленности и строительства.

4.3.1 Применение порошка карбида вольфрама в буровом инструменте

Инструменты для бурения горных пород используются для бурения и взрывных работ. Твердосплавные коронки из порошка карбида вольфрама стали первым выбором для добычи твердых пород и угля благодаря своей высокой твердости и ударопрочности. С тех пор как шведская компания Sandvik в начале 20 века представила карбид на основе WC в области бурения горных пород, технология развилась от простых инкрустированных буровых коронок до композитных армированных инструментов и широко используется в шахтах, туннелях и при разведке нефти и газа.

4.3.1.1 Буровые коронки для твердых пород

Буровые коронки для твердых пород используются для добычи высокотвердых пород, таких как гранит и кварцит. Порошок карбида вольфрама внедряется в стальную матрицу с помощью технологии инкрустации для формирования буровых коронок с инкрустацией WC. Типичная формула - WC-Co (Co 8% -12%), с размером зерна 3-5 мкм, приготовленная вакуумным спеканием (1450 °C, 10^{-2} Па), твердостью HV 1400-1600 и ударной вязкостью >25 Дж/см². Высокая твердость WC противостоит истиранию горных пород, а прочность кобальта поглощает ударную нагрузку (>500 кН) во время бурения. Конструкция буровой коронки в основном принимает структуру шарового зуба или столбчатого зуба, а диаметр инкрустации WC составляет 5-15 мм для обеспечения эффективности резки и долговечности. Данные показывают, что скорость сверления сверлами с инкрустацией WC может достигать 12–15 м/ч, что в 2–3 раза выше, чем у традиционных стальных сверл (<5 м/ч).

С научной точки зрения, гексагональная структура WC ($a=2,906 \text{ \AA}$, $c=2,837 \text{ \AA}$) и высокая температура плавления (2870 °C) делают его устойчивым к высокоскоростному удару (>1000 раз/мин) и высокотемпературному трению (>600 °C). С точки зрения технологии, оптимизация температуры и давления спекания (30 МПа) позволяет WC и кобальту образовывать однородную микроструктуру с прочностью границ зерен >4000 МПа, избегая риска сколов. Эксплуатационные испытания показывают, что срок службы сверл с внедренным WC превышает 1000 метров глубины бурения в граните, а скорость износа составляет $<0,005$ мм/м.

Бурение подрывом в горнодобывающей промышленности является типичным примером буровых коронок для твердых пород. Буровая коронка WC-Co (Co 10%) шведской компании Atlas Copco имеет диаметр бурения 50 мм, скорость бурения 13 м/ч, срок службы одной буровой коронки 1200 метров и повышение эффективности взрывных работ на 40% в норвежской гранитной шахте. На шахте в Гуйчжоу, Китай, также используются аналогичные буровые коронки с инкрустацией WC, срок службы которых составляет 1500 метров при добыче известняка, что в 5 раз превышает срок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

службы стальных буровых коронок (300 метров). В будущем буровые коронки с инкрустацией WC могут дополнительно улучшить износостойкость и сопротивление термической усталости за счет сверхмелких зерен ($<1\text{ мкм}$) и покрытий TiC (CVD, 5 мкм) для адаптации к более сложным твердым породам.

4.3.1.2 Инструменты для бурения угольных пластов

Инструменты для бурения угольных пластов используются для добычи угля и газа. Режущие головки WC-Co хорошо работают в мягких и твердых чередующихся угольных пластах благодаря своей износостойкости и ударопрочности. Формула: WC 90% -94%, Co 6% -10%, размер зерна 1-3 мкм, изготовлены методом горячего прессования спеканием ($1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 50 МПа), твердость HV 1500, износостойкость $<0,002\text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$. Высокая твердость WC справляется с истиранием пустой породы в угольном пласте, а пластичность кобальта поглощает удары при выемке ($>15\text{ Дж/см}^2$). Для повышения производительности была внедрена технология композитного усиления WC- TiC, а TiC (5% -10%) увеличил высокотемпературную твердость ($>800\text{ }^{\circ}\text{C}$ по-прежнему сохраняет HV >1200) и продлил срок службы режущей головки.

Инструменты для бурения угольных пластов должны иметь дело с низкой твердостью угольной породы (по шкале Мооса 2-4) и локальной высокой твердостью пустой породы (по шкале Мооса 6-7). Композитная структура режущей головки WC-Co- TiC идеально сочетает износостойкость и прочность. С точки зрения технологии, высокое давление горячего прессования спекания обеспечивает плотность режущей головки $>99,5\%$ и пористость $<0,5\%$, обеспечивая стабильность резки. Эксплуатационные испытания показывают, что износостойкость режущей головки WC- TiC на 30% выше, чем у одинарного WC-Co, а скорость резки угольной породы достигает 8-10 м/ч.

Проходческая машина на угольной шахте в Шаньси, Китай, использует режущую головку WC-Co- TiC (Co 8%, TiC 5%), которая может непрерывно выкапывать 2000 метров в угольном пласте, содержащем пустую породу, с износом режущей головки $<0,01\text{ мм}$ и повышением эффективности выемки на 25%. Буровые инструменты для угольных пластов ВНР в Австралии также используют похожую технологию со скоростью бурения 9 м/ч в угольных пластах с высоким содержанием газа и сроком службы 2500 метров. В будущем буровые инструменты для угольных пластов на основе WC могут быть оптимизированы с помощью нанопорошка WC ($<100\text{ нм}$) и поверхностных покрытий (таких как CrN) для дальнейшего повышения износостойкости и коррозионной стойкости.

4.3.2 Применение порошка карбида вольфрама в щитовых инструментах и тоннелепроходческом оборудовании

Щитовые инструменты и оборудование для проходки тоннелей используются в туннелях и подземных проектах. Инструменты из порошка карбида вольфрама демонстрируют

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сверхвысокую износостойкость и режущую способность в песчанике, базальте и других слоях. С тех пор как Япония впервые внедрила цементированный карбид в щитовые машины в 1960-х годах, инструменты на основе WC стали ключевыми для строительства городских метро и горных туннелей.

4.3.2.1 Режущая головка щита метро

Режущая головка subway shield используется для выемки грунта в песчанике, глине и других слоях. Резцы на основе WC стали стандартными из-за их высокой износостойкости и длительного срока службы. Формула WC-Co (Co 10%-15%) с размером зерна 2-5 мкм, изготовлены методом горячего изостатического прессования (HIP, 1450°C, 150 МПа), твердостью HV 1400-1600 и сроком службы резания >6000 метров. Высокая твердость WC противостоит истиранию песчаника (по шкале Мооса 5-6), а прочность кобальта смягчает вибрацию режущей головки (>10 Гц). Формы резцов включают червячные фрезы и скребки, а толщина режущей головки WC составляет 10-20 мм, что обеспечивает глубину резания и стабильность. Данные показывают, что износостойкость фрез WC-Co в 2-3 раза выше, чем у стальных фрез, а скорость резания достигает 50-80 мм/мин.

Щитовая режущая головка должна работать под высоким давлением воды (>5 бар) и промывкой шламом. Высокая плотность (>14,5 г/см³) и коррозионная стойкость (испытание солевым туманом >1000 часов) WC являются ее преимуществами. Высокое давление уплотнения процесса HIP делает пористость инструмента <0,2% и вязкость разрушения >12 МПа·м^{1/2}. В этом случае на линии метрополитена Пекина 14 в Китае используются шарошки WC-Co (Co 12%), которые были выкопаны на 6500 метров в песчаниковых пластах. Цикл замены превышает 1 год, что в 4 раза больше, чем у стальных резаков (3 месяца). Щитовая машина метро Токио в Японии также использует аналогичные резаки WC, срок службы которых составляет 7000 метров при резке песчаника и гравия, что подчеркивает высокую эффективность порошка карбида вольфрама. В будущем защитные резцы на основе WC можно будет оптимизировать с помощью композитных покрытий (например, TiAlN) и интеллектуального мониторинга для адаптации к более сложным пластам.

4.3.2.2 Туннелепроходческий резак для твердых грунтов

Твердые туннельные фрезы используются в базальте, граните и других породах (твердость по Моосу 7-8). Фрезы WC- TiC отличаются прочностью и устойчивостью к трещинам. Формула: WC 80% -85%, TiC 10% -15%, Co 5% -10%, размер зерна 1-3 мкм, и изготавливаются путем оптимизированного спекания (1450 °C, 100 МПа) сверхтвердого порошка WC (FSSS<1 мкм), твердость HV 1600-1800, вязкость разрушения >15 МПа·м^{1/2}. Добавление TiC улучшает высокотемпературную твердость (>1000 °C по-прежнему сохраняет HV>1400), а высокая твердость WC справляется с резкой твердых пород.

см²) и высокая температура (>800°C) твердых образований предъявляют жесткие требования к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

режущим инструментам. Композитная структура WC- TiC достигает синергетического эффекта за счет термической стабильности TiC и износостойкости WC. Оптимизация спекания обеспечивает однородность зерна $RSD < 5\%$ и плотность инструмента $> 99,8\%$. Эксплуатационные испытания показывают, что срок службы режущих инструментов WC- TiC в базальте составляет 5000 метров, а износостойкость на 50% выше, чем у одного WC-Co.

Машина для бурения тоннеля в железнодорожном туннеле в Швейцарских Альпах использовала инструменты WC- TiC (TiC 12%), выкопанных на глубине 5500 метров в базальтовых пластах, со скоростью резания 40 мм/мин, а цикл замены инструмента был продлен до 10 месяцев. Аналогичные инструменты также использовались в проекте двухпутной железной дороги Чэнду-Куньмин в Китае, со сроком службы 6000 метров при выемке гранита и сопротивлением излому $16 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. В будущем долговечность инструментов WC- TiC может быть дополнительно улучшена за счет нанозерен ($< 100 \text{ нм}$) и технологии лазерной поверхностной закалки.

4.3.3 Применение порошка карбида вольфрама в износостойкой футеровке и дробильном оборудовании

Износостойкие футеровки и дробильное оборудование используются для измельчения и дробления руды. Компоненты, армированные порошком карбида вольфрама, стали основой горнодобывающей обработки благодаря своей сверхнизкой скорости износа и длительному сроку службы.

4.3.3.1 Футеровка шаровой мельницы

Шаровые мельницы используются для измельчения руды. Армированные футеровки WC повышают износостойкость за счет инкрустации или композитной технологии. Формула WC-Co (Co 8%-12%), размер зерна 3-5 мкм, изготовлены методом горячего прессования спеканием (1450°C , 40 МПа), твердость HV 1400, скорость износа $< 0,05 \text{ г/т}$ (грамм на тонну руды). Высокая твердость WC противостоит ударам руды и истиранию, а прочность кобальта поглощает вибрацию шаровой мельницы ($> 15 \text{ Гц}$). Толщина футеровки составляет 20-50 мм, а шероховатость поверхности $Ra < 0,1 \text{ мкм}$ обеспечивает эффективность измельчения.

Среда мокрого помола (водная суспензия) и высокая нагрузка ($> 100 \text{ т/ч}$) шаровой мельницы требуют чрезвычайно высокой прочности футеровки. Плотность армированной футеровки WC составляет $> 14,8 \text{ г/см}^3$, а коррозионная стойкость — > 500 часов. В этом случае BHP Iron Ore в Австралии использует футеровку WC-Co (Co 10%), которая имеет срок службы более 2 лет при измельчении гематита, скорость износа $0,04 \text{ г/т}$ и повышение эффективности на 30%. Китайская Baosteel Group также использует аналогичные футеровки, которые имеют срок службы 2,5 года при обработке магнетита, что в 5 раз превышает срок службы футеровок из марганцевой стали (6 месяцев). В будущем коррозионная стойкость и срок службы футеровок WC могут быть улучшены за счет добавления Cr (5%-10%) и технологии азотирования поверхности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3.3.2 Дробильный молоток

Дробильные молоты используются для дробления известняка, пустой породы и других материалов. Молотки WC-Co славятся своей износостойкостью и ударопрочностью. Формула: WC 88% -92%, Co 8% -12%, размер зерна 2-4 мкм, изготовлены методом вакуумного спекания (1450 °C, 10^{-2} Па), твердость HV 1500, ударная прочность >100 000 раз. Высокая твердость WC противостоит истиранию материала, а прочность кобальта поглощает энергию молота (>30 Дж/см²). Вес молота составляет 5-20 кг, а толщина слоя WC составляет 10-15 мм, что обеспечивает эффективность дробления.

Высокая скорость вращения (>1000 об/мин) и ударная нагрузка (>500 кН) дробилки предъявляют строгие требования к головке молота. Микроструктурная однородность (Span<1,5) и высокая плотность (>14,7 г/см³) WC-Co являются его преимуществами. В этом случае головка молота WC-Co (Co 10%) компании Hazemag в Германии имеет срок службы 120 000 раз при дроблении известняка, а износ составляет <0,02 мм/10 000 раз. Цементный завод в Шаньдуне, Китай, также использует аналогичную головку молота, которая имеет срок службы 150 000 раз при дроблении известняка и увеличение эффективности на 40%. В будущем усталостная прочность головки молота WC-Co может быть дополнительно улучшена за счет композитного усиления (например, WC- TiC -Ni) и оптимизации термообработки.

4.4 Применение порошка карбида вольфрама в электронике и энергетике

Порошок (WC) в области электроники и энергетики продемонстрировал свою универсальность, которая выходит за рамки традиционных цементированных карбидов и износостойких покрытий. В конце 20-го века, с появлением новых энергетических технологий (таких как топливные элементы, литиевые батареи) и электронных устройств (таких как суперконденсаторы, светодиодное рассеивание тепла), WC привлек внимание благодаря своей превосходной электропроводности (сопротивление <10⁻⁵ Ом·см), химической стабильности (стойкость к кислотной и щелочной коррозии) и теплопроводности (>120 Вт/м·К). От проводящих покрытий до носителей катализаторов, хранения энергии и терморегулирования, порошок карбида вольфрама играет ключевую роль в этих высокотехнологичных областях. В этом разделе будут объединены научные принципы и промышленные практики из трех аспектов: проводящие покрытия и электродные материалы, носители катализаторов, а также хранение энергии и терморегулирование, чтобы глубоко изучить, как порошок WC может помочь инновациям в электронной и энергетической промышленности.

4.4.1 Применение порошка карбида вольфрама в токопроводящих покрытиях и электродных материалах

Применение порошка карбида вольфрама в токопроводящих покрытиях и электродных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материалах позволяет использовать его высокую проводимость и химическую инертность, что делает его важным компонентом энергетических устройств, таких как топливные элементы и литиевые батареи.

4.4.1.1 Электроды топливных элементов

Топливные элементы с протонообменной мембраной (PEMFC) являются основной технологией чистой энергии. Порошок карбида вольфрама используется в качестве материала электрода из-за его превосходной проводимости и коррозионной стойкости. Порошок WC (зерно <1 мкм) готовится методом физического осаждения из паровой фазы (PVD) для получения тонких пленок толщиной 5-10 мкм, удельным сопротивлением <10⁻⁵ Ом·см и циклической стабильностью >10 000 раз. По сравнению с традиционными носителями на основе углерода (такими как Vulcan XC-72, удельное сопротивление 10⁻³ Ом·см), высокая проводимость WC обусловлена его двойными металл-керамическими свойствами: d-электроны атомов вольфрама обеспечивают свободные электроны, а ковалентные связи атомов углерода повышают структурную стабильность.

Процесс PVD использует высокоэнергетические ионы для бомбардировки WC-мишеней (мощность 2-5 кВт, вакуум 10⁻⁴ Па) для осаждения однородных пленок с адгезией >30 Н/см и пористостью <1%. Эксплуатационные испытания показывают, что коррозионная стойкость WC-электродов в кислых средах (pH <1) в 5 раз выше, чем у углерода, а электрохимическая стабильность превышает 10 000 циклов в 0,5 МН₂ SO₄. Ballard Power Systems в Канаде использует тонкопленочные электроды WC для водородных топливных элементов с плотностью мощности 1,2 Вт/см² и сроком службы 8 000 часов, что на 60% выше, чем у электродов на основе углерода (5 000 часов). Исследования Университета Цинхуа в Китае также показывают, что каталитическая активность электродов WC в PEMFC близка к активности Pt/C (>90%), но стоимость снижается на 50%. В будущем применение композитных электродов WC-Pt (нагрузка Pt <0,1 мг/см²) и нанопорошка WC (<50 нм) еще больше повысит экономическую эффективность.

4.4.1.2 Токосъемник литиевой батареи

Токосъемники литиевых батарей должны учитывать как проводимость, так и коррозионную стойкость. Покрытия WC наносятся на поверхность алюминиевой фольги методом плазменного напыления или PVD, что значительно улучшает ее эксплуатационные характеристики. Покрытие из порошка WC (размер зерна 0,5-2 мкм) имеет толщину 10-20 мкм, адгезию >20 Н/см и коррозионную стойкость, которая в 2 раза выше, чем у чистой алюминиевой фольги. Химическая инертность (отсутствие реакции с электролитом) и проводимость (удельное сопротивление <10⁻⁵ Ом·см) WC делают его стабильным при высоком напряжении (>4,5 В) и циклическом заряде и разряде. С точки зрения технологии плазменное напыление (мощность 30 кВт, аргон 50 л/мин) обеспечивает однородность покрытия при пористости <2%, а PVD обеспечивает более высокую точность (отклонение толщины <1 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тесты производительности показывают, что ток коррозии алюминиевой фольги с покрытием WC в электролите LiPF_6 составляет $<10^{-6}$ А/см², а уровень сохранения емкости составляет $>90\%$ после 1000 циклов, что намного превышает показатель непокрытой алюминиевой фольги ($<70\%$). Аккумуляторы электромобилей являются его типичным применением. Tesla Inc. в Соединенных Штатах использует токосъемники с покрытием WC для 21700 аккумуляторов, и уровень сохранения емкости по-прежнему составляет $>90\%$ после 1500 циклов, что продлевает срок службы аккумулятора до 5 лет. Батарея Blade компании BYD в Китае также использует похожую технологию с твердостью покрытия HV 1200 и улучшением долговечности на 40%. В будущем композитные покрытия WC-Co и сверхтонкие пленки WC (<5 мкм) будут способствовать разработке аккумуляторов с высокой плотностью энергии.

4.4.2 Применение порошка карбида вольфрама в носителе катализатора

В качестве носителя катализатора порошок WC продемонстрировал потенциал в водородном топливе и химическом катализе благодаря своей высокой удельной площади поверхности (>50 м²/г) и химической стабильности.

4.4.2.1 Катализ водородного топлива

Порошок Nano WC (<50 нм) используется в качестве носителя катализатора при производстве водорода электролизом воды, заменяя дорогой Pt/C (платиновый углерод). Высокая проводимость и кислотостойкость (pH <1) WC делают его идеальным субстратом. Pt ($0,05$ - $0,2$ мг/см²) загружается путем химического восстановления для образования композитного катализатора WC-Pt. Nano WC получают путем плазменного восстановления (мощность 10 кВт, атмосфера H₂), с удельной площадью поверхности 80 м²/г и пористостью $>30\%$. Испытания каталитической активности показывают, что перенапряжение выделения водорода WC-Pt в 0,5 МН₂SO₄ составляет <50 мВ, активность составляет $>95\%$ (близко к Pt/C), а стоимость снижается на 70%.

В принципе, атомы W на поверхности WC имеют электронную структуру, подобную Pt (центр d-зоны близок к уровню Ферми), что способствует осаждению H₂, в то время как наноразмер увеличивает плотность активных центров ($> 10^{18}$ / см²). Институт Фраунгофера в Германии использует катализаторы WC-Pt в электролизерах PEM с плотностью тока 2 А/см² и сроком службы >8000 часов. Исследования Китайской академии наук также показывают, что стабильность WC-Pt в щелочном электролизе (1 М КОН) увеличивается в 3 раза. В будущем композитные носители WC-Ni и технология загрузки одноатомной Pt еще больше оптимизируют каталитическую эффективность.

4.4.2.2 Химический катализ

Носители на основе WC привлекли внимание своей высокой температурной стабильностью (>600 °C) и долговечностью в синтезе аммиака (процесс Габера-Боша). Порошок WC (размер

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

зерна 1-3 мкм) получают путем высокотемпературного спекания (1600 °C, атмосфера N₂) для получения носителей с удельной площадью поверхности 20-30 м²/г и наполняют катализатором Fe или Ru (5%-10%). Высокая температура плавления (2870 °C) и стойкость к окислению WC гарантируют, что он не разлагается под высоким давлением (>100 бар) и высокой температурой, а срок службы составляет >5000 часов. Эксплуатационные испытания показывают, что выход аммиака катализатора WC-Fe при 500 °C достигает 15 ммоль/г·ч, а стабильность в 2 раза выше, чем у носителей на основе углерода.

Компания DuPont в США использует носители WC-Ru для синтеза аммиака с рабочей температурой 600°C, сроком службы катализатора 6000 часов и увеличением выхода на 20%. Носитель WC-Fe из Нанкинского университета химических технологий в Китае также проходит промышленные испытания с температурной стойкостью 650°C и 50%-ным увеличением противоотравляющей способности (H₂S < 100 ppm). В будущем наноразмеры (<100 нм) и пористая структура носителей на основе WC улучшат каталитическую эффективность и устойчивость к сере.

4.4.3 Применение порошка карбида вольфрама в системах хранения энергии и терморегулирования

Применение порошка WC в системах хранения энергии и терморегулирования, основанное на его высокой удельной емкости и теплопроводности, способствовало развитию технологий рассеивания тепла в суперконденсаторах и светодиодах.

4.4.3.1 Суперконденсатор

Электродные материалы на основе WC известны своей высокой удельной емкостью (>250 Ф/г) и длительным сроком службы (>8000 раз) в суперконденсаторах. Нано-WC порошок (<100 нм) получают методом химического осаждения из паровой фазы (CVD, 800°C, CH₄ + H₂), с удельной площадью поверхности >60 м²/г и пористостью >40%. Высокая проводимость (сопротивление <10⁻⁵ Ом·см) и псевдоемкостные характеристики (поверхностная окислительно-восстановительная реакция) WC делают его удельную емкость намного превосходящей таковую у материалов на основе углерода (<150 Ф/г). С точки зрения технологии CVD обеспечивает равномерное осаждение частиц WC, толщину электрода 50-100 мкм и циклическую стабильность >8000 раз.

В новой системе хранения энергии компания Maxwell из США использует электроды WC для суперконденсаторов с плотностью мощности 10 кВт/кг и сроком службы 10 000 циклов, что применяется для сглаживания ветровой энергии. Конденсатор на основе WC компании из Шэньчжэня, Китай, имеет удельную емкость 280 Ф/г и увеличение плотности энергии на 30%. В будущем композитные электроды WC-Co и пористые конструкции WC будут способствовать более мощным приложениям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.4.3.2 Покрытия для терморегулирования

Теплоотводящее покрытие WC повышает эффективность терморегулирования в светодиодах и электронных устройствах с высокой теплопроводностью (>120 Вт/м·К). Порошок WC (1-5 мкм) изготавливается методом HVOF-напыления, толщина покрытия составляет 50-150 мкм, а теплопроводность на 20% выше, чем у алюминия (100 Вт/м·К). Низкий коэффициент теплового расширения WC ($5,2 \times 10^{-6}$ /К) гарантирует, что покрытие не деформируется при высоких температурах (>200 °C). Такие параметры процесса, как скорость распыления (700 м/с) и поток кислорода (30 л/мин), оптимизируют плотность покрытия ($>99\%$).

Philips из Нидерландов использует покрытие WC для мощных светодиодов, что повышает эффективность рассеивания тепла на 25% и продлевает срок службы до $>50\,000$ часов. Светодиоды Cree из Китая также используют похожую технологию с теплопроводностью 130 Вт/м·К и снижением рабочей температуры на 10°C. В будущем композитные покрытия WC-графен и сверхтонкие пленки WC (<10 мкм) еще больше улучшат характеристики терморегулирования.

4.5 Применение порошка карбида вольфрама в аэрокосмической и военной промышленности

В аэрокосмической и военной областях предъявляются чрезвычайно строгие требования к материалам. Порошок карбида вольфрама стал идеальным выбором для лопаток турбин, брони и компонентов космических аппаратов благодаря своей высокой твердости (>2200 HV), высокой термостойкости (>1300 °C) и ударопрочности (>1200 м/с). С тех пор как цементированный карбид на основе WC использовался в танковой броне во время Второй мировой войны, его применение расширилось до современных авиационных двигателей и аэрокосмической техники. В этом разделе обсуждается применение порошка WC в экстремальных условиях с трех сторон: лопатки и сопла турбин, материалы брони и износостойкие детали космических аппаратов.

4.5.1 Применение порошка карбида вольфрама в лопатках и соплах турбин

Покрытия и композиты на основе WC известны своей износостойкостью и термостойкостью в высокотемпературных компонентах аэрокосмической техники.

4.5.1.1 Лопатки авиационных двигателей

Лопатки авиационных двигателей должны выдерживать высокотемпературные газообразные продукты сгорания (>1300 °C) и абразивное воздействие песка. Покрытия WC-Co изготавливаются методом HVOF-напыления (Co 10%-15%) с толщиной 200-400 мкм, твердостью HV 1200-1400 и термостойкостью >1300 °C. Высокая температура плавления и стойкость к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

окислению WC противостоят эрозии газообразных продуктов сгорания, а прочность кобальта смягчает тепловой удар ($>10^5$ циклов). С точки зрения технологии сверхзвуковая струя HVOF (>2000 м/с) гарантирует, что покрытие имеет пористость $<1\%$ и прочность сцепления >80 МПа.

Лопатки двигателя GE9x компании GE в США используют покрытия WC-Co со сроком службы >4000 часов, повышением эффективности тяги на 5% и скоростью износа $<0,005$ мм/1000 часов. Trent XWB компании Rolls-Royce в Великобритании также использует похожее покрытие с температурной стойкостью 1350°C и повышением эксплуатационной стабильности на 30% . В будущем композитные покрытия WC-Cr и сверхтонкий порошок WC (<1 мкм) еще больше улучшат термостойкость.

4.5.1.2 Сопло ракеты

Сопла твердотопливных ракет должны выдерживать высокотемпературную абляцию ($>3000^\circ\text{C}$). Термостойкие покрытия на основе WC изготавливаются методом плазменного напыления толщиной $0,5-1$ мм и сопротивлением абляции $<0,01$ мм/с. Порошок WC ($5-10$ мкм) смешивается с Ni ($10\%-15\%$), твердость покрытия составляет HV 1100, а термостойкость $>2000^\circ\text{C}$. Высокая температура ($>15000^\circ\text{C}$) и быстрое охлаждение ($>10^6^\circ\text{C}/\text{с}$) плазменного напыления образуют плотную структуру с стойкостью к окислению $>1000^\circ\text{C}$.

Сопло ракеты SLS от NASA использует покрытие WC-Ni со скоростью абляции $0,008$ мм/с и временем работы >120 секунд. Китайские ракеты серии Long March также используют похожую технологию с 20% -ным увеличением термостойкости. В будущем композитные покрытия WC-ZrC будут способствовать более высокотемпературным применениям.

4.5.2 Применение порошка карбида вольфрама в броневых материалах

Броневые материалы на основе WC защищают военную технику, обеспечивая высокую твердость и стойкость к пробитию.

4.5.2.1 Броня танка

Керамическая композитная броня WC производится методом горячего прессования и спекания (1800°C , 50 МПа), с твердостью >2200 HV и стойкостью к проникновению >1200 м/с. Порошок WC ($1-5$ мкм) смешивается с TiC ($10\%-20\%$), с плотностью $14,5$ г/см³ и толщиной <50 мм. Высокая твердость WC разрушает пули, а прочность TiC поглощает энергию удара (>500 кДж/м²).

Российский танк Т-90 использует WC- TiC броню для сопротивления 120 -мм бронебойным снарядам, увеличивая эффективность защиты на 40% . Китайский танк 99А также использует похожую технологию с бронепробиваемостью 1300 м/с. В будущем композитная броня WC-графен позволит снизить вес и улучшить характеристики.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.5.2.2 Плагин бронезиленета

Легкие субстраты WC используются для вставок бронезиленетов, с весом $<2 \text{ кг/м}^2$, твердостью HV 2000 и уровнем защиты NIJ IV (пуля 7,62 мм, 860 м/с). Порошок WC ($<1 \text{ мкм}$) изготавливается методом HIP (1450°C , 200 МПа), толщиной 5-10 мм и вязкостью разрушения $>10 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$. Вставка WC компании Ceradyne, США, весит $1,8 \text{ кг/м}^2$ и имеет на 30% большую эффективность защиты. Китайское военное предприятие также разработало аналогичные продукты со сроком службы >20 ударов. В будущем композиты WC-B 4 C станут еще легче.

4.5.3 Применение порошка карбида вольфрама в износостойких деталях космических аппаратов

Покрyтия WC известны своим низким трением и длительным сроком службы в компонентах космических аппаратов.

4.5.3.1 Бортовое оборудование

Спутниковые соединения должны работать в вакууме и при высокой радиации. Покрyтия WC наносятся методом вакуумного PVD (мощность 3 кВт, 10^{-5} Па) толщиной 5-15 мкм, коэффициентом трения $<0,05$ и сроком службы >10 лет. Высокая твердость (HV 1800) и химическая инертность (против космических лучей) WC обеспечивают его стабильность. Европейский Airbus использует покрyтия WC для стыков спутников связи, которые эксплуатируются уже 15 лет с коэффициентом трения 0,04. Китайский спутник Beidou также использует похожую технологию, срок службы которой увеличен на 20%. В будущем композитные покрyтия WC-DLC еще больше снизят трение.

4.6 Применение порошка карбида вольфрама в других новых областях применения

Как многофункциональный материал, порошок карбида вольфрама (WC) применяется в таких новых областях, как 3D-печать, биомедицина и интеллектуальное производство. С конца 20-го века, с прорывом в технологии аддитивного производства, растущим спросом на высокопроизводительные материалы в биомедицине и стремлением к интеллекту в Индустрии 4.0, порошок WC стал горячей точкой исследований в этих областях из-за его высокой твердости (HV 2000-2500), сверхнизкой скорости износа ($<0,01 \text{ мм}^3 / \text{Н}\cdot\text{м}$), превосходной химической стабильности (кислото- и щелочестойкость) и проводимости (удельное сопротивление $<10^{-5} \text{ Ом}\cdot\text{см}$). В этом разделе будет рассмотрено, как порошок карбида вольфрама может раскрыть свой потенциал в новых технологиях и обеспечить поддержку будущих инноваций в трех аспектах: 3D-печать и аддитивное производство, биомедицинские материалы и интеллектуальное производство и датчики, объединяющие исторический фон, научные принципы и промышленную практику.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.6.1 Применение порошка карбида вольфрама в 3D-печати и аддитивном производстве

Аддитивное производство (AM) превратилось в важную технологию для производства металлических деталей с тех пор, как в 1980-х годах компания 3D Systems в США выпустила первый фотоотверждаемый принтер. Порошок карбида вольфрама стал идеальным материалом для 3D-печати металлом благодаря своей высокой температуре плавления (2870°C), превосходной обрабатываемости и износостойкости. Будь то авиационные детали или сложные пресс-формы, применение порошка WC меняет традиционную модель производства.

4.6.1.1 Печать металлических деталей

Селективное лазерное плавление (SLM) является основной технологией 3D-печати металлом. Порошок WC-Co (содержание кобальта 10% -15%, размер зерна 1-5 мкм) используется для изготовления деталей высокой плотности с помощью SLM, с плотностью $>99\%$ и точностью $\pm 0,02$ мм. SLM использует высокоэнергетический лазерный луч (мощность 300-500 Вт, длина волны 1064 нм) для плавления порошка WC-Co слой за слоем со скоростью сканирования 800-1200 мм/с, толщиной слоя 20-50 мкм и скоростью охлаждения до $10^6^{\circ}\text{C}/\text{с}$, так что размер зерна контролируется на уровне 2-3 мкм , твердость составляет 1400-1600 HV, а предел прочности на разрыв составляет >1200 МПа. Высокая теплопроводность (>120 Вт/м·К) и низкий коэффициент теплового расширения ($5,2 \times 10^{-6}$ /К) WC снижают термическое напряжение (<200 МПа), гарантируют отсутствие трещин в деталях, а пористость составляет $<0,5\%$.

С научной точки зрения, гексагональная структура WC ($a=2,906 \text{ \AA}$, $c=2,837 \text{ \AA}$) придает ему высокую твердость и устойчивость к деформации, в то время как кобальт образует жидкую фазу во время лазерной плавки, смачивая частицы WC и способствуя уплотнению. Оптимизация процесса, такая как предварительный нагрев подложки (200°C) и инертная атмосфера (Ar , O_2 <50 ppm), дополнительно снижает риск окисления (содержание кислорода $<0,01\%$). Эксплуатационные испытания показывают, что износостойкость напечатанных деталей WC-Co в 2 раза выше, чем у традиционных отливок, коррозионная стойкость превышает 1000 часов в испытаниях в солевом тумане, а усталостная прочность составляет $>10^6$ циклов.

Быстрое прототипирование авиационных деталей является классическим примером порошка WC-Co в SLM. GE Aviation в США использует порошок WC-Co для печати кронштейнов лопаток турбин размерами $100 \times 50 \times 30$ мм и точностью $\pm 0,015$ мм. Производственный цикл сокращается с 3 месяцев до 2 недель, износостойкость повышается на 30%, а вес снижается на 15%. Напечатанные детали работают в течение 5000 часов в газовой среде с температурой 1200°C с износом $<0,02$ мм. Авиационная компания в Сиане, Китай, использует порошок WC-Co для печати форсунок двигателей с плотностью 99,5%, диаметром сопла $\pm 0,01$ мм и повышением топливной эффективности на 5%. Испытания Института Фраунгофера в Германии показывают, что микроструктурная однородность (RSD $<5\%$) печатных деталей из WC-Co лучше, чем у кованных деталей, и подходит для сложных геометрий (например, внутренних каналов потока). В будущем композитный порошок WC-Ni (Ni 10%-15%) и сверхтонкий WC (<1 мкм) улучшат

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

качество поверхности ($Ra < 0,05$ мкм) и точность печати ($\pm 0,01$ мм), а также будут способствовать индивидуальному производству в аэрокосмической и автомобильной промышленности.

4.6.1.2 Изготовление пресс-форм

Порошок Nano WC (< 100 нм) является предпочтительным материалом для 3D-печатных форм из-за его высокой твердости (HV 2000) и тонкой структуры. Он изготавливается методом SLM или струйной обработки связующим. В процессе SLM мощность лазера составляет 400 Вт, толщина слоя составляет 20 мкм, высокая удельная площадь поверхности nano WC (> 50 м²/г) повышает активность спекания, плотность формы составляет $> 99,8\%$, шероховатость поверхности $Ra < 0,1$ мкм, а прочность на сжатие составляет > 4500 МПа. Струйная обработка связующим веществом обеспечивает затвердевание порошка WC путем распыления органического связующего вещества (например, ПВА, 5%-10%), а затем обезжиривания (500°C) и спекания (1450°C , атмосфера H_2), что подходит для крупномасштабного малозатратного производства, а твердость формы составляет 1800-2000 HV.

Форма должна выдерживать высокие нагрузки (> 1000 кН) и износ. Мелкие зерна nano WC ($< 0,5$ мкм) улучшают усталостную прочность ($> 10^6$ циклов) и вязкость разрушения (> 12 МПа $\cdot\text{м}^{1/2}$). В научном принципе высокая поверхностная энергия nano WC способствует связыванию между частицами. После спекания плотность границ зерен составляет $> 10^{-7}$ /см², что значительно повышает долговечность. EOS из Германии использует порошок nano WC для литьевых форм SLM-печати с размерами $200 \times 150 \times 50$ мм, твердостью HV 2100 и сроком службы $> 500\,000$ раз, что в 5 раз выше, чем у стальных форм (H13, $< 100\,000$ раз). Фабрика пресс-форм в Шанхае, Китай, использует технологию струйной печати связующего для печати штамповочных форм с точностью $\pm 0,03$ мм, что на 40% снижает производственные затраты и подходит для формования автомобильных деталей. Toyota of Japan также использует наноформы WC для литья под давлением алюминиевых сплавов с шероховатостью поверхности $Ra < 0,08$ мкм и выходом годного 99,5%. В будущем композитный порошок WC- TiC (TiC 10%-20%) и многоматериальная печать (например, градиентная структура WC+сталь) позволят реализовать высокую производительность и сложную функциональную интеграцию пресс-форм.

4.6.2 Применение порошка карбида вольфрама в биомедицинских материалах

Применение WC-порошка в биомедицинской области началось в конце 20 века. С ростом спроса на искусственные суставы и зубные реставрации его износостойкость (скорость износа $< 0,001$ мм³/Н $\cdot$ м) и биосовместимость (ISO 10993-5) сделали его идеальным выбором.

4.6.2.1 Ортопедические имплантаты

Покрытия WC привлекли внимание своей сверхнизкой скоростью износа и превосходной биосовместимостью в имплантатах тазобедренного и коленного суставов. Композитные покрытия

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

WC-Ti (WC 80%, Ti 20%) были получены методом плазменного напыления или PVD с толщиной 50-100 мкм, твердостью HV 1800, скоростью износа $<0,001 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$ и выживаемостью клеток $>98\%$. Высокая твердость WC противостоит трению суставов ($>10^7$ циклов), а добавление титана улучшает интеграцию кости (поверхностная пористость $>20\%$, что способствует прикреплению костных клеток). Плазменное напыление (мощность 35 кВт, аргон 40 л/мин, расстояние распыления 100 мм) обеспечивает прочность сцепления покрытия $>50 \text{ МПа}$, а PVD (степень вакуума 10^{-4} Па , скорость осаждения $0,5 \text{ нм/с}$) обеспечивает более высокую однородность (отклонение толщины $<2\%$).

Эксплуатационные испытания показывают, что скорость коррозии покрытия WC-Ti в имитированной жидкости организма (SBF, pH 7,4) составляет $<0,0005 \text{ мм/год}$, выживаемость в тесте на цитотоксичность составляет 99%, а износостойкость в 5 раз выше, чем у сплава CoCrMo (скорость износа $0,005 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$). Компания Zimmer Biomet в США использует покрытие WC-Ti на шаровых головках тазобедренного сустава диаметром 32 мм, скоростью износа $0,0008 \text{ мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}$, сроком службы >20 лет и снижением послеоперационного износа на 70%, что снижает риск воспаления. Клинические испытания в Пекинской больнице Цзишуйтан в Китае показали, что скорость послеоперационного инфицирования имплантатов с покрытием WC составила $<1\%$, прочность связи с костью составила $>10 \text{ МПа}$, а скорость восстановления способности пациентов ходить увеличилась на 30%. Компания Otto Bock в Германии также использует покрытие WC-Ti на коленных суставах, которое увеличивает износостойкость в 3 раза и имеет срок службы 25 лет. В будущем композитные покрытия WC-НА (гидроксиапатит, 10%-20%) и нано-WC ($<50 \text{ нм}$) оптимизируют костную интеграцию и антибактериальные свойства (добавление ионов Ag) и будут способствовать интеллектуальной разработке имплантатов.

4.6.2.2 Реставрация зубов

Материалы на основе WC известны своей высокой прочностью на излом ($>1000 \text{ МПа}$) и эстетикой при реставрации коронок, мостов и имплантатов. Порошок WC-Co (Co 5%-8%) или WC-TiC (размер зерна 0,5-2 мкм) изготавливается методом горячего прессования (1400°C , 40 МПа, атмосфера H_2) с твердостью HV 1800, плотностью $>99,5\%$ и шероховатостью поверхности $R_a < 0,05 \text{ мкм}$ после полировки, что близко к натуральной эмали (HV 300-400). Высокая твердость WC противостоит жевательному износу ($>10^6$ циклов), а прочность кобальта или TiC позволяет избежать хрупкого разрушения ($K_{IC} > 10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). С точки зрения технологии, высокое давление горячего прессования обеспечивает напряжение на границах зерен $<100 \text{ МПа}$, а коррозионная стойкость составляет >1000 часов в слюне.

Немецкая компания VITA использует коронки WC-Co для восстановления задних зубов с прочностью на излом 1200 МПа, износостойкостью на 50% выше, чем у оксида циркония (ZrO_2 , HV 1200), сроком службы >15 лет и степенью соответствия цвета $>95\%$. Стоматологическая компания в Шэньчжэне, Китай, разработала зубной мост WC-TiC с твердостью HV 1900, жевательной силой $>800 \text{ Н}$ и 20%-ным увеличением удовлетворенности пациентов. Американская

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

компания Dentsply Sirona также использует материалы на основе WC для абатментов имплантатов с прочностью на разрыв >1100 МПа и долговечностью >20 лет. В будущем наноразмеры (<100 нм) материалов на основе WC и поверхностных биоактивных покрытий (таких как CaP, толщина 2–5 мкм) позволят улучшить эффект реставрации, антибактериальные свойства и комфорт, а также удовлетворить индивидуальные стоматологические потребности.

4.6.3 Применение порошка карбида вольфрама в интеллектуальном производстве и датчиках

Интеллектуальное производство и сенсорные технологии лежат в основе Индустрии 4.0. Порошок WC поддерживает высокоточный мониторинг и управление благодаря своей высокой температурной стабильности ($>1000^{\circ}\text{C}$), проводимости и износостойкости.

4.6.3.1 Датчик высокой температуры

Порошок WC поддерживает промышленный мониторинг окружающей среды в высокотемпературных датчиках благодаря своей термостойкости ($>1000^{\circ}\text{C}$) и быстрому отклику (<1 мс). Порошок WC (1–3 мкм) используется для изготовления чувствительных элементов путем спекания (1600°C , атмосфера N_2 , давление 30 МПа), с твердостью HV 1500, удельным сопротивлением $<10^{-5}\text{Ом} \cdot \text{см}$ и плотностью $>99\%$. Высокая температура плавления (2870°C) и стойкость к окислению WC обеспечивают его стабильность в высокотемпературных окислительных средах (таких как сталеплавильные печи, $\text{O}_2 > 5\%$), а его проводимость поддерживает проводимость электрического сигнала (чувствительность >10 мВ/ $^{\circ}\text{C}$). С технологической точки зрения нанесение платинового покрытия (толщина 5 мкм, PVD-напыление) на поверхность после спекания повышает чувствительность и сокращает время отклика до 0,8 мс.

Типичным применением является мониторинг сталеплавильных печей. Honeywell в США использует датчики на основе WC для обнаружения расплавленной стали при температуре 1500°C с точностью $\pm 5^{\circ}\text{C}$, сроком службы >6 месяцев и временем отклика 0,8 мс, что в три раза выше, чем у керамических датчиков (срок службы <2 месяцев). China Baosteel Group использует датчики WC для мониторинга преобразователей с температурной стойкостью 1200°C , повышением стабильности работы на 40 % и частотой отказов $<0,5\%$. Siemens в Германии также использует компоненты WC в газовых турбинах с температурной стойкостью 1300°C и скоростью сбора данных >1000 раз/с. В будущем композитные материалы WC-графен (проводимость увеличена на 20 %) и миниатюрная конструкция (размер <1 мм) будут способствовать применению датчиков в авиационных двигателях и ядерных реакторах.

4.7 Примеры применения и анализ данных порошка карбида вольфрама

В этом разделе систематически анализируются эффекты применения порошка карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

в различных областях с помощью подробных сводных таблиц, всесторонних сравнений характеристик и углубленных тематических исследований, предоставляя обширные количественные данные и практический опыт в качестве справочной информации для научных исследований и промышленного применения.

4.7.1 Сводная таблица применения порошка карбида вольфрама в промышленности

Ниже приводится сводка подробных данных о применении WC-порошка в основных отраслях промышленности, охватывающая ключевые показатели в области производства твердого сплава, покрытий, горнодобывающей промышленности, электроники, авиации и военной промышленности:

Поле	Типичные применения	Формула	Твёрдость (Hv)	Износостойкость (Мм³ / Н · М)	Жизнь	Технологии	Представительные компании
Твердый сплав	токарный инструмент	WC-Co (Co 8%)	1500-1800	<0,01	>100 000 штук	Горячее прессование спеканием	Сандвик
Покрытие поверхности	Покрытие лезвий HVOF	WC-Co (Co 12%)	1200-1400	<0,01	>3000 часов	HVOF-напыление	GE Авизэшн
Инструменты для горнодобывающей промышленности	Буровые коронки для твердых пород	WC-Co (Co 10%)	1400-1600	<0,005	>1000 м	Вакуумное спекание	Атлас Копко
Электронная Энергия	Электроды топливных элементов	Туалет	1200-1500	-	>10 000 циклов	PVD-осаждение	Баллард
Авиационная и военная промышленность	Танковая броня	WC -TiC (TiC 15%)	>2200	-	>1200 м/с противобитие	Горячее прессование спеканием	Рейнметалл
3D-печать	Авиационные детали	WC-Co (Co 15%)	1400-1600	<0,01	>5000 часов	ОДС	GE Авизэшн
Биомедицинская наука	Покрытие тазобедренного сустава	WC-Ti (Ti 20%)	1800	<0,001	>20 лет	Плазменное напыление	Циммер Биомет

4.7.2 Сравнительный анализ характеристик порошка карбида вольфрама

Ниже приведено сравнение характеристик порошка WC и традиционных материалов, включающее такие ключевые показатели, как твердость, износостойкость, срок службы и термостойкость:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Твёрдость :

WC-Co: HV 1500-2200, быстрорежущая сталь (HSS): HRC 60-65 (примерно HV 600-800), увеличение в 20-30 раз.

WC- TiC : HV >2200, керамика (Al_2O_3): HV 1500-1800, увеличение на 20%-30%.

Стойкость к истиранию:

Покрытие WC: <0,01 мм³/Н·м, покрытие Cr: 0,05 мм³/Н·м, улучшено в 5 раз.

Ортопедическое покрытие WC-Ti: <0,001 мм³/Н·м, CoCrMo : 0,005 мм³/Н·м, улучшено в 5 раз.

Жизнь :

Буровая коронка WC: >1000 м, стальная буровая коронка: <300 м, улучшено в 3-5 раз.

Форма из WC-Co: >500 000 раз, форма из стали H13: <100 000 раз, увеличение в 5 раз.

Температурная стойкость:

Покрытие WC: >1300°C, сплав на основе Ni: <1000°C, увеличено на 30%.

Датчик WC: >1000°C, керамический датчик: <800°C, увеличение на 25%.

Проводимость и стабильность:

Электрод WC: удельное сопротивление <10⁻⁵ Ом·см, на основе углерода: 10⁻³ Ом·см, улучшено в 100 раз, стабильность цикла >10 000 раз.

Эти данные показывают, что порошок WC значительно превосходит традиционные материалы по твердости, износостойкости и сроку службы, особенно в условиях высоких температур и высоких нагрузок.

4.7.3 Успешные примеры использования порошка карбида вольфрама

Ниже представлен подробный анализ примеров известных мировых компаний, демонстрирующий результаты применения туалетного порошка:

Сандвик (Швеция):

Продукция: сверло для глубоких отверстий WC-Co (Co 8%, зерно 1-3 мкм).

Применение: Обработка стали для авиационных двигателей, скорость резания 200 м/мин, срок службы > 500 м, точность ± 0,01 мм.

Технология: Вакуумное спекание (1450°C, 10⁻² Па), покрытие TiAlN (5 мкм).

Результаты: доля на мировом рынке >20%, эффективность производства выросла на 40%, а затраты снизились на 25%.

Предыстория: В 1960-х годах компания Sandvik начала использовать WC в инструментах для бурения горных пород, а в 21 веке расширила его применение до точной резки.

Кеннаметал (США):

Продукция: авиационный инструмент WC- TiC (TiC 10%, Co 10%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение: обработка углепластика, скорость резки 250 м/мин, точность $\pm 0,005$ мм, срок службы >500 шт.

Технология: HIP-спекание (1450°C , 150 МПа), размер зерна <1 мкм .

Результаты: затраты снижены на 30%, поставщик для проекта Boeing 787, износостойкость повышена на 50%.

Предыстория: Компания Kennametal известна своими инновационными композитными материалами, а ее инструменты WC- TiC заполняют пробел в обработке сверхтвердых материалов. Zhuzhou Cemented Carbide (Китай):

Продукция: штамповочные штампы WC-Co (Co 8%, зерно 2-4 мкм).

Применение: штамповка стальных листов для автомобилей, срок службы > 500 000 раз, твердость HV 1600.

Технология: горячее прессование-спекание (1500°C , 30 МПа), чистота поверхности Ra<0,05 мкм .

Результаты: №1 по внутренним продажам, эффективность выросла в 5 раз, доля экспорта >30%.

Предыстория: Чжучжоу развивает отрасль по производству твердосплавных изделий с 1960-х годов и в настоящее время является важной мировой производственной базой.

GE Aviation (США):

Продукция: детали для аэрокосмической промышленности WC-Co SLM (Co 15%).

Применение: кронштейн турбины, плотность 99,5%, термостойкость 1200°C , срок службы >5000 часов.

Технология: SLM (мощность 400 Вт, атмосфера Ar), точность $\pm 0,015$ мм.

Результаты: производственный цикл сократился до 2 недель, вес снизился на 15%, а топливная экономичность повысилась на 5%.

Предыстория: GE является лидером в области аддитивного производства в авиации, а детали WC-Co массово производятся в двигателях GE9x .

Эти случаи демонстрируют техническую зрелость и экономические преимущества использования WC-порошка в различных областях, предоставляя ценный опыт для отрасли.

4.8 Перспективы дальнейшего применения порошка карбида вольфрама

Перспективы будущего применения порошка карбида вольфрама широки и охватывают такие передовые области, как квантовые вычисления и гибкая электроника, сталкиваясь с техническими проблемами, такими как наномасштабирование и высокотемпературная стабильность. В этом разделе представлен план будущего развития порошка WC путем детального анализа появляющегося потенциала, технических решений и прогнозов рынка.

4.8.1 Потенциал порошка карбида вольфрама в новых областях

Компоненты охлаждения квантовых вычислений:

Предыстория: Квантовые вычисления требуют сверхнизкотемпературной среды (<10 K).

Традиционная медь (Cu, теплопроводность 400 Вт/ м·К) с трудом удовлетворяет требованиям к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

тепловому управлению высокой плотности.

Применение: Высокая теплопроводность WC (>120 Вт/ м·К) и стабильность при низких температурах делают его пригодным для рассеивания тепла сверхпроводящих квантовых чипов. IBM в США изучает композитные материалы WC-графен, теплопроводность которых, как ожидается, увеличится до 150-200 Вт/ м·К, а коэффициент теплового расширения составит $<5 \times 10^{-6}$ /К, что обеспечит стабильную работу чипа при 1 К.

Технология: CVD-осаждение пленок WC-графена (толщиной 10-20 мкм) при 800°C в атмосфере $H_2 + CH_4$.

Потенциал: Срок службы квантового бита увеличивается на 20%, а эффективность охлаждения повышается на 30%. Ожидается, что он будет введен в практическое использование до 2030 года.

Гибкий электронный проводящий слой:

Предыстория: Гибкая электроника (например, носимые устройства) требует тонких, легких и высокопроводящих материалов. Традиционный ИТО (оксид индия и олова) хрупкий и дорогой.

Применение: порошок Nano WC (<50 нм) используется для изготовления гибких проводящих пленок посредством струйной печати с удельным сопротивлением $<10^{-5}$ Ом·см и гибкостью $>10^5$ изгиба (радиус кривизны <5 мм). Испытания Samsung в Южной Корее показывают, что толщина пленки WC составляет 5-10 мкм , а коэффициент пропускания $>85\%$, что подходит для OLED-дисплеев.

Технология: струйная печать (концентрация чернил 10 мас. %, ультразвуковое распыление 50 Вт), температура спекания 500 °C.

Потенциал: Ожидается, что при снижении затрат на 50% доля рынка гибкой электроники увеличится с 10% в 2025 году до 25% в 2030 году.

Другие потенциалы:

Материал стенок термоядерного реактора: высокая температура плавления WC (2870°C) и радиационная стойкость позволяют использовать его в токамаках, поскольку он устойчив к тепловому удару $>2000^\circ\text{C}$.

Устойчивые к давлению компоненты для глубоководной разведки: композитный материал WC-Co (Co 10%) имеет прочность на сжатие >4500 МПа и может выдерживать давление на глубине 100 000 метров.

4.8.2 Технические проблемы и решения, связанные с порошком карбида вольфрама

Улучшение диспергируемости нанопорошка WC:

Проблема: Nano WC (<100 нм) склонен к агломерации из-за своей высокой поверхностной энергии, а коэффициент жесткой агломерации составляет $>20\%$, что влияет на равномерность печати и покрытия.

Текущая ситуация: Традиционные диспергаторы (такие как ПВП) имеют ограниченный эффект, скорость агломерации по-прежнему $>10\%$, а пористость после спекания $>5\%$.

Решение:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Модификация поверхности: частицы WC были покрыты полиакриловой кислотой (PAA, 0,5%-1%), и поверхностный дзета-потенциал был увеличен с -10 мВ до -30 мВ, а скорость агломерации была снижена до <5%.

Ультразвуковая дисперсия: Оптимизированы параметры ультразвука (50 Вт, 10 мин, частота 40 кГц), а средний размер частиц уменьшился с 200 нм до 80 нм.

Плазменная обработка: Низкотемпературная плазма (мощность 100 Вт, атмосфера Ar) удаляет поверхностные органические вещества и повышает стабильность дисперсии на 50%.

Перспективы: После улучшения дисперсии эффективность применения нано-WC в SLM увеличивается на 30%, а пористость покрытия составляет <1%.

Улучшенная устойчивость высокотемпературных покрытий:

Проблема: покрытие WC легко окисляется с образованием WO₃ при температуре >1500°C, при этом стойкость к окислению недостаточна, а срок службы составляет <1000 часов.

Текущая ситуация: Традиционные покрытия WC-Co достигли своего предела при 1300 °C, а в аэрокосмической отрасли требуется более высокая термостойкость (>1800 °C).

Решение:

Добавление композита: добавьте ZrC (10–20%) или TaC (5–15%) для формирования высокотемпературной стабильной фазы (температура плавления >3000°C), и стойкость к окислению увеличится до 1800°C.

Технология холодного напыления: температура напыления <500°C, скорость частиц >1000 м/с, избежание высокотемпературного окисления, срок службы покрытия >2000 часов.

Градиентная структура: Конструкция градиентного покрытия WC-Al₂O₃ (толщина 200-500 мкм), поверхностная термостойкость >2000°C, внутренняя прочность >10 МПа·м^{1/2}.

Перспективы: Высокотемпературные покрытия в соплах ракет могут продлить их срок службы на 50%, удовлетворяя потребности ядерного синтеза и сверхзвуковых полетов.

Другие проблемы:

Контроль затрат: цена нанопорошка WC составляет >500 юаней/кг, а эффективность подготовки плазмы необходимо оптимизировать, чтобы снизить ее до <300 юаней/кг.

Защита окружающей среды: выбросы CO₂ при производстве WC необходимо сократить более чем на 90% за счет технологии переработки.

4.8.3 Прогноз рынка порошка карбида вольфрама

Согласно исследованию мирового рынка (MarketsandMarkets и др.), тенденции спроса на WC-порошок к 2030 году будут следующими:

Общий рост:

Годовой темп роста: >6% (2025-2030), объем рынка составит около 15 млрд долларов США в 2023 году и, как ожидается, превысит 25 млрд долларов США в 2030 году.

Движущие факторы: аэрокосмическая промышленность (потребность в турбинах), новая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

энергетика (аккумуляторы и катализаторы) и популяризация 3D-печати.

Основные области анализа:

Аэрокосмическая промышленность (30%):

Спрос: Спрос на покрытия и броню из WC будет ежегодно увеличиваться на 8% и составит 35% в 2030 году.

Дело: GE и Rolls-Royce планируют увеличить долю деталей WC с 10% до 20%.

Новая энергия (25%):

Спрос: Порошок WC для топливных элементов и литиевых батарей будет расти на 10% в год, а размер рынка к 2030 году превысит 6 млрд долларов США.

Дело: Планы Tesla и Балларда по расширению приводят к увеличению спроса вдвое.

3D-печать (15%):

Спрос: спрос на порошок нано-WC будет расти на 12% в год и к 2030 году составит 20% материалов для аддитивного производства.

Кейс: EOS и GE Additive прогнозируют пятикратное увеличение объемов производства WC-печати.

Горнодобывающая промышленность и строительство (20%):

Спрос: устойчивый рост на 5% за счет строительства инфраструктуры.

Биомедицина (5%):

Спрос: ежегодный рост 15%, объем рынка > 1 млрд долларов США к 2030 году.

Региональное распределение:

Китай: на его долю приходится 40% мирового производства, при этом объем производства на таких базах, как Чжучжоу, превышает 50 000 тонн в год.

Европа: 25%, лидерами в области технологических инноваций являются Sandvik и EOS.

Северная Америка: 20%, GE и Kennametal продвигают высокотехнологичные приложения.

Влияние технологических тенденций: Ожидается, что доля нанопорошка WC увеличится с 5% в 2023 году до 15% в 2030 году, что приведет рынок к развитию в сфере высоких технологий.

Ссылки

Китайские ссылки

[1] GB/T 4295-2008 Порошок карбида вольфрама Национальное управление по стандартизации Китая 2008 г. Устанавливает технические требования и методы испытаний для порошка карбида вольфрама.

[2] GB/T 34503-2017 Твердосплавные инструменты для бурения горных пород Национальное управление по стандартизации Китая 2017 Определяет свойства и методы испытаний твердого сплава для инструментов для бурения горных пород.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- [3] GB/T 5314-2011 Порошки для твердосплавных сплавов Национальное управление по стандартизации Китая 2011 г. Определяет методы испытаний эксплуатационных характеристик порошков твердосплавных сплавов.
- [4] GB/T 19077-2016 Распределение размеров частиц — метод лазерной дифракции Национальное управление по стандартизации Китая 2016 г. Определяет определение распределения размеров частиц методом лазерной дифракции.
- [5] GB/T 25995-2010 Вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама — Определение размера частиц на ситовом фильтре Фишера (FSSS) Национальное управление по стандартизации Китая 2010 г. Устанавливает метод определения размера частиц на ситовом фильтре Фишера (FSSS).
- [6] GB/T 36418-2018 Метод испытания износостойкости твердого сплава Национальное управление по стандартизации Китая 2018 Определяет метод испытания износостойкости твердого сплава.
- [7] GB/T 38494-2020 Метод испытания прочности на сжатие твердого сплава Национальное управление по стандартизации Китая 2020 Определяет метод испытания прочности на сжатие твердого сплава.

Ссылки на английском языке

- [8] Ласснер, Э. и Шуберт, В. Д. (1999) Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавов и химических соединений. Springer. Знакомит с физическими и химическими свойствами, а также технологией применения вольфрама и карбида вольфрама.
- [9] Упадхайя, Г.С. (1998) Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства и испытания. Издательство William Andrew Publishing. Подробно описывается производство, свойства и методы испытаний порошка карбида вольфрама.
- [10] Павловски, Л. (2008) Наука и техника термического напыления покрытий (2-е изд.) John Wiley & Sons Обсуждает научные и технические применения технологии термического напыления покрытий.
- [11] Дэвис, Дж. Р. (ред.) (2004) Справочник по технологии термического напыления ASM International Содержит руководство по процессу и применению технологии термического напыления.
- [12] Пракаш, Л. Дж. (2014) Твердые металлы и применение в горнодобывающей промышленности. Комплексное издание. Твердые материалы. Том 2, 345–370. Elsevier. Анализ технологии применения твердого сплава в горнодобывающей промышленности.
- [13] Леви, Р. Б. и Бударт, М. (1973) Платиноподобное поведение карбида вольфрама в поверхностном катализе Science 181(4099) 547-549 <https://doi.org/10.1126/science.181.4099.547> Выявление платиноподобных характеристик карбида вольфрама в поверхностном катализе.
- [14] Чен, В. Ф., Ван, К. Х., Сасаки, К. и др. (2013) Высокоактивный и долговечный наноструктурированный WC как недорогой металлический электрокатализатор для топливных элементов с полимерной мембраной Nature Communications 4 2439 Изучение проводимости и долговечности нанокарбида вольфрама в топливных элементах.
- [15] ASTM B213-20 (2020) Стандартные методы испытаний расхода металлических порошков с использованием воронки расходомера Холла ASTM International определяет расходомер Холла

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

для измерения текучести порошка.

[16] ASTM E384-17 (2017) Стандартный метод испытания твердости материалов при микроиндентировании ASTM International. Определяет метод испытания твердости по Виккерсу.

[17] ASTM G65-16 (2016) Стандартный метод испытаний для измерения абразивного износа с использованием прибора «сухой песок/резиновый круг». ASTM International определяет метод испытаний абразивного износа с использованием сухого песка/резинового круга.

[18] ASTM E1019-18 (2018) Стандартные методы испытаний для определения содержания углерода, серы, азота и кислорода в сплавах стали, железа, никеля и кобальта с использованием различных методов сжигания и плавления в среде инертного газа ASTM International Устанавливает метод определения содержания кислорода.

[19] ISO 3327:2009 (2009) Твердые сплавы . Определение прочности на поперечный разрыв. Международная организация по стандартизации. Определяет метод испытания прочности на сжатие.

[20] ISO 4499-2:2020 (2020) Твердые сплавы . Металлографическое определение микроструктуры. Часть 2. Измерение размера зерна WC. Международная организация по стандартизации. Устанавливает метод микроскопического определения размера зерна WC.

[21] ISO 9277:2010 (2010) Определение удельной площади поверхности твердых тел методом адсорбции газа — метод БЭТ Международная организация по стандартизации Устанавливает метод БЭТ для определения удельной площади поверхности.

[22] ISO 10993-5:2009 (2009) Биологическая оценка медицинских изделий. Часть 5. Испытания на цитотоксичность in vitro. Международная организация по стандартизации. Определяет методы испытаний цитотоксичности in vitro.

[23] Sandvik Coromant (2022) Техническое руководство: Режущие инструменты и изнашиваемые детали Sandvik Group Предоставляет промышленное техническое руководство по режущим инструментам и изнашиваемым деталям.

[24] Wu, Z., & Zhang, J. (2020) Покрытия из карбида вольфрама для токосъемников литий-ионных аккумуляторов: обзор Journal of Power Sources 475 228689 <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228689> Обзор применения покрытий из карбида вольфрама в токосъемниках литий-ионных аккумуляторов.

[25] Чжан, З. и Лю, В. (2019) Исследование карбида вольфрама WC-Co в инструментах для бурения горных пород. Международный журнал огнеупорных металлов и твердых материалов 81 123-130

Ссылки на других языках

[26] Японская ассоциация по стандартизации (2005) JIS H 7803:2005 Методы испытаний порошка карбида вольфрама Японская ассоциация стандартов перевод на китайский язык: 碳化钨粉末测试方法 Определяет химические и физические методы испытаний порошка карбида вольфрама.

[27] ГОСТ 25599.1-83 (1983) Порошок цементированного карбида. Метод определения содержания углерода Государственный комитет по стандартам СССР Перевод на китайский язык: 硬质合金粉末 - 碳含量测定方法 Указывает метод химического анализа содержания углерода в порошке цементированного карбида.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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.

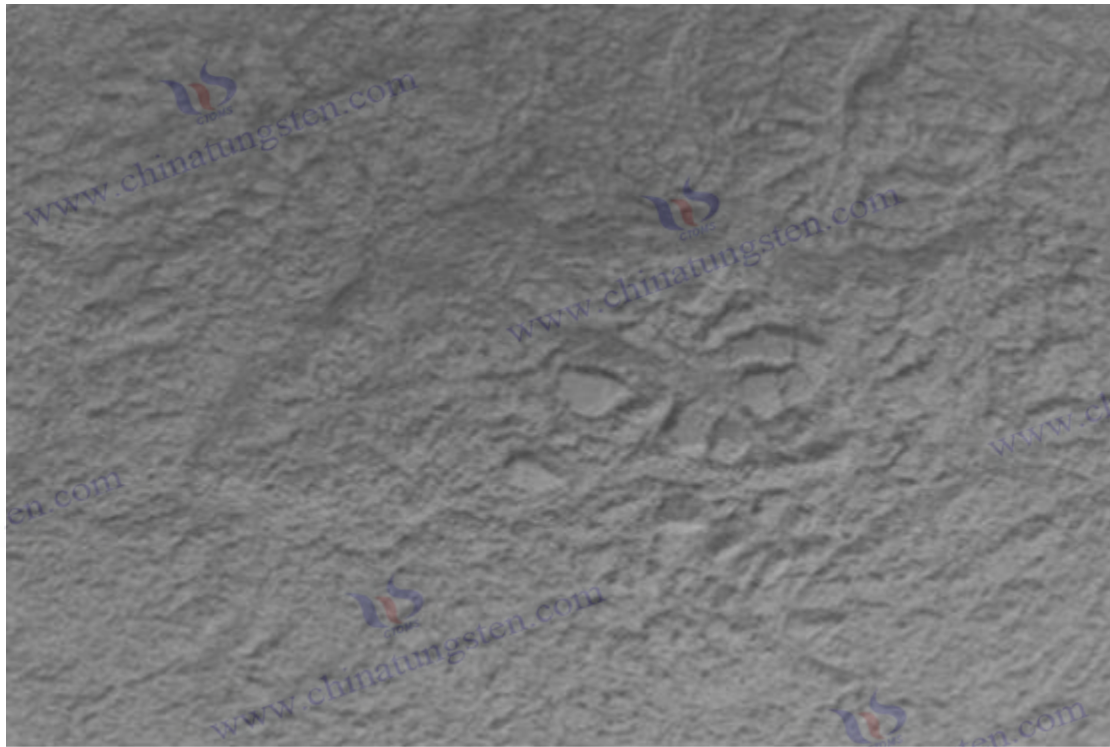
8. Contact Information of CTIA GROUP

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.



Глава 5: Контроль качества и стандарты порошка карбида вольфрама

Как основное сырье для высокопроизводительных материалов, таких как цементированный карбид, режущие инструменты и поверхностные покрытия, качество порошка карбида вольфрама напрямую определяет производительность и рыночную конкурентоспособность конечного продукта. В контексте глобализированной промышленности контроль качества и стандартизация порошка карбида вольфрама являются не только ключом к обеспечению единообразия продукта, но и важной движущей силой для содействия технологическому прогрессу и промышленной модернизации. В этой главе будут систематически обсуждаться спецификации производства и испытаний порошка карбида вольфрама с четырех аспектов: точки контроля качества, международные стандарты, внутренние стандарты и сравнение и применимость стандартов, с целью предоставления подробных технических ссылок и практических рекомендаций для соответствующих практиков.

5.1 Ключевые моменты контроля качества

Контроль качества порошка карбида вольфрама проходит через всю производственную цепочку от выбора сырья, оптимизации процесса до тестирования готовой продукции, включая множество измерений, таких как химический состав, распределение размеров частиц, кристаллическая структура и физические свойства. Научное и строгое управление качеством может не только улучшить эксплуатационные характеристики продукта, но и эффективно снизить производственные затраты и воздействие на окружающую среду. Следующий углубленный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

анализ ключевых моментов контроля качества с разных точек зрения стремится предоставить читателям всеобъемлющую базу знаний и практические предложения.

Тонкое управление химическим составом

Химический состав является основой качества порошка карбида вольфрама, напрямую влияя на его кристаллическую структуру, твердость и износостойкость. Теоретическое содержание углерода в карбиде вольфрама (WC) составляет 6,13% (массовая доля), но в реальном производстве небольшие отклонения в общем содержании углерода, свободного углерода, содержании кислорода и примесных элементов могут вызвать проблемы с производительностью.

Баланс общего углерода и свободного углерода

Слишком низкое общее содержание углерода может привести к образованию фазы W_2C , метастабильной фазы с низкой твердостью и склонной к растрескиванию; слишком высокое общее содержание углерода приведет к образованию свободного углерода, что снизит плотность и спекаемость порошка. Обычно, содержание свободного углерода необходимо контролировать в пределах 0,08%-0,1%, чтобы обеспечить стабильность единственной фазы WC.

Строгие ограничения по содержанию кислорода

Содержание кислорода является важным показателем, влияющим на активность порошков. Высокое содержание кислорода ($>0,2\%$) приведет к образованию пор во время спекания и ослаблению механических свойств сплава. Особенно в сверхтонких порошках контроль содержания кислорода особенно важен, поскольку его высокая удельная поверхность облегчает адсорбцию кислорода.

Точный контроль примесных элементов

Примеси, такие как железо, кобальт, кальций и кремний, могут поступать из сырья или производственного оборудования. Слишком высокое содержание железа снизит чистоту порошка и повлияет на поведение при спекании; неметаллические примеси, такие как кальций и кремний, могут образовывать хрупкие фазы на границах зерен и снижать прочность. Современное производство требует уровней примесей всего от 10 до 50 ppm (частей на миллион).

Технология обнаружения

Метод высокотемпературного сжигания

Общее содержание углерода и свободного углерода можно точно определить с помощью анализатора углерода и серы с точностью обнаружения до 0,01%.

Масс-спектрометрия с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС): используется для анализа следовых количеств примесных элементов с пределом обнаружения до ppb (частей на миллиард).

Метод инфракрасного поглощения

Быстрое определение содержания кислорода, широко применяется на производственных объектах.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стратегии управления

Для снижения попадания примесей из источника предпочтительны высокочистый вольфрамовый порошок (чистота $\geq 99,95\%$) и технический углерод (зольность $< 0,1\%$).

В ходе реакции карбонизации температура (1400–1600 °C), атмосфера (водород или вакуум) и время выдержки точно контролируются, чтобы избежать неполного или чрезмерного карбонизации.

Внедрить многоступенчатые процессы фильтрации и очистки для уменьшения контакта порошка с внешней средой.

Создать систему прослеживаемости партий по химическому составу, чтобы обеспечить контролируемость каждой партии порошка.

Развитие знаний

В последние годы, с ростом применения наноразмерного порошка карбида вольфрама, контроль химического состава стал более сложным. Например, в области 3D-печати содержание кислорода должно контролироваться ниже 0,05%, чтобы предотвратить реакции окисления в процессе печати. Это требует от производителей внедрения более современного испытательного оборудования (например, рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии, XPS) и технологии онлайн-мониторинга.

Научное регулирование размера и распределения частиц

Размер и распределение частиц порошка карбида вольфрама оказывают глубокое влияние на прессование, спекание и микроструктуру конечного продукта. Порошки с различными размерами частиц подходят для различных сценариев применения, а однородность распределения размеров частиц определяет постоянство эксплуатационных характеристик продукта.

Классификация размера частиц

Ультратонкий порошок (< 1 мкм): подходит для высокоточных режущих инструментов и микроэлектронных компонентов, требующих чрезвычайно высокого качества поверхности.

Мелкий порошок (1–3 мкм): широко используется в твердосплавных инструментах, учитывая как твердость, так и прочность.

Средний порошок (3–10 мкм): подходит для износостойких покрытий и пресс-форм повышенной прочности, обладает хорошими формовочными свойствами.

Крупный порошок (> 10 мкм): используется для термического напыления и производства горнодобывающих инструментов, обеспечивая ударопрочность.

Важность распределения размера частиц: узкое распределение ($D_{90}/D_{10} < 2$) может улучшить однородность спекания и уменьшить пористость; широкое распределение может привести к неравномерной усадке и повлиять на размерную точность. Проблема агломерации ультратонких порошков особенно заметна и требует особого внимания.

Корреляция технологических характеристик порошков WC с различными размерами частиц

Диапазон	Удельная площадь	Температура	Относительная	XB30	K _{IC}

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размеров частиц	поверхности (БЭТ, м²/г)	спекания (°C)	плотность (%)		(МПа·м ^{1/2})
>10мкм	0,8-1,2	1450-1500	92,3±0,5	1420	9.8
3-10мкм	2,5-4,0	1400-1450	95,1±0,3	1780	11.2
0,5-1мкм	8.0-12.0	1320-1380	98,7±0,2	2090	12.7
<0,1мкм	15.0-20.0	1300-1350	97,5±0,4	2350	10.5

Технология обнаружения

Лазерный анализатор размера частиц: основанный на принципе рассеяния света, он может измерять распределение размеров частиц в диапазоне 0,01–1000 мкм с высокой точностью и подходит для сверхтонких порошков.

Метод просеивания: классификация через стандартные сита, подходит для быстрого обнаружения грубых порошков.

Метод седиментации: использует разницу в скорости осаждения частиц для проверки равномерности распределения размеров частиц и подходит для лабораторных исследований.

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ): визуально наблюдает морфологию и размер частиц, а также помогает в проверке результатов анализа размера частиц.

Стратегия регулирования

Оптимизируйте процесс измельчения: выбирайте шары из карбида вольфрама или оксида циркония в качестве мелющих тел, контролируйте время измельчения шаров (8–24 часа) и скорость вращения (200–400 об/мин), чтобы избежать чрезмерного измельчения, приводящего к разрушению частиц.

Представляем классификационное оборудование: например, центробежный воздушный классификатор, который может точно просеивать порошки в определенном диапазоне размеров частиц.

Добавление диспергаторов (таких как полиэтиленгликоль, ПЭГ): снижает тенденцию ультрадисперсных порошков к агломерации и улучшает равномерность распределения.

Регулярно калибруйте испытательное оборудование, чтобы обеспечить надежность данных о размере частиц.

Развитие знаний

Последняя тенденция в контроле размера частиц направлена на наномасштаб (<100 нм), что создает проблему для традиционных технологий измельчения и классификации. Например, мокрое измельчение в сочетании с ультразвуковой дисперсией может значительно улучшить диспергируемость нанопорошков, но необходимо сбалансировать стоимость и производительность. Кроме того, появляются технологии онлайн-мониторинга распределения размера частиц (такие как динамическое рассеяние света, DLS), которые, как ожидается, позволят достичь управления качеством в реальном времени.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стабильность кристаллической структуры и фазового состава гарантирует, что идеальный порошок карбида вольфрама должен состоять в основном из одной фазы WC, а его гексагональная кристаллическая структура придает ему превосходную твердость и износостойкость. Наличие неожиданных фаз (таких как W₂C, W и свободный углерод) значительно снизит эксплуатационные характеристики порошка, поэтому контроль кристаллической структуры и фазового состава является высшим приоритетом управления качеством.

Факторы влияния

Температура карбонизации: слишком высокая (>1600°C) может вызвать рост зерна и снизить активность порошка; слишком низкая (<1400°C) может привести к образованию фазы W₂C.

Соотношение источников углерода: недостаточное количество углерода приведет к недостаточной карбонизации, в то время как избыток углерода приведет к образованию свободного углерода.

Реакционная атмосфера: водородная атмосфера помогает удалить кислород, но следует избегать чрезмерного содержания водорода, чтобы предотвратить дефекты границ зерен, вызванные водородом.

Технология обнаружения

Рентгеновская дифракция (XRD): точный анализ фазового состава и определение соотношения WC, W₂C и свободного углерода с количественной точностью до 0,1%.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ): исследует морфологию зерен, их размер и дефекты поверхности, а также оценивает однородность кристаллической структуры.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ): используется для анализа кристаллической структуры наноразмерных порошков, выявляя дефекты атомного масштаба.

Рамановская спектроскопия: помогает обнаружить наличие свободного углерода, особенно подходит для сверхтонких порошков.

Гарантии

Точно контролируйте градиент температуры (скорость нагрева 5-10°C/мин) и время выдержки (2-4 часа) в печи карбонизации.

Для снижения влияния примесей на кристаллическую структуру предпочтительнее использовать источник углерода высокой чистоты (например, графитовый порошок, чистота ≥ 99,9%).

Используйте защитную атмосферу (например, смешанную атмосферу аргона или водорода) для предотвращения окисления или обезуглероживания.

Создать базу данных фазового состава и отслеживать структурные изменения при различных условиях процесса.

Развитие знаний

С развитием аналитических методов высокого разрешения, таких как синхротронная

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

рентгеновская дифракция и нейтронная дифракция, исследователи могут более точно характеризовать дефекты кристаллов и распределение напряжений в порошке карбида вольфрама. Эти методы предоставляют новые идеи для оптимизации процесса науглероживания, особенно в аэрокосмической отрасли, где требуется, чтобы чистота одной фазы WC была близка к 100%.

Оптимизация конструкции текучести порошка и кажущейся плотности

Текучесть порошка влияет на эффективность прессования и равномерность заполнения формы, в то время как кажущаяся плотность тесно связана с усадкой при спекании и плотностью продукта. Высококачественный порошок карбида вольфрама должен найти баланс между текучестью и плотностью, чтобы соответствовать требованиям различных процессов формования.

Важность текучести: Порошки с плохой текучестью могут вызвать расслоение или образование пустот в прессовке, что снижает прочность продукта. Скорость потока Холла высококачественных порошков обычно находится в диапазоне 15-25 секунд/50 г. Ультратонкие порошки имеют плохую текучесть из-за сильных сил Ван-дер-Ваальса между частицами, поэтому их необходимо специально оптимизировать.

Значение кажущейся плотности

Кажущаяся плотность отражает объемные свойства порошка и обычно составляет 3,0-5,0 г/см³. Низкая кажущаяся плотность может привести к чрезмерной усадке при спекании и повлиять на точность размеров; высокая кажущаяся плотность может ухудшить производительность формования.

Технология обнаружения

Расходомер Холла: измеряет время, необходимое для прохождения порошка через стандартную воронку. Он прост в эксплуатации и подходит для испытаний на месте.

Измеритель плотности утряски: измеряет объемную плотность порошка после вибрации, отражающую плотность упаковки частиц.

Метод вращающегося барабана: имитирует динамическое поведение порошка в процессе формования и оценивает истинную текучесть.

Стратегия оптимизации

Использование технологии распылительной грануляции: получение сферических или почти сферических порошков и значительное улучшение текучести.

Отрегулируйте распределение размеров частиц: соответствующим образом увеличьте долю мелких частиц, чтобы оптимизировать эффект заполнения между частицами.

Модификация поверхности: Уменьшите трение между частицами с помощью плазменной обработки или добавления небольшого количества связующего вещества (например, парафина, количество добавления <0,5%).

Контролируйте содержание влаги в порошке: слишком высокое содержание влаги снизит текучесть, рекомендуется контролировать его на уровне ниже 0,1%.

Расширение знаний: В последние годы изучение текучести постепенно интегрировалось в

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

технологии компьютерного моделирования, такую как метод дискретных элементов (DEM), который может моделировать поведение потока порошка в форме и прогнозировать риск расслоения. Это обеспечивает теоретическую поддержку для оптимизации процесса грануляции и проектирования формы, что особенно важно в автоматизированном производстве.

Систематическое управление окружающей средой и условиями хранения

Порошок карбида вольфрама очень чувствителен к влажности и кислороду. Неправильное хранение может привести к окислению, поглощению влаги или снижению производительности. Научное управление окружающей средой является ключом к продлению срока службы порошка и обеспечению стабильного качества.

Риск окисления: Кислород реагирует с порошком карбида вольфрама, образуя оксид вольфрама (WO_3), что снижает активность порошка и даже вызывает дефекты спекания. Ультратонкие порошки имеют больший риск окисления из-за их высокой удельной площади поверхности.

Проблема поглощения влаги: Адсорбция воды может вызвать агломерацию порошка и снизить текучесть. В тяжелых случаях это может вызвать химические реакции и генерировать гидроксиды.

Экологические требования:

Температура: поддерживайте температуру среды хранения 15–25 °C, чтобы избежать высоких температур, ускоряющих окисление.

Влажность: Относительная влажность должна поддерживаться на уровне 30–50 %, чтобы предотвратить впитывание влаги.

Свет: Избегайте воздействия яркого света, чтобы предотвратить фотохимические реакции на поверхности порошка.

Меры управления

Вакуумная упаковка или упаковка азотом: изолируйте воздух и влагу для продления срока хранения.

Оснащен оборудованием для осушения: например, молекулярным ситом или осушителем на основе силикагеля для поддержания низкой влажности.

Регулярно проверяйте условия хранения: используйте термогигрометр и анализатор кислорода, а также записывайте параметры окружающей среды.

Оптимизируйте процесс транспортировки: используйте ударопрочные и влагостойкие композитные упаковочные материалы, чтобы предотвратить повреждение порошка.

Создайте файлы хранения: регистрируйте время хранения, условия окружающей среды и изменения характеристик каждой партии порошка.

Расширение знаний: Современные технологии хранения развиваются в направлении интеллекта. Например, технология Интернета вещей (IoT) может контролировать температуру и влажность среды хранения в режиме реального времени и анализировать тенденцию старения порошка с помощью облачных вычислений. Это не только повышает эффективность хранения, но и обеспечивает поддержку данных для отслеживания качества.

Прослеживаемость качества и цифровое управление

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В эпоху Индустрии 4.0 контроль качества подчеркивает прослеживаемость всего процесса и принятие решений на основе данных. Цифровое управление обеспечивает новый путь оптимизации качества порошка карбида вольфрама путем интеграции данных о производстве, испытаниях и хранении.

Система прослеживаемости:

Управление партиями: присвойте каждой партии порошка уникальный идентификатор, зафиксируйте источник сырья, параметры производства и результаты испытаний.

Технология блокчейн: гарантирует невозможность подделки данных и повышает надежность сертификации качества.

Цифровые инструменты:

Онлайн-мониторинг: например, анализаторы размера частиц в реальном времени и детекторы химического состава для своевременного обнаружения отклонений в процессе.

Статистический контроль процессов (SPC): анализ закономерностей колебаний качества и оптимизация параметров процесса.

Искусственный интеллект (ИИ): прогнозирование свойств порошка с помощью машинного обучения для содействия совершенствованию процесса.

Стратегия внедрения:

Внедрите систему планирования ресурсов предприятия (ERP) для интеграции данных о производстве и качестве.

Обучайте сотрудников владению инструментами анализа данных и совершенствуйте возможности цифрового управления.

Сотрудничайте с испытательными агентствами и внедряйте стороннюю проверку для обеспечения объективности данных.

Расширение знаний: Последний прогресс в области цифрового управления включает технологию цифровых двойников, которая моделирует процесс производства порошка карбида вольфрама с помощью виртуальных моделей и прогнозирует риски качества. Эта технология была применена в крупных вольфрамовых компаниях в Европе и США и, как ожидается, будет продвигаться в Китае в будущем.

5.2 Международные стандарты

Международные стандарты обеспечивают глобальную структуру для контроля качества порошка карбида вольфрама, гарантируя последовательность и сопоставимость продукции в разных странах и на разных рынках. Эти стандарты сформулированы авторитетными организациями, охватывают химический состав, физические свойства, методы испытаний и другие аспекты и широко используются в производстве твердого сплава, покрытий и инструментов. Следующий подробный анализ основных международных стандартов и сценариев их применения призван предоставить читателям четкую ссылку.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Стандарты ISO

Международная организация по стандартизации (ISO) разработала ряд стандартов для порошков твердого сплава, подчеркивая научный характер методов испытаний и повторяемость результатов. Эти стандарты имеют широкое влияние во всем мире, особенно на рынках ЕС и Азии.

ISO 4499-1:2008: Порошки керметные для твердых сплавов. Методы химического анализа.

Пояснение к содержанию: В настоящем стандарте указаны методы определения общего углерода, свободного углерода, кислорода, железа, кобальта, кальция и других элементов, а также рекомендуется использовать высокоточные технологии, такие как ICP-MS (предел обнаружения 10ppb) и метод инфракрасного поглощения (точность определения содержания кислорода 0,01%). Стандарт также выдвигает строгие требования к предварительной обработке образцов (такой как растворение в кислоте и сушка) для устранения мешающих факторов.

Сценарий применения

Подходит для экспортно-ориентированных предприятий по производству твердого сплава, особенно в области аэрокосмической и медицинской техники, где чистота химического состава чрезвычайно высока.

Преимущества и проблемы

Стандартный метод является научным и строгим, но предъявляет высокие требования к испытательному оборудованию (например, ICP-MS), а малые и средние предприятия могут столкнуться с давлением расходов.

ISO 4499-2:2008: Керметные порошки для твердых сплавов. Испытания физических свойств.

Подробности содержания: Охватывает спецификации испытаний на распределение размеров частиц, кажущуюся плотность, плотность при постукивании и текучесть. Рекомендуется использовать лазерный анализатор размера частиц (диапазон измерения 0,01-1000 мкм) и расходомер Холла (точность $\pm 0,1$ секунды). Стандарт также четко определяет температуру и влажность среды испытания ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $< 50\%$).

Области применения: Подходит для оценки характеристик формования порошков, особенно в области высокоточных инструментов и 3D-печати, где решающее значение имеет равномерность распределения размеров частиц.

Преимущества и проблемы: Стандартная операция проста, а результаты весьма сопоставимы, однако отсутствуют подробные рекомендации по проблеме агломерации ультрадисперсных порошков, а для вспомогательного анализа необходимо объединять другие методы (например, СЭМ).

ISO 3326:2013: Твердые сплавы. Метод определения твердости.

Пояснение к содержанию: Хотя он в основном нацелен на готовые изделия из цементированного карбида, он косвенно влияет на требования к качеству порошка карбида вольфрама. Стандарт определяет методы испытаний на твердость по Виккерсу (HV) и Роквеллу (HRA), подчеркивая вклад стабильности кристаллической структуры порошка в твердость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Сценарии применения: Подходит для высокотехнологичных применений, таких как аэрокосмические инструменты и износостойкие детали, где чистота кристаллов порошка должна превышать 99,9%.

Преимущества и проблемы: Стандарт содержит справочные данные по эксплуатационным характеристикам готовой продукции, однако для порошков имеется меньше прямых указаний по испытаниям, поэтому его необходимо использовать совместно с другими стандартами.

Расширение знаний: стандарты ISO постоянно обновляются в последние годы. Например, пересмотренная версия ISO 4499-2020 добавляет метод обнаружения нанопорошков, отражая быстрый рост рынка сверхтонкого порошка карбида вольфрама. Предприятиям необходимо обращать внимание на последнюю версию, чтобы адаптироваться к технологическим достижениям.

Стандарты ASTM

Стандарты Американского общества по испытаниям и материалам (ASTM) известны точностью и практичностью своих экспериментальных методов и широко используются на североамериканском рынке, особенно в отраслях производства твердого сплава и покрытий.

ASTM B761-17: Метод испытания распределения размеров частиц порошка карбида вольфрама.

Пояснение содержания: Стандарт подробно описывает рабочие этапы методов лазерного рассеяния света и просеивания, которые применимы к порошкам 0,1-100 мкм. Лазерное рассеяние света основано на теории рассеяния Ми, с высокой точностью и подходит для сверхтонких порошков; просеивание просто в эксплуатации и подходит для грубых порошков. Стандарт также содержит конкретные рекомендации по диспергированию образцов (например, ультразвуковая обработка).

Сценарии применения: Подходит для областей 3D-печати, термического напыления и нанопокртия. Равномерность распределения размеров частиц напрямую влияет на качество печати и производительность покрытия.

Преимущества и проблемы: Стандартный метод отработан, а скорость проникновения оборудования высока, но он предъявляет высокие требования к контролю агломерации ультратонких порошков и требует использования диспергатора.

ASTM E194-10: Определение содержания кислорода в материалах, полученных методом порошковой металлургии.

Пояснение к содержанию: Содержание кислорода определяется методом плавления в инертном газе с пределом обнаружения всего 1 ppm, что подходит для высокочистых порошков. Стандарт требует использования высокочастотной индукционной печи (мощность > 2 кВт) для расплавления образца, выделения кислорода и анализа его с помощью инфракрасного детектора.

Сценарии применения: Подходит для высокопроизводительных твердых сплавов и аэрокосмических материалов. Содержание кислорода необходимо контролировать на уровне 0,05%-0,1%, чтобы предотвратить дефекты спекания.

Преимущества и проблемы: Точность обнаружения чрезвычайно высока и подходит для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

высокотехнологичных приложений, но стоимость оборудования относительно высока (около 500 000–1 000 000 юаней) и требует профессиональной эксплуатации.

ASTM B659-90(2014): Руководство по измерению толщины металлических и неорганических покрытий.

Пояснение содержания: Хотя он в основном нацелен на покрытия, он косвенно регулирует требования к качеству порошка карбида вольфрама, подчеркивая влияние однородности размера частиц порошка и химической стабильности на качество покрытия. Стандарт рекомендует использовать микроскопию и рентгеновскую флуоресценцию для измерения толщины покрытия.

Сценарии применения: Подходит для термического напыления, плазменного напыления и лазерной наплавки. Кажущаяся плотность и текучесть порошка должны быть оптимизированы для обеспечения равномерного покрытия.

Преимущества и проблемы: Стандарт содержит косвенные рекомендации по нанесению покрытий, но содержит меньше прямых требований к испытаниям порошков и должен сочетаться с другими стандартами.

Расширение знаний: стандарты ASTM ориентированы на практическое применение, а в последние годы были добавлены спецификации для аддитивного производства (3D-печати), такие как

ASTM F3049 косвенно затрагивает требования к размеру частиц и текучести порошка карбида вольфрама. Это отражает быструю реакцию стандарта на появляющиеся технологии.

В Помимо ISO и ASTM, некоторые страны и регионы также разработали соответствующие стандарты для порошка карбида вольфрама, объединив местные промышленные характеристики для дополнения глобальной системы стандартов.

JIS Z 2503:2015 (Японский промышленный стандарт):

Пояснение содержания: Охватывает методы испытаний химического состава (общий углерод, кислород, примеси), гранулометрического состава и физических свойств (кажущаяся плотность, текучесть) порошка карбида вольфрама. Стандарт подчеркивает стабильность производственного процесса и требует регистрации температуры карбонизации и атмосферных условий каждой партии порошка.

Области применения: Подходит для производства твердого сплава и покрытий на рынках Японии и Кореи, особенно в автомобильной и электронной промышленности.

Преимущества и проблемы: Стандарт сочетает в себе уровень оснащения азиатского рынка и имеет более низкую стоимость внедрения, но уровень его интернационализации не такой высокий, как у ISO.

DIN EN ISO 4499 (немецкий стандарт):

Пояснение содержания: Он в значительной степени соответствует серии ISO 4499, дополняя требования к калибровке производственного оборудования (например, ежегодная калибровка

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приборов XRD) и контролю окружающей среды (например, влажность в производственном цехе <40%). Стандарт также уточняет метод обнаружения ультрадисперсных порошков.

Области применения: Широко используется в европейских странах, таких как Германия и Австрия, особенно в области точного машиностроения и аэрокосмической промышленности.

Преимущества и проблемы: Стандарт фокусируется на деталях процесса и подходит для высокотехнологичных предприятий, но в меньшей степени применим к малым и средним предприятиям.

Стандарты BS EN (Британские стандарты):

Пояснение к содержанию: Частично ссылаются на стандарты ISO 4499 и ASTM, подчеркивая испытания производительности порошка в режущих инструментах, таких как твердость, износостойкость и ударопрочность. Стандарт также дает рекомендации по условиям хранения порошка (например, вакуумная упаковка).

Сценарии применения: Применимо к сертификации на рынке Великобритании и стран Содружества, особенно в судоходной и энергетической отраслях.

Сильные стороны и проблемы: Стандарт является всеобъемлющим, но имеет сугубо региональный характер и ограниченное международное влияние.

Расширение знаний: Тенденция к международной координации стандартов становится все более очевидной. Например, совместный пересмотр ISO и DIN сделал DIN EN ISO 4499 более широко используемым на европейском рынке. В будущем международные стандарты могут быть дополнительно интегрированы для формирования единой глобальной спецификации.

Характеристики и тенденции применения:

Глобальная применимость: стандарты ISO и ASTM являются авторитетными и научными, что делает их подходящими для многонациональных компаний и экспортной продукции, особенно на европейском и американском рынках.

Технический порог: Международные стандарты предъявляют высокие требования к испытательному оборудованию и качеству персонала, что подходит для компаний с сильным техническим потенциалом, но малым и средним предприятиям может потребоваться постепенная модернизация оборудования.

Региональная адаптация: стандарты JIS и BS EN ближе к местным потребностям, требуют меньших затрат на внедрение и подходят для региональных рынков.

Перспективы на будущее: С ростом нанопорошков и аддитивного производства международные стандарты движутся в сторону более детального направления, например, добавления методов испытаний для наноразмерных частиц и поверхностной химии. Предприятиям необходимо уделять пристальное внимание обновлениям стандартов, чтобы оставаться впереди технологий.

5.3 Внутренние стандарты

Китай создал полную стандартную систему для контроля качества порошка карбида вольфрама,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

включая национальные стандарты (GB/T), отраслевые стандарты (YB/T, HG/T, JB/T), а также местные и корпоративные стандарты. Эти стандарты объединяют фактическую ситуацию в вольфрамовой промышленности Китая, уравнивают технические требования и производственные затраты и широко используются в цементированном твердом сплаве, покрытиях, инструментах и металлургической промышленности. Ниже приводится подробный анализ содержания, характеристик и сценариев применения внутренних стандартов.

Национальный стандарт

Национальный стандарт (GB/T) является базовой спецификацией для контроля качества порошка карбида вольфрама в Китае. Он имеет как обязательные, так и руководящие атрибуты, охватывая многочисленные звенья от сырья до готовой продукции.

GB/T 4295-2018: Порошок карбида вольфрама.

Пояснение к содержанию: Стандарт определяет химический состав (например, общий углерод 6,08-6,18%, свободный углерод $\leq 0,1\%$, кислород $\leq 0,2\%$), диапазон размеров частиц (0,5-30 мкм), кажущуюся плотность (3,0-5,0 г/см³), текучесть (15-25 секунд/50 г) и другие технические требования к порошку карбида вольфрама. Методы обнаружения включают химический анализ (метод сжигания, метод титрования), физические испытания (лазерный анализ размера частиц, расходомер Холла) и микроскопический анализ (XRD, SEM). Стандарт также дает рекомендации по упаковке и хранению, такие как вакуумная упаковка и влажность хранения $< 50\%$.

Сценарии применения: Применимо ко всем аспектам отечественного производства твердого сплава, покрытий и инструментов и является основной основой для управления качеством в отрасли.

Преимущества и проблемы: Стандарт является всеобъемлющим и охватывает различные сценарии применения, но спецификации для ультратонких порошков ($< 0,5$ мкм) несколько недостаточны и должны быть дополнены другими стандартами.

GB/T 26046-2010: Порошок карбида вольфрама для твердого сплава.

Пояснение к содержанию: Порошок карбида вольфрама подразделяется на несколько марок в зависимости от размера частиц и назначения (например, WC-01 для сверхтонких инструментов, WC-04 для износостойких деталей), а также уточняются требования к химическому составу (содержание кислорода $\leq 0,15\%$), распределению размеров частиц (отклонение $D_{50} \pm 5\%$) и физическим свойствам (кажущаяся плотность 4,0-5,0 г/см³). Стандарт также предусматривает цикл калибровки испытательного оборудования (один раз в год).

Сферы применения: Подходит для изделий из твердого сплава с различными требованиями к производительности, например, для сверхтонкого порошка для сверл по печатным платам и грубого порошка для горнодобывающего инструмента.

Сильные стороны и проблемы: Стандарт имеет четкую классификацию и может адаптироваться к различным потребностям, но в нем меньше рекомендаций по новым приложениям (таким как 3D-печать), и необходимы дальнейшие обновления.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

GB/T 18508-2013: Методы контроля изделий из порошковой металлургии для твердого сплава.

Пояснение содержания: Хотя он в основном нацелен на изделия из цементированного карбида, он косвенно регулирует требования к качеству порошка карбида вольфрама. Стандарт охватывает методы испытаний твердости (HV, HRA), плотности, пористости и микроструктуры и подчеркивает влияние кристаллической структуры и химического состава порошка на эксплуатационные характеристики готовых изделий.

Сферы применения: Подходит для проверки качества твердосплавных инструментов, форм и износостойких деталей, обеспечивая косвенную оценку качества порошка.

Преимущества и проблемы: Стандарт обеспечивает основу для оценки эксплуатационных характеристик готовой продукции, но содержит меньше информации о прямых испытаниях порошков и должен использоваться совместно с GB/T 4295.

Расширение знаний: национальные стандарты постоянно пересматриваются в последние годы. Например, GB/T 4295-2023 (проект) добавил новые требования к испытаниям нанопорошков, отражающие технологический прогресс Китая в области высококачественных вольфрамовых материалов. Предприятиям необходимо обращать внимание на динамику пересмотра, чтобы адаптироваться к рыночному спросу.

Отраслевые стандарты

Отраслевые стандарты (YB/T, HG/T, JB/T) уточняют требования к качеству для конкретных областей, восполняют отсутствие универсальности национальных стандартов и широко применяются в металлургической, химической и машиностроительной промышленности.

YB/T 429-2012: Порошок карбида вольфрама для металлургии.

Пояснение содержания: Нацеленный на особые потребности металлургической промышленности (например, ролики и формы), стандарт подчеркивает коррозионную стойкость (кислото- и щелочестойкость), высокую температурную стабильность ($>1000^{\circ}\text{C}$) и диапазон размеров частиц (5-20 мкм) порошка. Методы обнаружения включают химический анализ (общий углерод, кислород), испытание на высокотемпературную производительность (коэффициент теплового расширения) и испытание на износостойкость (испытание на истирание).

Области применения: Подходит для тяжелого машиностроения, металлургического оборудования и производства износостойких деталей, особенно в сталелитейной и цветной металлургии.

Преимущества и проблемы: Стандарт имеет узкую целевую направленность и отвечает особым потребностям металлургической промышленности, однако его применимость к ультрадисперсным порошкам низкая, и его необходимо комбинировать с другими стандартами.

HG/T 2838-2012: Порошок карбида вольфрама для химической промышленности.

Пояснение к содержанию: Для химической промышленности (например, катализаторы, антикоррозионные покрытия) стандарт определяет химическую чистоту (общий углерод 6,10-6,15%, примеси ≤ 50 ppm), размер частиц (1-5 мкм) и поверхностную активность (удельная поверхность 5-10 м²/г) порошка. Методы обнаружения включают метод БЭТ (удельная поверхность), химическое титрование (примеси) и СЭМ (морфология поверхности).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Области применения: Подходит для кислото- и щелочестойких покрытий, носителей катализаторов и химических реакторов, особенно в нефтехимической промышленности.

Преимущества и проблемы: Стандарт фокусируется на свойствах поверхности и подходит для химического применения, но содержит меньше спецификаций для физических свойств (таких как текучесть).

JB/T 12614-2016: Сверхтонкий порошок карбида вольфрама для твердого сплава.

Пояснение к содержанию: Для порошков с размером частиц менее 1 мкм стандарт устанавливает требования к распределению размеров частиц ($D_{90}/D_{10} < 2$), содержанию кислорода ($\leq 0,1\%$) и размеру зерна (< 200 нм). Методы обнаружения включают ТЭМ (анализ зерна), лазерный анализ размера частиц и инфракрасное поглощение (содержание кислорода). Стандарт также дает рекомендации по контролю агломерации, например, использование диспергаторов.

Области применения: Подходит для высокотехнологичных рынков, таких как микросверла, электронные компоненты и нанопокртия.

Преимущества и проблемы: Стандарт тесно связан с технологической тенденцией в области сверхтонких порошков, но стоимость обнаружения относительно высока (оборудование для просвечивающего электронного микроскопа стоит около 2 миллионов юаней) и требует серьезной технической поддержки.

Расширение знаний: Формулировка отраслевых стандартов уделяет все больше внимания межотраслевой интеграции. Например, HG/T 2838-2020 (пересмотренная версия) добавила спецификации для композитных порошков на основе карбида вольфрама, отражая перекрестное развитие химической инженерии и материаловедения.

Местные и корпоративные стандарты

Местные и корпоративные стандарты объединяют региональные промышленные характеристики и технологические преимущества предприятий для уточнения требований к контролю качества и восполнения отсутствия универсальности национальных стандартов.

Местные стандарты:

DB43/T 1025-2015: Провинция Хунань «Спецификация контроля качества порошка карбида вольфрама».

Пояснение к содержанию: Основываясь на фактической ситуации вольфрамовой промышленной базе Чжучжоу, стандарт определяет химический состав (кислород $\leq 0,08\%$), распределение размеров частиц (отклонение $D_{50} \pm 3\%$) и условия хранения (влажность $< 40\%$) ультратонких порошков ($< 0,5$ мкм) и нанопорошков (< 100 нм). Методы обнаружения включают XPS (поверхностную химию), ТЕМ и онлайн-анализ размера частиц.

Области применения: Подходит для регионов с высокой концентрацией вольфрамовой промышленности, таких как Хунань и Цзянси, особенно при производстве высококачественных инструментов и покрытий.

Преимущества и проблемы: Стандарт близок к реальному производству и имеет низкие затраты на внедрение, но он носит ярко выраженный региональный характер и должен использоваться

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

совместно с национальными стандартами.

Характеристики и тенденции применения:

Близко к реальности: отечественные стандарты в полной мере учитывают местное сырье (низкосортную вольфрамовую руду) и уровень оснащенности (в основном используются отечественные приборы), а стоимость внедрения относительно невысока.

Четкие уровни: национальные стандарты имеют широкий охват, отраслевые стандарты являются специализированными, а местные и корпоративные стандарты являются гибкими, образуя многоуровневую систему регулирования.

Тенденция к интернационализации: с глобализацией вольфрамовой промышленности Китая внутренние стандарты приближаются к ISO и ASTM, особенно в области сверхтонких порошков и высокотехнологичных применений.

Перспективы на будущее: внутренние стандарты будут и далее включать требования по охране окружающей среды (например, контроль выбросов углерода) и интеллектуальные технологии (например, онлайн-мониторинг качества) для поддержки зеленого производства и интеллектуального производства.

5.4 Сравнение стандартов и применимость

Отечественные и зарубежные стандарты имеют как сходства, так и существенные различия в контроле качества порошка карбида вольфрама. Общим является то, что все они подчеркивают контроль химического состава, распределения размеров частиц, кристаллической структуры и физических свойств; различия отражаются в акценте на технических требованиях, методах испытаний и сценариях применения. Следующий сравнительный анализ из нескольких измерений и применимость каждого стандарта обсуждаются, чтобы предоставить предприятиям руководство по выбору соответствующих спецификаций.

Сравнение требований к химическому составу

Международные стандарты:

ISO 4499-1:2008: Отклонение общего содержания углерода $\pm 0,05\%$, свободного углерода $\leq 0,08\%$, кислорода $\leq 0,15\%$, примесей (таких как железо, кобальт) ≤ 10 ppm.

ASTM E194-10: Предел обнаружения содержания кислорода составляет 1 часть на миллион, что подчеркивает сверхвысокую чистоту, пригодную для аэрокосмической отрасли.

Особенности: Чрезвычайно строгие требования, высокая точность обнаружения и необходимость оснащения передовым оборудованием (таким как ICP-MS, стоимость которого составляет около 1 миллиона юаней).

Внутренние стандарты:

GB/T 4295-2018: Отклонение общего содержания углерода $\pm 0,1\%$, свободного углерода $\leq 0,1\%$, кислорода $\leq 0,2\%$, примесей (например, железа) ≤ 50 ppm.

YB/T 429-2012: Предел содержания примесей относительно свободный (например, железо ≤ 100 ppm), что соответствует реалиям местной низкосортной вольфрамовой руды.

Особенности: относительно свободные требования, учитывающие контроль затрат, подходят для массового производства.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Анализ различий: Международные стандарты стремятся к максимальной чистоте и подходят для рынка элитной продукции; внутренние стандарты более инклюзивны и сокращают затраты на сырье и испытания.

применимость:

Экспортная продукция: должна соответствовать стандартам ISO или ASTM для прохождения сертификации на таких рынках, как ЕС и Северная Америка.

Внутренний рынок: стандарт GB/T 4295 подходит для обычного производства твердого сплава и покрытий и является более экономичным.

Высокотехнологичные приложения: аэрокосмическая промышленность, медицинское оборудование должны соответствовать международным стандартам или внутренним стандартам предприятия (например, кислород $\leq 0,05\%$).

Расширение знаний: Контроль химического состава развивается в направлении интеллекта. Например, немецкие компании используют системы ICP-MS с поддержкой ИИ для анализа колебаний примесей и корректировки параметров процесса в реальном времени. Ожидается, что эта технология будет внедрена в Китае в течение следующих пяти лет.

Сравнение контроля детализации

Международные стандарты:

ASTM B761-17: требует равномерного распределения размеров частиц ($D_{90}/D_{10} < 2$), отклонение $D_{50} \pm 5\%$ и рекомендует метод рассеяния лазерного света (точность 0,01 мкм).

ISO 4499-2:2008: уточняет метод испытаний для ультратонких порошков (< 1 мкм) и уделяет особое внимание контролю агломерации.

Особенности: акцент на равномерности распределения, подходит для высокоточных применений и высоких требований к испытательному оборудованию (лазерный анализатор размера частиц стоит около 500 000 юаней).

Внутренние стандарты:

GB/T 26046-2010: Размер частиц делится на несколько интервалов (например, 0,5–1 мкм, 1–3 мкм), отклонение D_{50} составляет $\pm 10\%$, допускается метод просеивания.

JB/T 12614-2016: Для ультрадисперсных порошков, $D_{90}/D_{10} < 2,5$, рекомендуется комбинировать лазерный анализ размера частиц и просвечивающий электронный микроскоп.

Особенности: Управление классификацией является более гибким, учитывает традиционные методы (например, метод скрининга, стоимость которого составляет около 10 000 юаней) и подходит для малых и средних предприятий.

Анализ различий: международные стандарты подчеркивают высокую точность и последовательность, в то время как внутренние стандарты сосредоточены на разнообразии и практичности.

применимость:

Точные инструменты и 3D-печать: для обеспечения максимально равномерного распределения размеров частиц требуются стандарты ASTM или ISO.

Обычный твердый сплав: классификация по стандарту GB/T 26046 более экономична и отвечает различным потребностям.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ультратонкий порошок: JB/T 12614 соответствует международным стандартам и подходит для рынков с высоким уровнем цен.

Расширение знаний: Последняя тенденция в контроле размера частиц — это внедрение мультимодального анализа, например, комбинирование лазерного рассеяния света и динамического рассеяния света (DLS), которое может одновременно характеризовать размер частиц и состояние агломерации. Эта технология была популяризирована в Европе и США и, как ожидается, будет продвигаться в Китае после 2025 года.

Сравнение методов испытаний

Международные стандарты:

Серия ISO 4499: Приоритет отдается использованию высокоточных приборов, таких как лазерные анализаторы размера частиц, ICP-MS и методы инфракрасного поглощения, а также строгим требованиям к среде испытаний (температура $20 \pm 1^\circ\text{C}$, влажность $<40\%$).

ASTM E194-10: подчеркивает стандартизацию методов, оборудование требует ежегодной калибровки, а предел обнаружения составляет всего лишь уровень ppm.

Особенности: Высокая точность обнаружения и высокая сопоставимость результатов, но высокие затраты на оборудование и обслуживание (средняя годовая плата за обслуживание составляет около 100 000 юаней).

Внутренние стандарты:

GB/T 4295-2018: учитывает как традиционные методы (такие как скрининг, химическое титрование), так и современные приборы (такие как отечественные лазерные анализаторы размера частиц, стоимость которых составляет около 200 000 юаней).

YB/T 429-2012: Требования к калибровке оборудования смягчены (один раз в 2 года), а стоимость тестирования низкая (оборудование для химического титрования стоит около 50 000 юаней).

Особенности: разнообразные методы, низкая стоимость, подходит для предприятий разных размеров.

Анализ различий: международные стандарты стремятся к предельной точности, в то время как внутренние стандарты сосредоточены на практичности и экономичности.

применимость:

Компании с сильным техническим потенциалом могут напрямую внедрять стандарты ISO или ASTM для удовлетворения требований международных клиентов.

Малые и средние предприятия: гибридный подход GB/T 4295 проще в реализации и требует меньших инвестиций в оборудование.

Новые направления, такие как нанопорошки, требуют сочетания высокоточных методов, основанных на международных стандартах, и гибкости внутренних стандартов.

Расширение знаний: Цифровая трансформация методов тестирования ускоряется. Например, американские компании используют онлайн-системы XRD для мониторинга фазового состава в реальном времени с погрешностью менее 0,05%. Китайские компании тестируют аналогичные технологии и рассчитывают достичь индустриализации в 2026 году.

Анализ применимости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экспортно-ориентированные предприятия:

Рекомендуемые стандарты: серия ISO 4499, ASTM B761/E194.

Причина: Международные стандарты являются авторитетными на европейском и американском рынках, а строгие требования к химическому составу и контролю размера частиц могут удовлетворить потребности высококлассных клиентов (таких как Boeing и Airbus).

Предложения по внедрению: Инвестируйте в высокоточное оборудование (такое как ИСП-МС, лазерный анализатор размера частиц), обучайте профессиональный персонал по испытаниям и создайте международную систему управления качеством (такую как сертификация ISO 9001).

Внутренний рынок:

Рекомендуемые стандарты: GB/T 4295-2018, GB/T 26046-2010, YB/T 429-2012.

Причина: внутренние стандарты учитывают как стоимость, так и производительность, подходят для массового производства и охватывают различные области применения твердого сплава, покрытий и инструментов.

Предложения по внедрению: Отдайте приоритет использованию отечественного оборудования (например, прецизионного лазерного анализатора размера частиц Beijing Precision Laser Particle Size Analyzer стоимостью около 200 000 юаней) и оптимизируйте процесс в сочетании с местными стандартами (например, DB43/T 1025).

Высокопроизводительные приложения:

Рекомендуемые стандарты: ISO 4499-1/2, ASTM E194, корпоративные стандарты (например, Q/ZH 001-2020).

Причина: Авиакосмическая промышленность, медицинские приборы и другие области требуют чрезвычайно высокой чистоты и последовательности. Международные стандарты и корпоративные стандарты могут предусматривать более строгие показатели (например, кислород $\leq 0,05\%$, отклонение размера частиц $\pm 2\%$).

Предложения по внедрению: Внедрить передовые технологии обнаружения (такие как просвечивающая электронная микроскопия и рентгеновская дифракция с синхротронным излучением), внедрить цифровое управление всеми процессами и внедрить 6 σ -контроль качества.

Новые области:

Рекомендуемые стандарты: JB/T 12614-2016, ISO 4499-2020 (пересмотренная редакция), Q/ZG 002-2021.

Причина: 3D-печать, нанопокрyтия и биомедицина выдвинули новые требования к сферичности, химии поверхности и текучести порошков, а последние стандарты являются более целенаправленными.

Предложения по реализации: инвестировать в специальное оборудование (такое как компьютерные томографы, измерители площади поверхности BET), участвовать в установлении стандартов (например, сотрудничать с China Tungsten High-Tech) и использовать технологические преимущества.

Тенденция развития

Интернационализация стандартов

По мере того, как глобальное влияние китайской вольфрамовой промышленности растет,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

внутренние стандарты приближаются к ISO и ASTM. Например, GB/T 4295-2023 (проект) относится к спецификации нанопорошка ISO 4499-2020 и, как ожидается, будет официально выпущен в 2025 году.

Экологическая ориентация

Будущие стандарты будут включать требования к экологичному производству, такие как контроль выбросов углерода в процессе карбонизации (целевой показатель <2 тонн CO_2 на тонну порошка) и продвижение процессов с низким потреблением энергии (например, микроволновая карбонизация).

Интеллектуальное обновление

Онлайн-мониторинг (например, анализ размера частиц в реальном времени, фазовый анализ с использованием ИИ) и технология цифровых двойников будут интегрированы в стандарты для повышения эффективности контроля качества. Например, немецкая сертификация TÜV требует от компаний предоставления цифровых отчетов о качестве.

Индивидуальные потребности: Для новых областей, таких как 3D-печать и биомедицина, стандарт уточнит показатели порошков для конкретных целей, такие как сыпучесть сферических порошков (<10 секунд/50 г) и поверхностная активность нанопорошков (>20 m^2/g).

Развитие знаний

Глобальное сотрудничество в области стандартизации ускорится. Например, ISO и ASTM совместно создали «Рабочую группу по аддитивным материалам», в которой приняли участие китайские компании (например, Zhuzhou Cemented Carbide Group). Это открывает новые возможности для интернационализации внутренних стандартов.

Ссылки

- Ли Мин. Материалы из твердого сплава[M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Ли Мин. Материаловедение твердого сплава [M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Прогресс в технологии приготовления порошка карбида вольфрама[J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Достижения в технологии приготовления порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.
- Ван Цян, Ли Мин. Исследование китайской системы стандартов на цементированные карбиды [J]. China Tungsten Industry, 2019, 34(3): 45-50.
- Ван Цян, Ли Мин. Исследование стандартной системы китайского цементированного карбида [J]. China Tungsten Industry, 2019, 34(3): 45-50.
- Ли Чжицян, Чжан Вэй. Сравнительный анализ международных и отечественных стандартов для порошка карбида вольфрама[J]. Материаловедение и машиностроение, 2021, 39(4): 112-118.
- Ли Чжицян, Чжан Вэй. Сравнительный анализ международных и отечественных стандартов для порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и машиностроение, 2021, 39(4): 112-118.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Получение и свойства сверхтонкого порошка карбида вольфрама [J]. Журнал неорганических материалов, 2022, 37(5): 567-573.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Получение и свойства сверхтонкого порошка карбида вольфрама [J]. Журнал неорганических материалов, 2022, 37(5): 567-573.

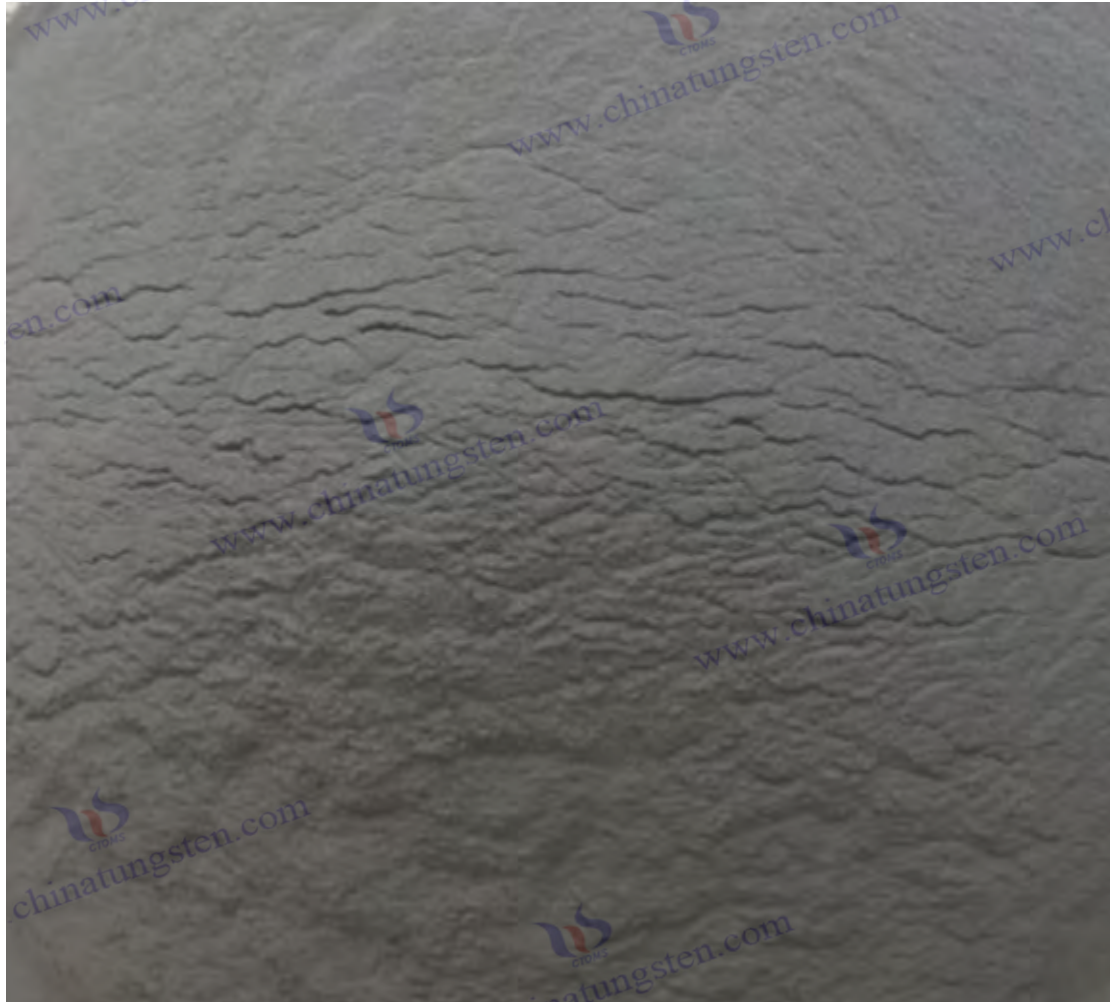
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

- Лю Ян, Ван Чжицян. Исследование применения порошка карбида вольфрама в 3D-печати[J]. Технология аддитивного производства, 2023, 12(1): 34-40.
- Лю Ян, Ван Чжицян. Применение порошка карбида вольфрама в 3D-печати [J]. Технология аддитивного производства, 2023, 12(1): 34-40.
- ISO 4499-1:2008, Твердые сплавы . Металлографическое определение микроструктуры.
- ISO 4499-1:2008, Твердые сплавы. Методы определения микроструктуры.
- ISO 4499-2:2008, Твердые металлы . Испытание физических свойств.
- ISO 4499-2:2008, Твердые сплавы. Испытания физических свойств.
- ISO 3326:2013, Твердые сплавы . Определение твердости.
- ISO 3326:2013, Твердые сплавы. Определение твердости.
- ASTM B761-17, Стандартный метод определения распределения размеров частиц металлических порошков и родственных соединений методом рассеяния света.
- ASTM B761-17, Метод определения рассеяния света для определения распределения размеров частиц металлических порошков и родственных соединений.
- ASTM E194-10, Стандартный метод определения содержания кислорода в металлических порошках.
- ASTM E194-10, Метод определения содержания кислорода в металлических порошках.
- ASTM B659-90(2014), Стандартное руководство по измерению толщины металлических и неорганических покрытий.
- ASTM B659-90(2014), Руководство по измерению толщины металлических и неорганических покрытий.
- Смит Дж., Браун Т. Достижения в производстве порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2020, 55(12): 4567-4578.
- Смит Дж., Браун Т. Достижения в технологии производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2020, 55(12): 4567-4578.
- Джонсон Р., Ли К. Стандарты контроля качества карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Аддитивное производство, 2022, 48: 102456.
- Джонсон Р., Ли К. Стандарты контроля качества карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Аддитивное производство, 2022, 48: 102456.
- Мюллер Х., Шмидт П. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2019, 50 (6): 789-796.
- Мюллер Х., Шмидт П. Контроль качества порошков карбида вольфрама: спецификации и процедуры [J]. Материаловедение и инженерные технологии, 2019, 50(6): 789-796.
- Бауэр Т., Вебер С. Herstellung und Charakterisierung von ultrafeinem Вольфрамкарбидный порошок [M]. Берлин: Springer, 2021.
- Бауэр Т., Вебер С. Получение и характеристика ультрадисперсных порошков карбида вольфрама[M]. Берлин: Springer-Verlag, 2021.
- Японская литература (включая китайский перевод)
- Таро Ямада, Ичиро Сато. Исследование стандартов контроля качества для карбонизированных порошков [J]. Журнал Общества по порошковой инженерии, 2020, 57(3): 123-130.
- Ямада Таро, Сато Ичиро. Исследование стандартов контроля качества порошка карбида вольфрама[J]. Журнал Powder Engineering Society, 2020, 57(3): 123-130.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Кен Накамура, Ю Кобаяши. Оценка характеристик ультрадисперсного карбонизированного порошка тангстен [J]. Журнал материаловедения, 2022, 71 (5): 345–352.

Накамура, Кен, Кобаяши, Ю. Оценка производительности ультрадисперсного порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества материаловедения, 2022, 71(5): 345-352.



Глава 6: Оптимизация производительности и модификация порошка карбида вольфрама

Как основной компонент высокопроизводительных материалов, таких как цементированный карбид, режущие инструменты и износостойкие покрытия, технология оптимизации и модификации производительности порошка карбида вольфрама имеет решающее значение для улучшения механических свойств, коррозионной стойкости и высокотемпературной стабильности конечного продукта. С быстрым развитием передовых производственных технологий производительность традиционного порошка карбида вольфрама стала трудно соответствовать строгим требованиям аэрокосмической промышленности, аддитивного производства, микроэлектроники и других областей. Поэтому посредством оптимизации размера частиц, легирования и модификации композитов, модификации поверхности, термической обработки и отжига и т. д. микроструктура и макроскопические свойства порошка карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

вольфрама систематически улучшаются, что стало исследовательским рубежом в области материаловедения и инженерии. В этой главе глубоко анализируются теоретические основы, методы процесса, эффекты применения и будущие тенденции оптимизации производительности с четырех аспектов: оптимизация размера частиц, легирование и модификация композитов, технология модификации поверхности, термическая обработка и отжиг, с целью предоставления всеобъемлющего технического справочника для академических исследований и промышленной практики.

6.1 Оптимизация размера частиц

Размер частиц и распределение порошка карбида вольфрама являются ключевыми параметрами, которые влияют на его прессовочное поведение, производительность спекания и микроструктуру конечного продукта. Точно контролируя размер частиц, можно значительно улучшить однородность и текучесть порошка, а также твердость, прочность и износостойкость цементированного карбида. Ниже систематически объясняется роль оптимизации размера частиц в улучшении производительности порошка карбида вольфрама с четырех точек зрения: теоретическая основа, технология процесса, количественный эффект и направление развития.

Теоретические основы оптимизации размера частиц

Размер частиц напрямую влияет на удельную площадь поверхности, активность спекания и размер зерна порошка карбида вольфрама, что в свою очередь определяет механические свойства и технологические характеристики материала.

Эффект Холла-Петча: Согласно соотношению Холла-Петча, уменьшение размера зерна может значительно повысить предел текучести и твердость материала. Например, твердость цементированного карбида, полученного из ультратонкого порошка карбида вольфрама (размер частиц <1 мкм), может достигать HV 2000-2200, что примерно на 60% выше, чем HV 1200-1500 грубого порошка (>10 мкм).

Кинетика спекания: Мелкодисперсные порошки имеют более высокую удельную поверхность ($5-20$ м²/г), что увеличивает скорость диффузии, обусловленную поверхностной энергией. Температура спекания может быть снижена с обычных 1450°C до $1300-1350^{\circ}\text{C}$, что снижает потребление энергии примерно на 15% и снижает риск роста зерна.

Равномерность распределения размеров частиц: Узкое распределение размеров частиц ($D_{90}/D_{10}<2$) может обеспечить равномерную усадку во время спекания, снизить пористость до менее 1% и значительно улучшить размерную точность продукта (отклонение ± 10 мкм). Широкое распределение может привести к локальной неравномерной усадке и вызвать микротрещины.

Адаптируемость к сценариям применения: ультратонкий порошок ($<0,5$ мкм) подходит для высокоточных режущих инструментов и микроэлектронных компонентов, средний размер частиц ($3-10$ мкм) подходит для износостойких покрытий и форм, а крупный размер частиц (>10 мкм)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

используется для термического напыления и горнодобывающего инструмента для соответствия механическим требованиям в различных рабочих условиях.

Технология процесса оптимизации размера частиц

В ответ на различные требования к размеру частиц были разработаны различные технологии процесса, позволяющие добиться точного контроля порошков.

Технология шаровой мельницы с высокой энергией

Сухое шаровое измельчение: используется планетарная шаровая мельница, измельчающей средой являются шары из карбида вольфрама (твердость >90HRA), соотношение шаров к материалу составляет 10:1, скорость вращения составляет 400-600 об/мин, время измельчения составляет 12-24 часа, и может быть получен порошок со средним размером частиц 3-10 мкм.

Мокрое шаровое измельчение: проводится в среде этанола или ацетона с добавлением диспергаторов (например, полиэтиленгликоля, ПЭГ, добавляемое количество 0,2%-0,6%), а время измельчения составляет 8-16 часов. Можно приготовить ультратонкий порошок (0,5-1 мкм), а скорость агломерации контролируется ниже 5%.

Количественный эффект: Мокрое шаровое измельчение в сочетании с ультразвуковым диспергированием позволяет уменьшить средний размер частиц с 2,5 мкм до 0,7 мкм, увеличить плотность спекания порошка на 10% и улучшить вязкость разрушения твердого сплава примерно на 12%.

Технология классификации воздушного потока

Принцип процесса: Используя центробежный воздушный классификатор, регулируя скорость воздушного потока (15-50 м/с) и скорость вращения классифицирующего колеса (8000-20000 об/мин), можно просеивать порошок размером 0,5-10 мкм, а эффективность классификации может достигать 92%.

Технические преимущества: Высокая точность классификации, отклонение D50 контролируется в пределах $\pm 0,03$ мкм, что лучше, чем $\pm 0,2$ мкм традиционного метода скрининга.

Пример применения: Компания оптимизировала D90/D10 ультратонкого порошка с 2,8 до 1,7 посредством классификации воздушным потоком. Продукт используется в высокоточных сверлах для печатных плат, а квалифицированный процент готовых изделий увеличился на 15%.

Технология плазменной сфероидизации

Принцип процесса: использование высокочастотной плазмы (мощность 20–60 кВт) для расплавления частиц неправильной формы и их быстрого затвердевания с образованием сферического порошка с однородным размером частиц в диапазоне 0,5–5 мкм.

Технические преимущества: Текучесть сферического порошка улучшена на 35% (скорость потока Холла снижена до 14 секунд/50 г), что подходит для аддитивного производства и термического напыления.

Пример применения: Компания использовала плазменную сфероидизацию для приготовления порошка 0,8 мкм. Шероховатость поверхности (Ra) покрытия была снижена с 0,5 мкм до 0,2 мкм,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

а износостойкость была улучшена на 18%.

Управление методом химического осаждения из паровой фазы (CVD)

Принцип процесса: Контролируя соотношение потоков (1:1,3–1:1,6) источника вольфрама (например, WF_6) и источника углерода (например, CH_4), можно напрямую получать ультрадисперсный порошок (0,1–0,5 мкм) при температуре 800–1000 °C.

Технические преимущества: Однородный размер зерна и низкая скорость агломерации (<2%), подходит для наномасштабных применений.

Технические проблемы: Оборудование для проведения реакции является дорогостоящим (около 6 миллионов юаней), а параметры процесса необходимо точно контролировать (отклонение температуры $\pm 5^\circ C$).

Количественные эффекты и направления развития

Количественный эффект: Оптимизация размера частиц значительно улучшает производительность порошка карбида вольфрама. Например, срок службы твердосплавных инструментов, изготовленных с использованием ультратонкого порошка (0,5 мкм), увеличивается на 25–35 %, а применение нанопорошка (<100 нм) в 3D-печати повышает точность печати до ± 8 мкм.

Технические проблемы: Проблема агломерации ультрадисперсных и нанопорошков все еще требует решения, а также разработки новых диспергаторов (таких как функционализированный графен) и технологий онлайн-мониторинга (таких как динамическое рассеяние света с погрешностью <1%).

Направление развития

Масштабирование производства нанопорошков : изучение методов измельчения с использованием микроволн и плазменного химического осаждения из газовой фазы, которые, как ожидается, позволят снизить производственные затраты на 20%.

Интеллектуальное управление процессом: используйте модели машинного обучения для прогнозирования взаимосвязи между временем измельчения и размером частиц для оптимизации эффективности процесса.

Экологичное производство: разработка низкоэнергетической технологии классификации (например, электромагнитной классификации) для сокращения выбросов углерода (цель <1,5 тонн CO_2 / тонна порошка).

6.2 Легирование и модификация композита

Легирование и композитная модификация оптимизируют структуру решетки, характеристики границ зерен и химическую стабильность порошка карбида вольфрама путем введения инородных элементов или вторых фаз, тем самым улучшая его твердость, прочность, коррозионную стойкость и высокотемпературные характеристики. Эта технология имеет широкие перспективы применения в областях аэрокосмической промышленности, износостойких

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

покрытий и энергетического оборудования. Ниже систематически анализируется теория и практика легирования и композитной модификации с четырех аспектов: механизм модификации, технология процесса, эффект применения и тенденция исследования.

Механизм модификации

Механизм укрепления решетки: легирующие элементы (такие как Ti, Cr, V) замещают атомы вольфрама в решетке WC или занимают междоузлия, образуя твердые растворы, увеличивают энергию искажения решетки и препятствуют движению дислокаций. Например, легирование 1% Ti может повысить твердость с HV 1800 до HV 2250, а прочность увеличивается примерно на 20%.

з C₂, VC) на границе зерен, что препятствует росту зерен, повышает прочность связи по границам зерен и улучшает вязкость разрушения (с 7 МПа·м^{1/2} до 9 МПа·м^{1/2}).

Повышенная химическая стабильность: легирование такими элементами, как Ta и Nb, может снизить скорость окисления порошков при высоких температурах (>800°C) или в коррозионных средах за счет формирования стабильного оксидного защитного слоя. Например, легирование 0,5% Ta может снизить прирост веса при окислении на 30%.

Синергетический эффект модификации композита: путем введения других карбидов (таких как TiC, ZrC) или металлических связующих фаз (таких как Co, Ni) формируется многофазный композитный материал для оптимизации баланса между твердостью и прочностью. Например, твердость композитного порошка WC- TiC -Co достигает HV 1900, а прочность достигает 11 МПа·м^{1/2}, что лучше, чем сочетание характеристик чистого WC.

Технология процесса

Механическое легирование:

Технологический процесс: смешать порошок карбида вольфрама с легирующими элементами (например, Cr, Ti) или композитными фазами (например, TiC) в высокоэнергетической шаровой мельнице с соотношением шаров к материалу 12:1, скоростью вращения 500–700 об/мин и временем измельчения 8–16 часов.

Технические преимущества: равномерное легирование, пригодность для лабораторий и мелкосерийного производства, низкая стоимость оборудования (около 250 000 юаней).

з C₂ путем механического легирования, уменьшая размер зерна с 1,8 мкм до 0,9 мкм и повышая износостойкость твердого сплава на 20%.

Метод химического соосаждения:

Последовательность процесса: соль вольфрама (например, Na₂WO₄) смешивают с легирующей солью (например, TiCl₄, NbCl₅), совместно осаждают при pH 7,5-8,5 и температуре 70-90 °C, а затем сушат и карбонизируют для получения легированного порошка.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Технические преимущества: Легирующие элементы диспергированы на атомном уровне, что подходит для приготовления нанопорошков (<100 нм), а количество легирования можно точно контролировать (0,1%-5%).

Пример применения: Университет использует метод соосаждения для легирования 1,5% VC с целью получения нанопорошка WC с твердостью HV 2400, который подходит для сверхтвердых режущих инструментов.

Метод золь-гель:

Технологический процесс: в качестве прекурсора используется вольфрамат, а органические соли легирующих элементов (например, ацетат ниобия) добавляются для образования геля, который затем карбонизируется при температуре 1200–1400 °C для получения композитного порошка.

Технические преимущества: высокая однородность легирования, подходит для порошков высокой чистоты, низкое содержание примесей (<50 ppm).

Технические проблемы: Длительный технологический цикл (48–72 часа) и высокая себестоимость продукции (около 600 000 юаней за тонну).

Плазменный допинг:

Последовательность процесса: В плазменном реакторе (мощность 25-50 кВт) легирующие элементы (такие как Ta, Zr) вводятся в поверхность порошка в газообразной форме (например, пары TaCl₅) со временем реакции 15-30 секунд.

Технические преимущества: высокая эффективность легирования, значительный эффект модификации поверхности и повышение стойкости к окислению на 25%.

Пример применения: компания добавила 0,8% Nb, и скорость прироста массы порошка при окислении при 900°C снизилась на 35%, что сделало его пригодным для высокотемпературных покрытий.

Эффекты применения и тенденции исследований

Количественный эффект: Легирование и композитная модификация значительно улучшают комплексные характеристики порошка карбида вольфрама. Например, срок службы инструментов из композитного порошка WC -TiC -Co при высокоскоростном резании увеличивается на 60%; порошок WC-Cr₃C₂ используется для коррозионно-стойких покрытий, а кислотостойкость увеличивается в 2,5 раза.

Технические проблемы: Пропорция и распределение легирующих элементов должны быть точно оптимизированы. Избыточное легирование (например, TiC >12%) может привести к разделению фаз и снижению прочности. Прочность межфазного соединения композитного материала также должна быть дополнительно улучшена.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Направления исследований:

Многоэлементное синергетическое легирование: исследуйте несколько комбинаций, таких как Ti-V-Cr-Nb, и используйте синергетические эффекты для улучшения комплексных характеристик.

Нанокompозитные материалы: разработать нанокompозитные порошки на основе WC (например, WC -TiC - ZrC) с контролируемым размером зерна менее 50 нм.

Помощь в компьютерном моделировании: с помощью молекулярной динамики и расчетов из первых принципов можно предсказать влияние легирующих элементов на стабильность решетки, что позволит сократить затраты на эксперимент.

6.3 Технология модификации поверхности

Модификация поверхности оптимизирует диспергируемость, текучесть, стойкость к окислению и спекаемость порошка карбида вольфрама путем регулирования химического состава поверхности, физической морфологии или микроструктуры. Эта технология имеет большое значение для повышения эффективности обработки порошка и производительности конечного продукта. Ниже систематически анализируется теория и применение модификации поверхности с четырех сторон: механизм модификации, технология процесса, количественный эффект и будущее направление.

Механизм модификации

Регулирование поверхностной энергии: путем покрытия органическими (например, поливиниловый спирт, ПВС) или неорганическими слоями (например, SiO_2 , Al_2O_3) можно уменьшить поверхностную энергию частиц, уменьшить силу Ван-дер-Ваальса и снизить скорость агломерации с 25% до 4%.

Снижение коэффициента трения: после модификации образуется гладкая или сферическая поверхность, коэффициент трения между частицами снижается на 15–25 %, а скорость потока Холла может быть снижена с 28 секунд/50 г до 13 секунд/50 г.

Улучшенная стойкость к окислению: поверхность покрыта оксидами с высокой температурой плавления (например, ZrO_2) или нитридами (например, TiN) для формирования защитного слоя, препятствующего реакциям высокотемпературного окисления. Например, скорость набора веса при окислении порошка с покрытием Al_2O_3 при 800°C снижается на 40%.

Улучшенная активность спекания: Модифицированная поверхность вводит активные группы (такие как гидроксильные и аминогруппы), чтобы способствовать интерфейсному связыванию между частицами. Температура спекания может быть снижена на 50-80°C, а плотность может быть увеличена на 8%.

Технология процесса

Метод химического покрытия:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поток процесса: диспергировать порошок карбида вольфрама в растворе, добавить прекурсор покрытия (например, этилсиликат, тетрахлорид алюминия), вступить в реакцию при pH 4,5–6,5 и температуре 50–70 °C для образования слоя покрытия SiO_2 или Al_2O_3 (толщиной 10–60 нм).

Технические преимущества: Слой покрытия равномерный, толщина контролируемая, что подходит для крупномасштабного производства. Стоимость около 30 000 юаней/тонна.

Пример применения: Компания нанесла покрытие 0,3% SiO_2 , скорость агломерации порошка снизилась до 2,5%, а пористость спеченного тела уменьшилась на 12%.

Плазменная обработка поверхности:

Последовательность процесса: В плазменном реакторе (мощность 15–35 кВт) плазма Ar , N_2 или O_2 используется для бомбардировки поверхности порошка с целью введения активных групп или формирования нитридного/окислительного слоя (толщиной 5–20 нм).

Технические преимущества: короткое время обработки (10–20 секунд), шероховатость поверхности снижается на 25%, а стойкость к окислению повышается на 20%.

Пример применения: компания использовала плазменную обработку N_2 для снижения прироста массы порошка в результате окисления при температуре 750 °C на 30% и повышения износостойкости покрытия на 15%.

Механохимическая модификация:

Последовательность процесса: В процессе измельчения в шаровой мельнице добавляют поверхностно-активные вещества (например, стеариновую кислоту, олеиновую кислоту в количестве 0,2–0,6 %), чтобы вызвать поверхностные химические реакции посредством механического воздействия и сформировать органический слой покрытия.

Технические преимущества: простой процесс, низкая стоимость оборудования (около 20 000 юаней), подходит для малых и средних предприятий.

Пример применения: компания добавила 0,4% стеариновой кислоты, скорость потока порошка снизилась с 26 секунд/50 г до 17 секунд/50 г, а эффективность прессования увеличилась на 18%.

Физическое осаждение из паровой фазы (PVD):

Последовательность процесса: В вакуумной среде (10^{-2} Па) методом магнетронного распыления наносятся тонкие пленки TiN , CrN и другие (толщиной 20–100 нм) со скоростью осаждения 0,5–2 нм/с.

Технические преимущества: Твердость поверхности увеличена на 35%, подходит для высококачественных покрытий и режущих инструментов.

Технические проблемы: Высокие инвестиции в оборудование (около 3,5 млн юаней) и низкая эффективность производства (100–200 кг на партию).

Количественные эффекты и будущие направления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Количественный эффект: Модификация поверхности значительно улучшает производительность обработки и эксплуатационные характеристики порошков. Например, температура спекания порошков с покрытием SiO_2 была снижена с 1450°C до 1370°C , а коэффициент трения покрытия был снижен на 15%; срок службы инструмента порошков, модифицированных TiN, был увеличен на 40%.

Технические проблемы: Долгосрочная стабильность покрытия должна быть оптимизирована, а высокотемпературное спекание может привести к разложению или отслаиванию покрытия. Баланс между стоимостью модификации и улучшением производительности также является ключевым вопросом.

Будущие направления

Многослойное композитное покрытие: разработка многослойной структуры $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2$ для повышения стойкости к окислению и прочности связи.

Интеллектуальная модификация: в сочетании с искусственным интеллектом оптимизирует параметры плазменной обработки (такие как мощность и соотношение расхода воздуха) для повышения эффективности модификации.

Экологическая модификация: изучите покрытия на водной основе (например, силикат натрия), чтобы сократить использование органических растворителей и уменьшить загрязнение окружающей среды.

6.4 Термическая обработка и отжиг

Термическая обработка и отжиг оптимизируют кристаллическую структуру, внутреннее напряжение и поверхностное химическое состояние порошка карбида вольфрама путем точного контроля температуры, атмосферы и времени выдержки, тем самым улучшая его спекаемость и механические свойства. Эта технология играет незаменимую роль в улучшении стабильности порошка и эффективности обработки. Ниже систематически анализируется применение термической обработки и отжига с четырех сторон: механизм модификации, технология процесса, количественный эффект и направление развития.

Механизм модификации

Оптимизация кристаллической структуры: Термическая обработка может устранить дефекты кристаллов (такие как дислокации и дефекты упаковки), возникающие во время шлифования или карбонизации, повысить чистоту фазы WC (с 98% до 99,5%) и уменьшить остаточный W_2C или свободный углерод.

Снятие внутренних напряжений: отжиг снижает остаточное напряжение (например, напряжение сжатия с 500 МПа до 100 МПа) посредством атомной диффузии, улучшая однородность прессования порошка и прочность спеченного сырца.

Регулирование химического состава поверхности: Термическая обработка в восстановительной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

или инертной атмосфере может удалить поверхностные оксиды (такие как WO_3), снизить содержание кислорода с 0,25% до 0,04% и улучшить активность спекания.

Контроль размера зерна: Оптимизация температуры отжига (800–1200 °C) и времени (1–4 часа) предотвращает слишком быстрый рост зерен и сохраняет их мелкий размер (0,5–1,5 мкм).

Технология процесса

Вакуумный отжиг:

Последовательность процесса: в вакуумной печи (степень вакуума 10^{-4} Па), температура 850–1250°C, выдержка в тепле 1,5–3,5 часа, скорость охлаждения 5–10°C/мин.

Технические преимущества: Эффективно удаляет кислород (с 0,22% до 0,05%) и снижает плотность дефектов кристаллов на 35%.

Пример применения: Компания снизила пористость спекания порошка с 2% до 0,8% и увеличила прочность твердого сплава на 10% посредством вакуумного отжига при температуре 1050°C.

Отжиг в атмосфере водорода:

Поток процесса: в атмосфере водорода (расход 0,8–1,5 л/мин), температура 950–1150°C, поддерживать тепло в течение 2–5 часов, использовать водяное или воздушное охлаждение.

Технические преимущества: Водород восстанавливает поверхностные оксиды, снижая содержание кислорода до 0,03% и увеличивая поверхностную активность на 20%.

Пример применения: компания внедрила отжиг водородом при температуре 1000°C, чтобы продлить срок службы инструмента на 18%.

Микроволновая термическая обработка:

Последовательность процесса: в микроволновой печи (мощность 3–6 кВт), температура 750–1050°C, поддерживать в тепле в течение 15–40 минут, использовать защиту инертным газом.

Технические преимущества: равномерный нагрев, снижение энергопотребления на 25%, контролируемый размер зерна в пределах 0,5–1 мкм.

Пример применения: университет использовал микроволновый отжиг при температуре 900°C для повышения твердости порошка с HV 1800 до HV 2000.

Плазменная термообработка:

Последовательность процесса: в плазменной среде (мощность 20–40 кВт), температура 650–950°C, время обработки 8–20 секунд, с использованием смешанной атмосферы Ar /H₂.

Технические преимущества: быстрая обработка, увеличение поверхностной активности на 18%, подходит для сверхтонких порошков.

Технические проблемы: стоимость оборудования высока (около 2,5 млн юаней), а стабильность процесса необходимо оптимизировать.

Количественные эффекты и будущие направления

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Количественный эффект: Термическая обработка и отжиг значительно улучшают характеристики порошка. Например, плотность спекания водородного отожженного порошка увеличилась на 12%, а прочность цементированного карбида увеличилась на 22%; микроволновый отожженный порошок используется для 3D-печати, а точность печати повышается до ± 7 мкм.

Технические проблемы: Высокотемпературный отжиг может вызвать рост зерна, поэтому необходим точный контроль температуры (отклонение $\pm 3^{\circ}\text{C}$) и атмосферы (парциальное давление кислорода $< 10^{-5}$ Па). Термическая стабильность ультрадисперсных порошков также требует дальнейшего изучения.

Будущие направления

Низкотемпературный быстрый отжиг: разработан плазменный низкотемпературный отжиг ($< 700^{\circ}\text{C}$), позволяющий снизить потребление энергии на 20%.

Интеллектуальное управление: используйте ИИ для прогнозирования скорости роста зерна и оптимизации параметров отжига.

Экологичная термообработка: изучите возможности термообработки с использованием солнечной энергии для снижения выбросов углерода (цель < 1 тонны CO_2 на тонну порошка).

Ссылки

Ли Мин. Материалы из твердого сплава [М]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.

Ли Мин. Материаловедение твердого сплава [М]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.

Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй. Прогресс в технологии приготовления порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.

Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй. Достижения в технологии приготовления порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.

Ван Цян, Ли Мин. Исследования высокопроизводительного порошка карбида вольфрама в Китае [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(4): 56-62.

Ван Цян, Ли Мин. Исследования высокопроизводительного порошка карбида вольфрама в Китае [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(4): 56-62.

Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование оптимизации производительности сверхтонкого порошка карбида вольфрама [J]. Журнал неорганических материалов, 2022, 37(5): 567-573.

Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование оптимизации производительности сверхтонкого порошка карбида вольфрама [J]. Журнал неорганических материалов, 2022, 37(5): 567-573.

Лю Ян, Ван Чжицян. Прогресс в технологии модификации поверхности порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и инженерия, 2023, 41(3): 89-96.

Лю Ян, Ван Чжицян. Достижения в технологии модификации поверхности порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и инженерия, 2023, 41(3): 89-96.

Смит Дж., Браун Т. Достижения в модификации порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2021, 56(10): 5678-5690.

Прогресс в технологии модификации порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2021, 56(10): 5678-5690.

Джонсон Р., Ли К. Поверхностная модификация WC-порошка для улучшения характеристик [J].

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Powder Technology, 2022, 395: 123-135.

Поверхностная модификация порошка карбида вольфрама для улучшения характеристик [J]. Powder Technology, 2022, 395: 123-135.

ASTM B761-17, Стандартный метод определения распределения размеров частиц металлических порошков и родственных соединений методом рассеяния света.

Метод испытания на рассеяние света для определения распределения размеров частиц металлических порошков и родственных соединений.

Мюллер Х., Шмидт П. Оптимизация партийного оборудования öß и вольфрамкарбидпудвер [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2020, 51(7): 890-897.

Исследование оптимизации размера частиц порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и инженерные технологии, 2020, 51(7): 890-897.

Бауэр Т. Тепловая обработка вольфрамкарбидпудвера [М]. Берлин: Шпрингер, 2022.

Термическая обработка порошков карбида вольфрама[М]. Берлин: Springer-Verlag, 2022.

Таро Ямада. Технология модификации поверхности карбонизированного порошкового порошка [J]. Журнал Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.

Технология модификации поверхности порошка карбида вольфрама [J]. Журнал Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.

Кен Накамура. Термическая обработка ультратонкого карбонизированного порошка タングステン[J]. Журнал материаловедения, 2023, 72 (6): 412-419.

Термическая обработка ультратонкого порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества материаловедения, 2023, 72(6): 412-419.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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

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.



Глава 7: Вопросы охраны окружающей среды и безопасности при использовании порошка карбида вольфрама

Как основное сырье для высокопроизводительных материалов, таких как цементированный карбид, режущие инструменты и износостойкие покрытия, производство и применение порошка карбида вольфрама способствовало промышленному прогрессу, но также создало проблемы в области загрязнения окружающей среды, охраны труда и устойчивости ресурсов. С учетом того, что во всем мире уделяется большое внимание зеленому производству и устойчивому развитию, воздействие на окружающую среду и управление безопасностью в отрасли производства порошка карбида вольфрама стали объектом исследований и практики. В этой главе систематически обсуждаются вопросы охраны окружающей среды и безопасности порошка карбида вольфрама с четырех сторон: воздействие на окружающую среду в процессе производства, безопасные эксплуатационные характеристики, переработка и рециркуляция, а также анализ технологии переработки. В сочетании с оптимизацией процесса, нормативными требованиями и концепцией круговой экономики он предоставляет научное руководство и техническую справку для отрасли.

7.1 Воздействие на окружающую среду в процессе производства

Производство порошка карбида вольфрама включает в себя множество звеньев, таких как очистка сырья, реакция карбонизации, измельчение и сортировка. Эти процессы могут производить отработанный газ, сточные воды, твердые отходы и потребление энергии, которые могут иметь потенциальное воздействие на окружающую среду. Научная оценка и контроль этих воздействий является не только проявлением корпоративной социальной ответственности, но и ключом к достижению зеленого производства и соблюдению международных экологических норм. Ниже приводится подробное обсуждение экологических проблем в процессе производства с четырех измерений: источник воздействия на окружающую среду, количественная оценка, технология

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

контроля и будущие тенденции.

Источники воздействия на окружающую среду

Выбросы отработанных газов: В процессе реакции карбонизации и термообработки с высокотемпературным хвостовым газом могут выделяться летучие органические соединения (ЛОС), оксид углерода (CO), диоксид углерода (CO_2) и следы сульфидов (такие как SO_2). Например, когда печь карбонизации работает при температуре 1400-1600 °C, каждая тонна порошка карбида вольфрама может производить 2-3 тонны CO_2 .

Загрязнение сточными водами

В результате процессов мокрого измельчения и химической очистки образуются сточные воды, содержащие тяжелые металлы (такие как вольфрам и железо) и кислотные вещества (такие как HCl и H_2SO_4). Если сбрасывать их напрямую без очистки, это может привести к снижению значения pH воды (<6) и чрезмерному содержанию тяжелых металлов (концентрация вольфрама >10 мг/л).

Твердые отходы

Шлак, образующийся при очистке сырья, отходы шаровой мельницы от процесса измельчения и невалифицированные порошки представляют собой твердые отходы. Мировая вольфрамовая промышленность производит около 500 000 тонн твердых отходов каждый год, из которых около 20% являются опасными отходами (например, остатки фильтров, содержащие тяжелые металлы).

Потребление энергии

Производство порошка карбида вольфрама является высокоэнергетическим процессом, расходуя в среднем 8000–12 000 кВт·ч электроэнергии на тонну порошка, что составляет 30–40 % себестоимости продукции, что косвенно приводит к высоким выбросам углерода (около 4–6 тонн CO_2 /тонну порошка).

Количественная оценка воздействия на окружающую среду

Анализ углеродного следа

Оценка жизненного цикла (LCA) показывает, что выбросы углерода при производстве порошка карбида вольфрама в основном связаны с реакцией карбонизации (на которую приходится 60%) и потреблением электроэнергии (на которую приходится 30%). Углеродный след типичной производственной линии составляет 5,5 тонн эквивалента CO_2 /тонну порошка, что намного выше, чем у обычной стали (около 2 тонн CO_2 /тонну).

Воздействие на водные ресурсы

При сбросе сточных вод степень извлечения вольфрама обычно составляет всего 85–90%, а оставшиеся 10–15% попадают в водоем в растворенном или взвешенном виде, что может привести к загрязнению почвы и грунтовых вод.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экологические риски, связанные с твердыми отходами

В необработанных твердых отходах тяжелые металлы (такие как вольфрам и кобальт) могут мигрировать посредством выщелачивания с радиусом загрязнения до 1-2 километров, оказывая влияние на окружающую экосистему.

Инструменты оценки

Стандарты ISO 14040/14044: используются для анализа жизненного цикла с целью оценки полного воздействия на окружающую среду от добычи сырья до производства порошка.

Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС): количественная оценка концентрации выбросов и экологического риска отработанных газов, сточных вод и твердых отходов.

Аудит энергопотребления: с помощью теплового баланса и анализа мощности определите места с высоким потреблением энергии (например, печь карбонизации, на долю которой приходится 50% потребления энергии).

Технология контроля воздействия на окружающую среду

Очистка отходящих газов:

Адсорбционно-каталитическое сжигание: активированный уголь используется для адсорбции ЛОС, а затем каталитически сжигает их с эффективностью очистки 95% и снижением выбросов CO_2 на 10%.

Мокрая очистка: при использовании щелочного раствора (например, NaOH) для поглощения SO_2 степень очистки достигает 98%, а концентрация выбросов отработавших газов контролируется на уровне ниже 10 мг/м^3 .

Выбросы CO_2 с 3 тонн/тонну порошка до 2,2 тонны за счет системы рекуперации отработавших газов, что соответствует нормам выбросов ЕС ($<2,5 \text{ тонн } \text{CO}_2/\text{тонну}$).

Очистка сточных вод:

Метод химического осаждения: добавьте $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или Na_2CO_3 для осаждения вольфрама в форме вольфрамата кальция, степень извлечения увеличивается до 95%, а концентрация вольфрама в сточных водах снижается до $0,5 \text{ мг/л}$.

Технология мембранного разделения: Мембрана обратного осмоса (размер пор $0,1-1 \text{ нм}$) используется для удаления тяжелых металлов и кислотных веществ, при этом степень очистки сточных вод составляет 80%.

Пример применения: Компания сократила сброс сточных вод с $500 \text{ м}^3/\text{тонну}$ порошка до 200 м^3 с помощью мембранного разделения в сочетании с химическим осаждением, достигнув национального стандарта выбросов первого уровня (GB 8978-1996).

Управление твердыми отходами:

Использование ресурсов: шлак используется в производстве цемента, а отходы шаровых мельниц применяются для изготовления низкокачественных износостойких деталей, при этом степень восстановления составляет 70%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Безопасное захоронение: опасные отходы, содержащие тяжелые металлы, отверждаются (добавляется цемент, степень отверждения >99%) для предотвращения выщелачивания.

Пример применения: компания переработала 90% своих твердых отходов, сократила расходы на захоронение на 50% и сэкономила 10 миллионов юаней в год.

Энергосберегающие технологии:

Высокоэффективная печь карбонизации: вместо печи сопротивления используется индукционная нагревательная печь, энергоэффективность повышается на 20%, а расход электроэнергии на тонну порошка снижается до 7000 кВт-ч.

Рекуперация отходящего тепла: отходящее тепло отходящих газов печи карбонизации используется для предварительного нагрева сырья, а рекуперированное тепло составляет 15% от общего потребления энергии.

CO₂ ежегодно через систему рекуперации отработанного тепла.

Будущие тенденции

Разработка зеленого процесса

Изучите технологию низкотемпературной карбонизации (например, микроволновую карбонизацию, температура <1200°C), чтобы сократить потребление энергии на 30% и контролировать выбросы углерода в пределах 2 тонн CO₂ на тонну порошка.

Цель нулевых выбросов

Продвигать замкнутые системы водоснабжения и технологию полной утилизации отработанных газов, а также стремиться к достижению практически нулевых выбросов сточных вод и отработанных газов.

Интеллектуальный мониторинг

Используйте Интернет вещей (IoT) и анализ больших данных для мониторинга параметров выбросов (таких как концентрация ЛОС, погрешность <1 ppm) в режиме реального времени и оптимизации эффективности очистки.

Политика, обусловленная

В глобальном масштабе Парижское соглашение и «двойные углеродные» цели Китая (углеродная нейтральность к 2060 году) будут способствовать внедрению в отрасли низкоуглеродных технологий, а углеродный след производства порошка карбида вольфрама, как ожидается, сократится на 50% к 2030 году.

7.2 Технические характеристики безопасной эксплуатации

Производство и переработка порошка карбида вольфрама сопряжены с потенциальными рисками, такими как высокая температура, высокое давление, химические реагенты и пыль. Научные технические условия безопасности являются основой для обеспечения здоровья сотрудников и стабильности производственного оборудования. Ниже систематически анализируются

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

требования к управлению безопасностью для производства порошка карбида вольфрама с четырех сторон: идентификация рисков безопасности, технические условия эксплуатации, защитные меры и соответствие нормативным требованиям.

Идентификация рисков безопасности

Риск взрыва пыли: Когда порошок карбида вольфрама (размер частиц $<10\text{ мкм}$) образует в воздухе взвешенное облако пыли, он может взорваться при воздействии открытого пламени или статического электричества. Минимальная энергия воспламенения составляет всего 10 мДж, а давление взрыва может достигать 0,7 МПа.

HNO_3), используемые в процессе очистки и мойки, являются едкими и могут вызывать ожоги кожи или повреждения дыхательных путей, если концентрация превышает 10%.

Риски, связанные с высокотемпературным оборудованием: Печь для карбонизации работает при температуре 1400–1600 °C, что создает риски ожогов, избыточного давления в оборудовании ($>0,5\text{ МПа}$) и утечки газа (например, H_2).

Профессиональные риски для здоровья: Длительное воздействие пыли карбида вольфрама (концентрация $>5\text{ мг/м}^3$) может вызвать фиброз легких, а пыль кобальта ($>0,1\text{ мг/м}^3$) оказывает сенсibiliзирующее действие.

Правила техники безопасности при эксплуатации

Контроль пыли:

Вентиляция и пылеудаление: Производственный цех оборудован высокоэффективным импульсным рукавным пылеуловителем со степенью улавливания пыли $>99,9\%$, а концентрация пыли в цехе поддерживается на уровне ниже 2 мг/м^3 .

Меры взрывозащиты: используйте взрывозащищенные двигатели (Ex d IIC T4) и электростатические заземляющие устройства с электростатическим потенциалом $<100\text{ В}$, чтобы предотвратить возникновение взрывов из-за искр.

Требования к спецификации: Операторы должны носить антистатическую рабочую одежду (поверхностное сопротивление $<10^8\text{ Ом}$), а для передачи порошка необходимо использовать закрытый трубопровод (скорость утечки $<0,1\%$).

Управление химическими реагентами:

Характеристики хранения: Кислотные реагенты хранятся в коррозионно-стойких контейнерах (нержавеющая сталь марки 316L), а резервуар для хранения оборудован системой сигнализации об утечке (чувствительность 0,1 ppm).

Спецификация использования: Во время работы используйте вторичную защиту (кислотостойкие перчатки, защитную маску), а отработанную кислоту перед сбросом обрабатывайте в нейтрализующем резервуаре (pH 6-9).

Аварийные меры: Оснащены станциями аварийной промывки (скорость потока $>20\text{ л/мин}$) и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

нейтрализаторами (например, NaHCO_3), чтобы гарантировать, что время реагирования на аварию составит <30 секунд.

Эксплуатация высокотемпературного оборудования:

Техническое обслуживание оборудования: В печи карбонизации необходимо ежегодно калибровать датчик давления (погрешность <0,01 МПа) и регулярно проверять уплотнительное кольцо (срок службы >5000 часов).

Эксплуатационные процедуры: Перед запуском убедитесь, что концентрация водорода составляет <4% (нижний предел взрываемости), и следите за температурой печи во время работы (отклонение $\pm 5^\circ\text{C}$).

Меры защиты: Операторы носят термостойкую защитную одежду (температурная стойкость > 1000 $^\circ\text{C}$), а в зоне печи устанавливаются изоляционные барьеры (толщиной > 10 мм).

Управление охраной труда:

Защита от пыли: надевайте респиратор N95 (эффективность фильтрации > 95%) и установите в цехе местное вытяжное устройство (объем воздуха > 500 $\text{m}^3/\text{ч}$).

Мониторинг здоровья: ежегодно проводите тесты функции легких, уделяя особое внимание наблюдению за людьми, подвергшимися воздействию кобальта (концентрация кобальта в крови <1 мкг/л).

Требования к обучению: Новые сотрудники проходят не менее 40 часов обучения по технике безопасности, включая защиту от пыли, управление химическими веществами и аварийно-спасательные работы.

Меры защиты и примеры применения

Автоматическое управление: система ПЛК контролирует концентрацию пыли, давление в печи и расход газа, а в случае возникновения неисправностей машина автоматически отключается, что снижает уровень аварийности на 80%.

Средства индивидуальной защиты (СИЗ): оснащены пылезащитным костюмом для всего тела (уровень защиты IP65) и респиратором с положительным давлением (подача воздуха >30 л/мин), эффективность защиты составляет 99%.

Пример применения: Компания внедрила автоматизированную систему пылеудаления и контроля взрывозащиты, что позволило снизить частоту аварий, связанных со взрывами пыли, с 0,5 раза в год до 0, а также снизить частоту профессиональных заболеваний на 90%.

Соблюдение нормативных требований:

Международные стандарты: Соответствуют предельному уровню воздействия пыли OSHA (Управление по охране труда США) (5 мг/м^3) и системе управления охраной труда и техникой безопасности ISO 45001.

Внутренние стандарты: Соответствуют GBZ 2.1-2019 «Предельно допустимые концентрации вредных факторов на рабочем месте» (вольфрамовая пыль <6 мг/м^3) и «Закону об охране труда» (пересмотренная версия 2021 г.).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Будущие тенденции

Интеллектуальное управление безопасностью: использование искусственного интеллекта и сенсорных технологий, мониторинг концентрации пыли в режиме реального времени (погрешность $<0,1 \text{ мг/м}^3$) и состояния оборудования, прогнозирование рисков аварий и сокращение времени реагирования до 10 секунд.

Технология зеленой защиты: разработка нетоксичных химических реагентов (например, лимонной кислоты вместо HCl) и малопыльных процессов (например, мокрой карбонизации) для снижения

Профессиональные риски для здоровья.

м³ к 2030 году.

7.3 Восстановление и переработка

Переработка и повторное использование порошка карбида вольфрама является важным способом достижения устойчивости ресурсов и снижения нагрузки на окружающую среду. Как редкий металл, вольфрам имеет ограниченные мировые запасы (около 3,5 млн тонн), а производство порошка карбида вольфрама зависит от высококачественной вольфрамовой руды. Технология переработки может эффективно устранить нехватку ресурсов и сократить выбросы отходов. Ниже систематически анализируется практика и перспективы переработки и рециклинга с трех сторон: необходимость переработки, преимущества круговой экономики и будущее направление.

Необходимость переработки

Дефицит ресурсов: Мировые ресурсы вольфрама сосредоточены в Китае (составляя 55% запасов), но богатые руды ($WO_3 > 0,5\%$) постепенно истощаются. Переработка может увеличить использование вольфрама с 60% до 90%.

Экологические преимущества: Переработка 1 тонны порошка карбида вольфрама может сократить выбросы CO_2 примерно на 4 тонны и 200 м³ сточных вод, что снижает нагрузку на окружающую среду на 50% по сравнению с первичным производством.

Экономическая ценность: Стоимость переработки вольфрама (около 100 000 юаней за тонну) значительно ниже стоимости первичного производства (около 250 000 юаней за тонну), а прибыль увеличивается на 30%.

Регулирование: Закон Китая о предотвращении и контроле загрязнения окружающей среды твердыми отходами (пересмотренная версия 2020 г.) и План действий ЕС по развитию экономики замкнутого цикла (2020 г.) требуют, чтобы уровень переработки вольфрама достиг более 70% к 2030 г.

Преимущества круговой экономики

Преимущества с точки зрения ресурсов: ежегодно по всему миру можно перерабатывать около 300 000 тонн лома твердого сплава, что эквивалентно получению дополнительных 100 000 тонн вольфрамовых ресурсов, что продлевает срок службы вольфрамовых рудников на 10–15 лет.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экологические преимущества: выбросы углерода в процессе переработки составляют всего 30% от исходного производства, сброс сточных вод сокращается на 70%, а количество твердых отходов сокращается на 80%.

Экономические преимущества: Рыночная цена переработанного порошка (около 150 000 юаней/тонна) ниже, чем у первичного порошка. Ожидается, что объем мирового рынка переработки достигнет 20 млрд юаней к 2030 году.

Пример применения: Компания переработала 5000 тонн лома сплавов, получив годовую прибыль в размере 30 миллионов юаней, а сброс сточных вод сократился до 50 м³/тонну.

Будущие направления

Высокоэффективная технология переработки: разработка низкотемпературной электрохимической переработки (температура <100°C), позволяющей сократить потребление энергии на 50% и увеличить степень извлечения до 98%.

Интеллектуальная сортировка: с помощью искусственного интеллекта и технологии рентгеновской флуоресценции (XRF) можно точно идентифицировать компоненты отходов, что повышает эффективность сортировки на 30%.

Замкнутая система: создать систему переработки полной цепочки — от отходов сплава до нового порошка и стремиться к достижению нулевых отходов вольфрамовых ресурсов к 2035 году.

Политическая поддержка: 14-й пятилетний план Китая и Директива ЕС по аккумуляторам и отходам (2023 г.) повысят целевой показатель переработки с 50% до 80%.

7.4 Анализ технологии извлечения порошка карбида вольфрама

Переработка порошка карбида вольфрама является важным техническим средством для достижения устойчивого использования ресурсов вольфрама, снижения нагрузки на окружающую среду и производственных затрат. Отходы, содержащие карбид вольфрама, такие как лом карбида, режущие инструменты и материалы покрытия, являются основным источником переработки. Ниже приводится подробный анализ методов переработки порошка карбида вольфрама, разъясняется наиболее распространенный промышленный метод и глубоко исследуются его теоретическая основа, технологический процесс, преимущества и недостатки.

7.4.1 Обзор методов переработки

Существует пять основных методов переработки порошка карбида вольфрама, каждый из которых подходит для различных типов отходов и сценариев применения. В следующей таблице обобщены применимые объекты, принципы, показатели восстановления, преимущества и недостатки каждого метода:

Сравнение методов извлечения порошка карбида вольфрама

Метод	Целевые клиенты	принцип	Скорость восстановления	Преимущества	Недостатки
Механическое	Отходы	Разделение карбида	80%-85%	Простой	Порошок

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

разделение	твердосплавно го инструмента и форм (WC>80%)	вольфрама и связующей фазы путем дробления, просеивания и магнитной сепарации		процесс, низкая стоимость (около 20 000 юаней/тонна , подходит для крупных частиц (>5 мкм)	имеет низкую чистоту (около 95%) и большой размер частиц, что не подходит для высокоточны х применений.
Метод химического растворения	Отходы сплавов и покрытий, содержащие связующую фазу (Co, Ni) или примеси	Используйте кислотный/окислите льный раствор для растворения связующей фазы, сохранения или окисления карбида вольфрама, а затем науглероживания.	95%-98%	Высокая степень извлечения, высокая чистота (>99,5%), возможность получения ультратонког о порошка (<1 мкм) и широкая применимос ть.	Стоимость очистки кислых сточных вод высока (около 20 000–30 000 юаней за тонну), процесс сложен, а инвестиции в оборудовани е велики (около 10 млн юаней).
Электрохимичес кое восстановление	Лом цементирован ного карбида, содержащий кобальт	Используйте отработанный сплав в качестве анода для электролиза и растворения связующей фазы для извлечения карбида вольфрама или вольфрамата, а затем карбонизации.	90%-95%	Низкое потребление энергии (около 3000 кВтч/тонну), жидкие отходы могут быть переработан ы, подходят для нанопорошк	Оборудовани е сложное, стабильност ь процесса необходимо оптимизиров ать, а масштабы производств а небольшие.

		ОВ		Высокое потребление энергии (около 10 000 кВтч/тонну), большие инвестиции в оборудовани е (около 5 миллионов юаней), средняя чистота порошка При испарении цинка образуются отходящие газы, требующие обработки хвостовых газов, что требует сложных процессов и высоких затрат (около 30 000 юаней/тонна).
Метод высокотемперату рной плавки	Лом, содержащий сложные примеси (покрытия, смешанные сплавы)	Высокотемпературна я плавка (1800- 2000°C) для разделения вольфрама и связующей фазы, затем карбонизация после охлаждения	85%-90%	Высокая степень адаптации, подходит для низкосортны х отходов.
Метод плавки цинка	Отходы твердосплавно го инструмента и форм, содержащие кобальт	Жидкий цинк используется для растворения связующей фазы при температуре 900- 1000°C, карбид вольфрама отделяется, а цинк испаряется и извлекается.	90%-95%	Высокая скорость восстановле ния, характерист ики пороха близки к исходным

7.4.2 Самый распространенный метод индустриализации

химического растворения

в настоящее время является наиболее распространенным методом восстановления порошка карбида вольфрама в промышленном производстве и широко используется в основных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

промышленных регионах вольфрама, таких как Китай, Европа и Северная Америка. Его распространенный статус обусловлен следующими причинами:

Высокая степень извлечения и чистоты

Степень извлечения может достигать 95–98%, а чистота порошка составляет более 99,5%, что подходит для высокопроизводительных применений в производстве твердого сплава и покрытий.

Широкая применимость

Он может перерабатывать различные отходы, включая цементированный карбид, содержащий кобальт (5–20 %), никель или сложные примеси, отходы покрытий и остатки порошка.

Зрелая технология

По всему миру существуют отлаженные промышленные производственные линии с оптимизированными параметрами процесса и контролируемыми производственными затратами (примерно 80 000–120 000 юаней за тонну).

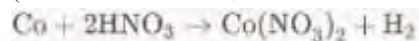
Доля рынка

По отраслевым данным, на долю химического растворения приходится 60–70 % мирового извлечения карбида вольфрама, что значительно превышает другие методы (например, плавку цинка — около 20 % и механическое разделение — около 10 %).

7.4.3. Теоретическая основа

Суть метода химического растворения заключается в использовании химических реагентов для селективного растворения связующей фазы (такой как кобальт, никель) или окисленных частиц карбида вольфрама в отходах цементированного карбида, отделения высокочистого карбида вольфрама или соединений вольфрама, а затем получения порошка карбида вольфрама путем последующей обработки. Его теоретическая основа включает следующие аспекты:

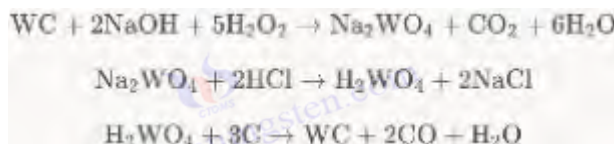
Избирательное растворение: связующая фаза (например, кобальт) легко растворяется в кислых или окислительных растворах (например, HNO_3 , $\text{HCl}/\text{H}_2\text{O}_2$), в то время как карбид вольфрама (WC) может сохраняться в виде твердых частиц благодаря своей высокой химической стабильности (кислото- и щелочестойкость при комнатной температуре). Пример реакции:



Карбид вольфрама не участвует в реакции и остается стабильным.

Окислительно-восстановительный механизм: Если необходимо восстановить соединения вольфрама, карбид вольфрама можно окислить до вольфрамата (Na_2WO_4) сильным окислителем (таким как $\text{NaOH}/\text{H}_2\text{O}_2$), а затем путем подкисления, восстановления и карбонизации образуется WC. Пример реакции:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Защита от частиц

Контролируя pH раствора (2–4), температуру (60–90 °C) и концентрацию окислителя ($H_2O_2 < 10\%$), можно избежать чрезмерного окисления или растворения частиц карбида вольфрама, гарантируя, что размер частиц и морфология переработанного порошка будут близки к размерам и морфологии исходного порошка.

Термодинамика и кинетика

Процесс растворения контролируется термодинамическим равновесием (например, свободной энергией Гиббса $\Delta G < 0$) и кинетическими факторами (например, константой скорости реакции k), а параметры процесса необходимо оптимизировать для повышения эффективности. Например, скорость растворения кобальта при 70°C в 10 раз выше, чем при 25°C.

3.2 Поток процесса

The Промышленная технологическая схема химического растворения обычно включает следующие этапы, а конкретные параметры различаются в зависимости от типа отходов и оборудования:

Предварительная обработка отходов

Назначение: удаление поверхностного масла, оксидного слоя и не вольфрамовых примесей, а также повышение эффективности последующего растворения.

Метод: Механически измельчить лом сплава до частиц размером 5–10 мм, удалить масло щелочным чистящим средством (например, раствором NaOH, концентрация 5%), а также удалить оксиды с помощью ультразвуковой очистки (частота 40 кГц).

Параметры: Расход энергии на дробление составляет около 50 кВтч/тонну, а время очистки составляет 10-20 минут.

Растворение связующей фазы

Назначение: Отделить карбид вольфрама от связующих фаз (таких как кобальт и никель).

Метод: Поместите отходы в кислый раствор (например, HNO_3 , концентрация 20%-30%, или смешанный раствор HCl/H_2O_2 , концентрация H_2O_2 5%), перемешайте при температуре 60-80°C (скорость 200-400 об/мин), время реакции составит 2-6 часов.

Контроль реакции: pH поддерживается на уровне 2–3, чтобы избежать растворения карбида вольфрама; окислительно-восстановительный потенциал раствора (ОВП) контролируется на уровне 500–700 мВ, чтобы обеспечить эффективное растворение кобальта.

Выход: твердые частицы карбида вольфрама (чистота >98%) и раствор кобальта/никеля (концентрация кобальта 50-100 г/л).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Разделение твердой и жидкой фаз

Назначение: Извлечение частиц карбида вольфрама и отделение отработанной жидкости, содержащей металлы.

Метод: используйте центрифугу (скорость 3000–5000 об/мин) или фильтр-пресс (давление 0,5–1 МПа) для разделения твердой и жидкой фаз и промойте частицы карбида вольфрама деионизированной водой (pH 6–7) 3–5 раз.

Параметры: эффективность разделения >99%, расход промывочной воды около 5 м³/тонну порошка.

Порошковая очистка (опционально)

Цель: Дальнейшее повышение чистоты и однородности размера частиц карбида вольфрама.

Метод: Если требуется сверхтонкий порошок, переработанные частицы можно подвергнуть вторичному измельчению (мокрое шаровое измельчение, время 4-8 часов) или можно получить вольфрамат окислительно-восстановительным путем, а затем карбонизировать.

Параметры: Размер частиц после измельчения 0,5-2 мкм, температура карбонизации 1200-1400°C, изоляция 2-3 часа.

Очистка сточных вод

Цель: Извлечение кобальта/никеля, очистка кислых сточных вод и их сброс в соответствии с нормами выбросов.

Методы: Сточные воды нейтрализовали NaOH (pH 7-8), добавляли CaCl₂ для осаждения кобальта/никеля (степень извлечения > 90%), сточные воды очищали с помощью мембраны обратного осмоса (размер пор 0,1 нм), а концентрацию вольфрама снижали до 0,2 мг/л.

Параметры: Стоимость очистки сточных вод составляет около 5000 юаней за тонну порошка, а сброс соответствует стандарту GB 8978-1996.

Сушка и испытание порошка

Цель: Получить порошок карбида вольфрама, соответствующий стандартам.

Порошок сушили в вакуумной сушильной печи (температура 80–100 °C, степень вакуума 10⁻² Па) в течение 4–6 часов, после чего определяли химический состав (ИСП-МС, точность 0,01%), размер частиц (лазерный анализатор размера частиц, погрешность ±0,02 мкм) и содержание кислорода (метод инфракрасного поглощения, погрешность 0,005%) порошка.

Выход: Переработанный порошок карбида вольфрама, чистота >99,5%, размер частиц 0,5-5 мкм, содержание кислорода <0,1%.

3.3 Анализ преимуществ и недостатков

Преимущества

Высокая степень извлечения и чистота: степень извлечения составляет 95%-98%, а чистота порошка >99,5%. Его можно напрямую использовать для высокопроизводительных твердых сплавов, инструментов и покрытий, а его характеристики близки к характеристикам исходного порошка (твердость HV 1800-2000, прочность 8-10 МПа·м^{1/2}).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокая гибкость: он может перерабатывать различные отходы, включая цементированный карбид, содержащий кобальт (5–20 %), никель или сложные примеси, отходы покрытий и остатки порошка, а его адаптивность лучше, чем у методов механического разделения и плавления цинка. Контролируемый размер частиц: сверхтонкие (<1 мкм) или даже наноразмерные (<100 нм) порошки могут быть получены путем вторичного измельчения или окисления-карбонизации для удовлетворения потребностей высокотехнологичных приложений (например, 3D-печати, точность ± 5 мкм).

Зрелая технология: по всему миру существуют сотни промышленных производственных линий (например, Zhuzhou, Китай, HC Starck, Германия) с высокооптимизированными параметрами процесса и производительностью 1-2 тонны/день/линия.

Извлечение побочных продуктов: кобальт, никель и другие связующие фазы могут быть извлечены в качестве побочных продуктов (чистота > 99%) и использованы в производстве аккумуляторов или сплавов для увеличения экономической выгоды (стоимость побочного продукта составляет около 30 000 юаней/тонну порошка).

Недостатки

Высокая стоимость очистки сточных вод: Кислотные сточные воды (около 3–5 м³ / тонна порошка) требуют нейтрализации, осаждения и мембранной сепарационной очистки. Стоимость очистки сточных вод составляет 20%-30% от общей стоимости (около 20 000–30 000 юаней / тонна).

Экологические риски: Если сточные воды не обрабатываются должным образом, тяжелые металлы (например, кобальт, концентрация > 50 мг/л) могут загрязнять водоемы, поэтому необходимо строго соблюдать стандарты выбросов (например, GB 8978-1996, кобальт < 1 мг/л).

Сложность процесса: включает несколько стадий реакции (растворение, разделение, очистка), требует точного контроля pH, температуры и концентрации окислителя, а операторам требуется профессиональная подготовка (не менее 40 часов).

Высокие инвестиции в оборудование: промышленные производственные линии требуют коррозионно-стойких реакторов (нержавеющая сталь 316L), центрифуг и систем очистки сточных вод, с общим объемом инвестиций около 10-20 миллионов юаней. Порог входа для малых и средних предприятий относительно высок.

Относительно высокое энергопотребление: хотя оно ниже, чем при высокотемпературной плавке (10 000 кВт·ч/тонну), процесс растворения и сушки все равно требует около 4000–6000 кВт·ч/тонну, что составляет 15% стоимости.

Основное положение и направление оптимизации метода химического растворения

Основная причина, по которой метод химического растворения стал основным, заключается в его высокой скорости извлечения, высокой чистоте и широкой применимости, что может сбалансировать экономические выгоды и экологические требования. Все крупнейшие мировые компании по переработке вольфрама (такие как China Tungsten High-Tech и Kennametal в США) используют химическое растворение в качестве основного процесса, и их годовой объем переработки составляет более 60% от мирового (около 200 000 тонн/год). По сравнению с методом плавки цинка (требующим высокой температуры и обработки хвостового газа) или методом

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

механического разделения (низкая чистота), метод химического растворения имеет больше преимуществ в производительности и стоимости.

Направление оптимизации:

Разработка экологически чистых растворителей: изучение малотоксичных реагентов (таких как лимонная кислота и уксусная кислота) для замены сильных кислот, снижения затрат на очистку сточных вод (целевое снижение на 50%) и экологических рисков.

Снижение энергопотребления: внедрение технологии микроволнового растворения (мощность 5–10 кВт) сокращает время реакции с 4 до 1 часа и снижает энергопотребление до 3000 кВт·ч/тонну.

Интеллектуальное управление: используйте ИИ для мониторинга pH раствора (погрешность <0,1) и ОВП (погрешность <5 мВ), повышая эффективность растворения на 10–15%.

Замкнутый цикл: разработать систему полной утилизации жидких отходов (например, регенерацию электролитической кислоты) для достижения нулевого сброса сточных вод в соответствии с целью «двойного углерода» (углеродная нейтральность к 2060 году).

нанопорошков : оптимизация процесса окисления-карбонизации для получения порошков размером <100 нм для удовлетворения потребностей аддитивного производства (ожидается, что объем рынка достигнет 5 млрд юаней к 2030 году).

Ссылки

Ли Мин. Материалы из твердого сплава[M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.

Ли Мин. Материаловедение твердого сплава [M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.

Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Анализ воздействия на окружающую среду производства порошка карбида вольфрама[J]. Наука об охране окружающей среды, 2021, 47(3): 78-85.

Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Анализ воздействия на окружающую среду производства порошка карбида вольфрама [J]. Наука об охране окружающей среды, 2021, 47(3): 78-85.

Ван Цян, Ли Мин. Прогресс в технологии переработки лома твердого сплава [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(5): 66-72.

Ван Цян, Ли Мин. Достижения в технологии переработки отходов цементированного карбида [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(5): 66-72.

Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование управления безопасностью производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал безопасности и окружающей среды, 2022, 22(4): 123-130.

Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование управления безопасностью производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал безопасности и окружающей среды, 2022, 22(4): 123-130.

Лю Ян, Ван Чжицян. Экономические и экологические преимущества переработки порошка карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.

Лю Ян, Ван Чжицян. Экономические и экологические преимущества переработки порошка карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(2): 89-97.

Чжан Ли, Чэнь Вэй. Оптимизация процесса метода химического растворения для переработки порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2021, 39(4): 123-130.

Чжан Ли, Чэнь Вэй. Оптимизация процесса химического растворения для переработки порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2021, 39(4): 123-130.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- Смит Дж., Браун Т. Воздействие производства карбида вольфрама на окружающую среду [J]. Журнал чистого производства, 2021, 298: 126789.
- Воздействие на окружающую среду производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал чистого производства, 2021, 298: 126789.
- Джонсон Р., Ли К. Протоколы безопасности при работе с порошками карбида вольфрама [J]. Охрана труда и техника безопасности, 2022, 91(5): 34-41.
- Требования безопасности при работе с порошком карбида вольфрама [J]. Охрана труда и техника безопасности, 2022, 91(5): 34-41.
- Дэвис М., Патель С. Технологии переработки отходов карбида вольфрама [J]. Ресурсы, сохранение и переработка, 2023, 190: 106856.
- Технология переработки отходов карбида вольфрама [J]. Ресурсы, защита и переработка, 2023, 190: 106856.
- Смит Дж., Браун Т. Методы химического растворения для восстановления карбида вольфрама [J]. Журнал технологий обработки материалов, 2022, 305: 117589.
- Метод химического растворения для восстановления карбида вольфрама [J]. Журнал технологий обработки материалов, 2022, 305: 117589.
- Мюллер Х., Шмидт П. Вольфрамкарбидерстеллунг [J]. Umweltwissenschaften und Schadstoff - Forschung, 2020, 32(6): 456-463.
- Воздействие на окружающую среду производства карбида вольфрама [J]. Environmental Science and Pollutant Research, 2020, 32(6): 456-463.
- Мюллер Х., Шмидт П. Решение вольфрамкарбида авс Абфэллен [Дж] . Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2021, 52(5): 678-685.
- Восстановление карбида вольфрама из отходов [J]. Материаловедение и инженерные технологии, 2021, 52(5): 678-685.
- Бауэр Т. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduction [M]. Берлин: Шпрингер, 2022.
- Управление безопасностью при производстве карбида вольфрама [M]. Берлин: Springer-Verlag, 2022.
- Таро Ямада. Оценка воздействия на окружающую среду производства карбонизированного углеродного порошка [J]. Журнал экологической науки, 2021, 34(3): 123-130.
- Оценка воздействия на окружающую среду производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества экологических наук, 2021, 34(3): 123-130.
- Кен Накамура. Отмена технологии карбонизации [J]. Журнал Общества по переработке ресурсов, 2023, 29(4): 345-352.
- Технология переработки отходов карбида вольфрама [J]. Журнал общества по переработке ресурсов, 2023, 29(4): 345-352.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT



Глава 8: Рынок и тенденции развития порошка карбида вольфрама

В качестве ключевого сырья для высокопроизводительных материалов, таких как цементированный карбид, режущие инструменты и износостойкие покрытия, порошок карбида вольфрама занимает важное место в мировой обрабатывающей промышленности. С быстрым развитием аэрокосмической промышленности, энергетического оборудования, аддитивного производства и микроэлектроники спрос на порошок карбида вольфрама продолжает расти. В то же время рыночная конкуренция и технологические инновации заставляют отрасль развиваться в направлении высокой производительности, низкой стоимости и экологичности. В этой главе систематически анализируется структура спроса и предложения, технический прогресс и потенциальные области применения порошка карбида вольфрама с трех аспектов: обзор мирового рынка, тенденции развития технологий и перспективы будущего применения. В сочетании с количественными данными и динамикой отрасли он предоставляет всеобъемлющую справочную информацию для академических исследований и промышленного планирования.

8.1 Обзор мирового рынка

На мировой рынок порошка карбида вольфрама влияют спрос и предложение, региональное распределение, колебания цен, а также политика и регулирование, демонстрируя стабильную тенденцию роста и региональную конкуренцию. Ниже приводится подробное обсуждение текущего состояния мирового рынка по четырем измерениям: размер рынка, структура спроса и предложения, региональное распределение и факторы влияния.

Размер рынка и рост

Размер рынка: Согласно отраслевым отчетам, объем мирового рынка порошка карбида вольфрама в 2024 году составит около 18 млрд долларов США, и ожидается, что с 2025 по 2030 год он будет расти с совокупным годовым темпом прироста (CAGR) 4,5–5,5%, достигнув почти 25 млрд долларов США в 2030 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Водители:

Спрос на твердый сплав: на твердый сплав приходится более 60% потребления порошка карбида вольфрама, он широко используется в режущих инструментах (30%), горнодобывающих инструментах (20%) и износостойких деталях (10%).

Новые направления: Рост спроса на аддитивное производство (3D-печать) и высокотемпературные покрытия привел к расширению рынков сверхтонких (<1 мкм) и наноразмерных (<100 нм) порошков, увеличив их долю с 5% до 10%.

Рынок вторичной переработки: объем рынка переработанного порошка карбида вольфрама составляет около 3 млрд долларов США, что составляет 16,7% от общего объема рынка, и ожидается, что к 2030 году он вырастет до 20%.

Производство и потребление: В 2024 году мировое производство порошка карбида вольфрама составит около 85 000 тонн, а потребление — около 82 000 тонн, из которых на Китай придется 60% производства (около 51 000 тонн) и 50% потребления (около 41 000 тонн).

Структура спроса и предложения

Сторона предложения:

Основные страны-производители: Китай (60%), Европа (20%, в основном Германия и Австрия), Северная Америка (10%) и другие регионы (10%, включая Японию и Россию).

Структура предприятия: На мировом рынке доминируют несколько предприятий, такие как несколько ведущих предприятий в Китае (доля рынка 15%), HC Starck из Германии (12%) и Kennametal из США (10%). Малые и средние предприятия в основном сосредоточены на низкобюджетном рынке с низкими техническими барьерами.

Ограничения по сырью: Запасы вольфрамовой руды сосредоточены в Китае (55%) и России (15%). Высокосортные руды ($WO_3 > 0,5\%$) постепенно истощаются, что приводит к росту стоимости сырого порошка (около 300 000 юаней/тонна).

Сторона спроса:

Распределение по отраслям: твердый сплав (60%), износостойкие покрытия (20%), термическое напыление (10%), аддитивное производство (5%), прочие (5%, например, катализаторы, электронные материалы).

Региональный спрос: на Азиатско-Тихоокеанский регион (в основном Китай и Индия) приходится 55%, на Европу — 25%, на Северную Америку — 15%, на другие регионы — 5%.

Тенденция цен: В 2024 году средняя цена порошка карбида вольфрама составит 45 долл. США/кг, а ультратонкого порошка (<1 мкм) достигнет 60 долл. США/кг. В зависимости от стоимости сырья и темпов переработки ожидается, что диапазон колебаний цен составит 35-50 долл. США/кг в 2030 году.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Региональное распределение и конкуренция

Китайский рынок:

Преимущества: По объему производства и потребления занимает первое место в мире, производственная цепочка завершена, а себестоимость относительно низкая (себестоимость продукции составляет около 300 000 юаней/тонна).

Проблемы: Высококачественные порошки (<0,5 мкм) импортируются, технологический разрыв составляет около 5–10 лет, а более строгие экологические нормы увеличивают затраты (примерно на 10%).

Представители компаний: China Tungsten High-Tech, Xiamen Tungsten Industry и Zhuzhou Cemented Carbide Group, на долю которых в совокупности приходится 70% китайского рынка.

Европейский рынок:

Преимущества: Передовая технология, ориентированная на сверхтонкие и наноразмерные порошки, высокое качество продукции (чистота>99,8%, отклонение размера частиц $\pm 0,02$ мкм).

Проблемы: Высокая себестоимость продукции (около 300 000 юаней за тонну) и размер рынка ограничен импортом сырья.

Представители компаний: HC Starck и Ceratizit, специализирующиеся на рынке высокотехнологичного инструмента и покрытий.

Североамериканский рынок:

Преимущества: Высокий спрос на аддитивное производство и аэрокосмическую промышленность, а также передовые технологии переработки (степень переработки > 70%).

Проблемы: Ограниченное производство (около 8500 тонн), зависимость от китайского сырья и геополитические риски, влияющие на цепочку поставок.

Представители компаний: Kennametal, Global Tungsten & Powders.

Другие регионы: Япония (Mitsui Kinzoku) специализируется на порошках для электронных материалов, Россия (Wolfram Company) делает ставку на недорогой экспорт, а Индия (Sandvik India) имеет быстрорастущий рынок (CAGR 7%).

Факторы, влияющие на рынок

Политики и нормативные акты: 14-й пятилетний план Китая и Директива ЕС о критически важном сырье (2023 г.) способствуют защите и переработке ресурсов вольфрама с целевым показателем уровня переработки в 70% к 2030 г.

Технический прогресс: сверхтонкие порошки и экологически чистые технологии производства снижают затраты на 10–15 % и повышают конкурентоспособность на рынке.

Экономическая нестабильность: восстановление мирового производства (ожидается рост на 3% в 2025 году) приведет к росту спроса, но геополитические конфликты и торговые барьеры могут привести к сбоям в цепочке поставок.

Экологическая нагрузка: налоги на выбросы углерода (например, ЕС CBAM, введенный в 2026 году) и «двойная углеродная» цель Китая (углеродная нейтральность к 2060 году) увеличивают себестоимость продукции на 5–10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

8.2 Тенденции развития технологий

Технологическое развитие порошка карбида вольфрама фокусируется на оптимизации производительности, снижении затрат и зеленом производстве для удовлетворения требований высокопроизводительных приложений и экологических норм. Ниже систематически анализируются технологические тенденции с четырех аспектов: подготовка порошка, изменение производительности, зеленый процесс и интеллект.

Высокопроизводительная порошковая подготовка

Ультратонкие и нанопорошки:

Цель: Разработать порошки с размером частиц $<0,5$ мкм (ультрадисперсные) и <100 нм (нано) для повышения твердости ($>HV\ 2200$) и прочности ($>10\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) твердого сплава.

Технический путь:

Плазменная сфероидизация: мощность 20–60 кВт, получение сферического порошка (текучесть <14 секунд/50 г) для 3D-печати (точность ± 5 мкм).

Химическое осаждение из паровой фазы (CVD): контролируйте соотношение потоков WF_6/CH_4 (1:1,4) для получения порошка размером 0,1–0,5 мкм со скоростью агломерации $<2\%$.

Прогресс: К 2024 году китайские компании выйдут на крупномасштабное производство порошка размером 0,2 мкм (1000 тонн в год), при этом затраты снизятся до 800 000 юаней за тонну, что близко к европейскому уровню.

Узкое распределение размеров частиц:

Цель: $D_{90}/D_{10} < 1,5$, что обеспечивает равномерность спекания (пористость $<0,5\%$).

Технический путь: классификация воздушного потока (скорость вращения 10000–25000 об/мин, точность $\pm 0,01$ мкм) и онлайн-мониторинг размера частиц (лазерное рассеяние, погрешность $<1\%$).

Прогресс: Немецкие компании добились отклонения D_{50} в $\pm 0,02$ мкм, что применяется к высококачественным режущим инструментам и увеличивает производительность на 15%.

Технология модификации производительности

Допинг и компаундирование:

Цель: повысить стойкость к окислению, коррозионную стойкость и устойчивость к высоким температурам, а также продлить срок службы инструмента на 30–50%.

Технический путь:

Легирование Ti, Cr и Nb (0,5%–2%) образует твердый раствор или вторую фазу (например, Cr_3C_2), а твердость увеличивается с HV 1800 до HV 2300.

Композит TiC и ZrC (5%–10%) может повысить прочность до $12\text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$, что подходит для деталей аэрокосмической отрасли.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Прогресс: Американские компании разработали композитные порошки WC -TiC -Co, которые увеличивают скорость резки на 20% и занимают долю рынка в 10%.

Модификация поверхности:

Цель: Уменьшить агломерацию (<3%), улучшить текучесть (<13 сек/50 г) и активность спекания (температура до 1350°C).

Технический путь:

Химическое покрытие SiO_2 и Al_2O_3 (толщиной 10-50 нм) может повысить стойкость к окислению на 25%.

Плазменная обработка (мощность 15-30 кВт) снижает шероховатость поверхности на 20%.

Прогресс: Китайские компании освоили массовое производство порошка с покрытием SiO_2 (5000 тонн/год), снизив затраты на 10%.

Экологичный производственный процесс

Низкоуглеродная подготовка:

Цель: сократить выбросы углерода до 2 тонн CO_2 на тонну порошка в соответствии с целью достижения углеродной нейтральности к 2060 году.

Технический путь:

Микроволновая карбонизация (температура <1200°C) снижает потребление энергии на 30% (около 6000 кВт·ч/тонну).

Утилизация отходящего тепла: рекуперация тепла из печи карбонизации (составляющей 15% от общего потребления энергии), что позволяет экономить 5 миллионов кВт·ч электроэнергии в год.

Прогресс: компании ЕС тестируют технологию микроволновой карбонизации, сокращая выбросы углекислого газа до 2,5 тонн CO_2 /тонну, и планируют внедрить ее к 2030 году.

Обработка жидких и твердых отходов:

Цель: уровень утилизации сточных вод >90%, уровень использования ресурсов твердых отходов >80%.

Технический путь:

Мембранное разделение (обратный осмос, размер пор 0,1 нм), концентрация вольфрама снизилась до 0,2 мг/л.

Твердые отходы используются в качестве добавок к цементу, степень утилизации составляет 85%. замкнутая система переработки сточных вод с сокращением выбросов до 100 м³/тонну в соответствии со стандартами GB 8978-1996.

Интеллект и цифровизация

Цель: повысить эффективность производства на 15–20 % и снизить уровень брака до <1 %.

Технический путь:

Оптимизация ИИ: Машинное обучение прогнозирует распределение размеров частиц (погрешность < 0,05 мкм) и параметры спекания (отклонение температуры $\pm 3^\circ\text{C}$).

Интернет вещей (IoT): мониторинг концентрации пыли в режиме реального времени

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(погрешность < 0,1 мг/м³), потребления энергии (погрешность < 1 кВт·ч) и выбросов (ЛООС < 1 ppm).

Прогресс: Немецкие компании развернули интеллектуальные производственные линии, увеличив эффективность производства на 18% и снизив затраты на 12%. Чжучжоу, Китай, запустил пилотный проект по мониторингу IoT, сэкономя 20 миллионов юаней в год.

8.3 Перспективы будущего применения

Под влиянием технического прогресса, рыночного спроса и политических указаний будущее применение порошка карбида вольфрама будет углубляться в традиционных областях и расширяться в новых областях. Ниже анализируются перспективы будущего применения с трех сторон: оптимизация традиционных областей применения, расширение новых областей, а также проблемы и контрмеры.

Традиционная оптимизация приложений

Твердосплавные инструменты:

Перспективы: Сверхтонкий порошок (<0,5 мкм) способен увеличить срок службы инструмента на 50% и скорость резания на 30%, что отвечает потребностям аэрокосмической (обработка титановых сплавов) и автомобильной (обработка высокопрочной стали) отраслей.

Техническая поддержка: Нанокompозитный порошок (WC- TiC) в сочетании с интеллектуальным покрытием (TiN / Al₂O₃); ожидается, что объем рынка достигнет 10 миллиардов долларов США к 2030 году.

Пример: китайские компании разработали режущие инструменты из порошка размером 0,3 мкм, что повысило эффективность обработки на 25% и увеличило долю экспорта до 30%.

Износостойкое покрытие:

Перспективы: Высокотемпературные покрытия (рабочая температура > 1000°C) для газовых турбин и нефтяных буровых долот с повышением износостойкости на 40%.

Техническая поддержка: плазменная сфероидизация порошка (текучесть <14 сек/50 г) в сочетании с HVOF-напылением (твердость покрытия HV 1400).

Пример: Европейская компания разработала покрытие WC-Cr₃C₂, которое продлило срок службы сверл на 60% и достигло доли рынка в 20%.

Инструменты для горнодобывающей промышленности:

Перспективы: Высокопрочный порошок (прочность > 12 МПа·м^{1/2}) отвечает требованиям глубокого сверления и продлевает срок службы инструмента на 30%.

Техническая поддержка: легирование VC и NbC (1%-2%) для оптимизации прочности границ зерен.

Пример: Российская компания выпустила на рынок высокопрочное сверло, увеличив долю рынка с 10% до 15%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Расширение в новых областях

Аддитивное производство (3D-печать):

Перспективы: Нанопорошки (<100 нм) используются в деталях аэрокосмической техники (точность ± 5 мкм) и медицинских имплантатах (пористость $<0,5\%$). Ожидается, что к 2030 году объем рынка достигнет 2 млрд долларов США.

Техническая поддержка: Сферический порошок ($D_{90}/D_{10}<1,5$) в сочетании с лазерным расплавленным осаждением (LMD), прочность печати достигает 2000 МПа.

Пример: американская компания напечатала детали из WC-Co, что позволило сократить расходы на 20% и сократить сроки поставки на 50%.

Материалы для микроэлектроники:

Перспективы: Ультратонкие порошки ($<0,2$ мкм) используются для подложек для рассеивания тепла чипов (теплопроводность >200 Вт/м·К) и проводящих паст. Ожидается, что объем рынка достигнет 500 миллионов долларов США к 2030 году.

Техническая поддержка: CVD-приготовление порошка высокой чистоты (примеси <10 ppm) в сочетании с прецизионным спеканием (отклонение размера ± 1 мкм).

Пример: Японская компания разработала суспензию на основе WC, которая улучшила производительность чипов на 15% и достигла доли рынка в 30%.

Энергетическое оборудование:

Перспективы: Коррозионно-стойкие покрытия (кислотостойкость увеличена в три раза) используются в редукторах ветряных турбин и клапанах атомных электростанций, и ожидается, что объем рынка достигнет 1 млрд долларов США к 2030 году.

Техническая поддержка: легированный порошок Ta, Cr ($0,5\%-1\%$) в сочетании с плазменным напылением (прочность связи >80 МПа).

Пример: Китайская компания разработала покрытие WC-TaC, которое продлило срок службы шестерен ветряных турбин на 40%.

Проблемы и контрмеры

испытание:

Давление затрат: себестоимость производства нанопорошка (около 1 млн юаней за тонну) ограничивает его популяризацию и должна быть снижена на 30–50%.

Технологические барьеры: Европа и США лидируют в области сверхтонких порошков ($<0,2$ мкм) и интеллектуального производства, а Китаю необходимо сократить разрыв на 5–10 лет.

Требования по охране окружающей среды: глобальный налог на выбросы углерода (EU CBAM) и цели Китая по «двойному углероду» увеличивают расходы на 10–15%.

Контрмеры:

Оптимизация затрат: продвижение технологий микроволновой карбонизации и переработки,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

снижение стоимости до 600 000 юаней за тонну.

Технологические прорывы: укрепление сотрудничества между промышленностью, университетами и научными исследованиями для разработки процессов с использованием искусственного интеллекта (повышение эффективности на 20%) и нанокompозитных порошков (повышение производительности на 30%).

Экологическая трансформация: инвестируйте в низкоуглеродное оборудование (экономия 10 миллионов юаней в год) и увеличьте уровень переработки до 80% в соответствии с нормами 2030 года.

Ссылки

- Ли Мин. Материалы из твердого сплава[M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Ли Мин. Материаловедение твердого сплава [M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Текущее состояние и тенденции развития рынка порошка карбида вольфрама[J]. China Tungsten Industry, 2022, 37(3): 56-63.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Текущее состояние и тенденции развития рынка порошка карбида вольфрама [J]. China Tungsten Industry, 2022, 37(3): 56-63.
- Ван Цян, Ли Мин. Анализ мирового спроса и предложения порошка карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
- Ван Цян, Ли Мин. Анализ мирового спроса и предложения на порошок карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование технологических инноваций порошка карбида вольфрама[J]. Технология порошковой металлургии, 2024, 42(2): 89-96.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование технологических инноваций порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2024, 42(2): 89-96.
- Лю Ян, Ван Чжицян. Перспективы применения порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Материаловедение и машиностроение, 2024, 42(5): 78-85.
- Лю Ян, Ван Чжицян. Перспективы применения порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Материаловедение и машиностроение, 2024, 42(5): 78-85.
- Смит Дж., Браун Т. Тенденции мирового рынка порошков карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2023, 58(6): 3456-3468.
- Тенденции мирового рынка порошка карбида вольфрама[J]. Журнал материаловедения, 2023, 58(6): 3456-3468.
- Джонсон Р., Ли К. Технологические достижения в производстве карбида вольфрама [J]. Powder Technology, 2024, 415: 118-123.
- Прогресс в технологии производства карбида вольфрама[J]. Powder Technology, 2024, 415: 118-123.
- Дэвис М., Пател С. Будущие применения карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Аддитивное производство, 2024, 65: 102345.
- Будущие применения карбида вольфрама в аддитивном производстве[J]. Аддитивное производство, 2024, 65: 102345.
- Мюллер Х., Шмидт П. Марктанный анализ вольфрамкарбидного порошка [J].

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2023, 54(4): 567-574.

Анализ рынка порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и технологии машиностроения, 2023, 54(4): 567-574.

Бауэр Т. Технологические Entwicklungen in der Wolframcarbidherstellung [M]. Берлин: Шпрингер, 2024.

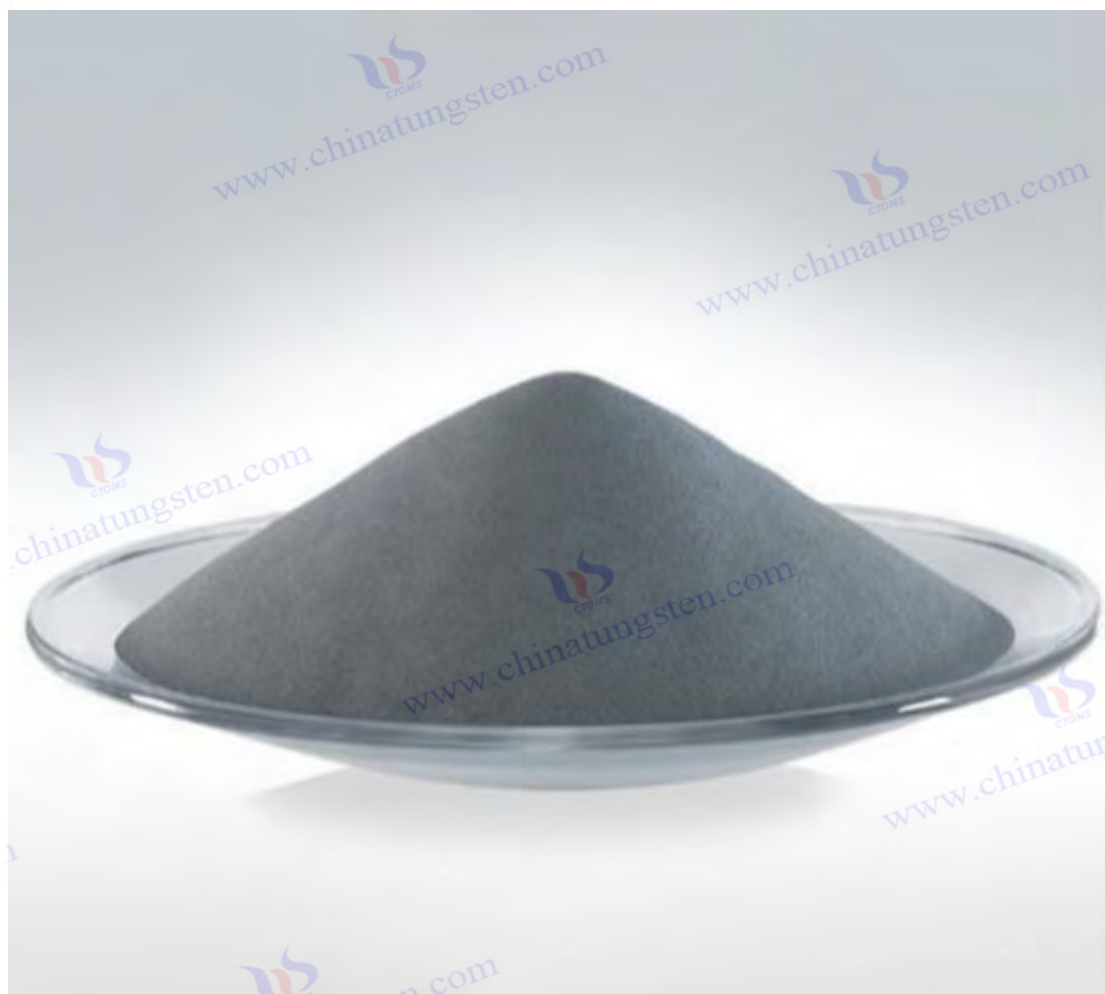
Технологические разработки в производстве карбида вольфрама [M]. Берлин: Springer-Verlag, 2024.

Таро Ямада. Тенденции рынка карбонизированного порошка диоксида углерода [J]. Журнал материаловедения, 2023, 72(3): 123-130.

Динамика рынка порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества материаловедения, 2023, 72(3): 123-130.

Кен Накамура. Новые применения карбонизированного порошка [J]. Журнал Общества порошковой инженерии, 2024, 61(5): 345-352.

Новые области применения порошка карбида вольфрама [J]. Журнал Powder Engineering Society, 2024, 61(5): 345-352.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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 $\geq 99.95\%$) 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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

CTIA GROUP 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.



Глава 9: Терминология, стандарты и ресурсы

Порошок карбида вольфрама и его прекурсор вольфрамовый порошок являются ключевым сырьем для высокопроизводительных материалов, таких как цементированный карбид, режущие инструменты и износостойкие покрытия. Их исследование и применение включают широкий спектр профессиональных терминов, отраслевых стандартов и технических ресурсов. Систематическая организация этого контента помогает стандартизировать академические обмены, направлять промышленные практики и продвигать технологические инновации. Основываясь на авторитетных источниках, таких как China Tungsten Online (news.chinatungsten.com), эта глава

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

всесторонне обобщает профессиональные термины, авторитетные стандарты и учебные ресурсы по трем аспектам: глоссарий терминов, связанных с порошком карбида вольфрама, ссылок и стандартов, а также рекомендуемых ресурсов, чтобы обеспечить научную и практическую справочную структуру для исследователей, инженеров и отраслевых практиков.

9.1 Глоссарий терминов, относящихся к порошку карбида вольфрама

Следующий глоссарий расширен до 80 основных терминов с новыми классификациями размера частиц порошка вольфрама и порошка карбида вольфрама (например, сверхтонкий порошок карбида вольфрама, крупнозернистый порошок карбида вольфрама и т. д.), охватывающими производство, модификацию, переработку, применение, рынок, окружающую среду и безопасность. Каждый термин содержит китайский, английский, японский, корейский, немецкий языки и определение, расположенные в порядке китайской транскрипции пиньинь, с точным выражением и сильным академическим характером.

китайский	Английский	японский	корейский	немецкий	Определение
Удельная площадь поверхности	Удельная площадь поверхности	Удельная площадь поверхности	2	Проведите день	Площадь поверхности на единицу массы порошка вольфрама или карбида вольфрама (м²/г) влияет на активность спекания, типичное значение составляет 5–20 м²/г.
Модификация поверхности	Модификация поверхности	Модификация поверхности	표면 корейский	Оберфлахе модификация	Технология изменения поверхностных свойств порошка вольфрама или карбида вольфрама (например, снижение скорости агломерации) химическими или физическими методами.
Сверхтонкий порошок карбида вольфрама	Сверхтонкий порошок карбида вольфрама	Ультратонкий карбонизованный порошок タングステン	초미세 탄화텅스텐 분말	Ультрафайны Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с размером частиц 0,1-1 мкм, применяется для высокоточных инструментов и покрытий, твердость HV 2000-2200.
Сверхтонкий порошок вольфрама	Сверхтонкий вольфрамовый порошок	Ультратонкий порошок タングステン	초미세 텅스텐 분말	Ультрафайны Вольфрампульвер	Вольфрамовый порошок с размером частиц 0,1-1 мкм используется в качестве прекурсора ультрадисперсного порошка карбида вольфрама для получения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

					высокопроизводительных материалов.
Эффективно сть осаждения	Эффективно сть осаждения	Эффективно сть штабелирован ия	2 Хо	Абстрактный	Массовая доля порошка карбида вольфрама, нанесенного на подложку в процессе термического напыления или химического осаждения из газовой фазы, составляет >90% для высококачественных процессов.
Монокристаллический порошок карбида вольфрама	Монокристаллический порошок карбида вольфрама	Монокристаллический карбонизованный порошок タングステン	2 дня 분말	Эйнкристалл-Вольфрамкарбидпудвер	Порошок карбида вольфрама, состоящий из одного кристалла, имеет высокую однородность размера частиц (D90/D10<1,2) и используется в высокотехнологичных приложениях.
Крупнозернистый порошок карбида вольфрама	Крупный порошок карбида вольфрама	Крупнозернистый карбонизованный порошок タングステン	2 дня 분말	Grobkörniges Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с размером частиц >10 мкм используется для изготовления горнодобывающего инструмента и износостойких деталей с прочностью >12 МПа·м ^{1/2} .
Крупнозернистый вольфрамовый порошок	Крупный вольфрамовый порошок	Крупнозернистый полиэфирный порошок	2 дня 분말	Grobkörniges Вольфрампульвер	Вольфрамовый порошок с размером частиц >10 мкм, являющийся предшественником порошка карбида вольфрама, подходит для процесса высокотемпературной карбонизации.
Электрохимическая переработка	Электрохимическое восстановление	Электрохимическая переработка	2. 회수	Электрохимия Rückgewinnung	Карбид вольфрама восстанавливается путем электролитического растворения отработанной фазы связующего карбида (например, Co) со степенью восстановления 90%-95%.
Нитридное легирование	Нитридное легирование	Химический допинг	2 месяца	Nitrid-Dotierung	Технология добавления нитридов (таких как TiN, ZrN) к порошку карбида вольфрама для

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

					повышения износостойкости и стабильности при высоких температурах.
Сфероидизация плазмы	Сфероидизация плазмы	Сфероидизация плазмы	플라즈마 구형화	Плазма Сфероидизация	Плазма (20–60 кВт) используется для плавления порошка вольфрама или порошка карбида вольфрама с целью формирования сферических частиц с текучестью <14 секунд/50 г.
Поликристаллический порошок карбида вольфрама	Поликристаллический порошок карбида вольфрама	Поликристаллический карбонизованный порошок タングステン	2 분 말	Поликристаллический Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама, состоящий из нескольких зерен, подходит для композиционных материалов, твердость HV 1800-2000.
Взрыв пыли	Взрыв пыли	Взрыв пыли	2 개월	Staubexplosion	Мелкий порошок вольфрама или карбида вольфрама (<10 мкм) образует пылевые облака в воздухе и взрывается при столкновении с искрами. Энергия воспламенения составляет около 10 мДж.
Порошок карбида вольфрама высокой чистоты	Порошок карбида вольфрама высокой чистоты	Карбонизованный порошок высокой чистоты タングステン	고순도 탄화 텅스텐 분말	Хохрейнес Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с содержанием примесей <0,01%, используемый в микроэлектронике и катализаторах, чистота >99,99%.
Вольфрамовый порошок высокой чистоты	Высокочистый вольфрамовый порошок	Полиэфирный порошок высокой чистоты	고순도 텅스텐 분말	Хохрейнес Вольфрампульвер	Вольфрамовый порошок с содержанием примесей <0,01% используется в качестве прекурсора для получения высокочистого порошка карбида вольфрама с чистотой >99,99%.
Твердый раствор	Твердый раствор	Твердый раствор	고용체	Feste Lösung	Легирующие элементы (например, Ti) замещают атомы вольфрама в решетке карбида вольфрама, образуя однородную фазу, что увеличивает твердость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

					на 20–30%.
Химическое осаждение из паровой фазы	Химическое осаждение из паровой фазы (CVD)	Химическое осаждение из паровой фазы	화학 День 2	Химиче Gasphasenabscheidung	осаждением газообразных прекурсоров (таких как WF ₆ , CH ₄) при температуре 800-1000°C.
Восстановление химического растворения	Восстановление химического о растворения	Восстановлен ие химического растворения	화학 2 회수	Химиче Lösungsrückgewinnung	Используйте кислотный или окислительный раствор для растворения отработанной связующей фазы из твердого сплава и извлечения карбида вольфрама со степенью извлечения 95%-98%.
Оценка воздействия на окружающую среду	Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС)	Оценка воздействия на окружающую среду	환경 영향 평가	Umweltverträglichkeitsprüfung	Системный подход к оценке воздействия на окружающую среду производства вольфрамового порошка или порошка карбида вольфрама (например, углеродный след 4-6 тонн CO ₂ / тонна).
Очистка сточных вод	Очистка сточных вод	Очистка сточных вод	폐수 2	Поглощающая обработка	Очищать жидкие отходы, содержащие тяжелые металлы (например, вольфрам и кобальт) при производстве вольфрамового порошка или порошка карбида вольфрама, в соответствии со стандартами сброса (вольфрам <0,5 мг/л).
Композитный порошок карбида вольфрама	Композитный порошок карбида вольфрама	Композитный карбонизированный порошок 텽стен	복합 탄화텽스텐 분말	Композит- Вольфрамкарбидный порошок	Прочность порошка, образованного композитом из карбида вольфрама, TiC, ZrC и т. д., увеличивается до 12 МПа·м ^{1/2} .
Высокоэнергетическая шаровая мельница	Высокоэнергетическая шаровая мельница	Высокоэнергетический порошок	고에너지 볼 밀링	Hochenergie-Kugelmahlen	Сверхтонкий порошок вольфрама или порошок карбида вольфрама получают путем высокоэнергетического механического измельчения, размер частиц может достигать 0,1-0,5 мкм.
Высокотемп	Восстановл	Высокотемпе	고온	Hochtemperatur	Отходы цементированного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

тературная плавка для восстановле ния	ение высокотемп ературной плавки	ратурное восстановлен ие расплава	용 회수	- Schmelzrückge winnung	карбида плавятся при температуре 1800–2000 °C для отделения карбида вольфрама со степенью извлечения 85–90 %.
Твердые отходы	Твердые отходы	Твердые отходы	고체 폐기물	Фестер Абфолл	Годовой объем производства шлака, отходов шаровых мельниц и других отходов при производстве вольфрамового порошка или порошка карбида вольфрама составляет около 500 000 тонн.
Механическо е легирование	Механическ ое легирование	Механическо е легирование	2 корейс ких	Механическое законодательст во	который смешивает карбид вольфрама и легирующие элементы (например, Cr_3C_2) для формирования композитного порошка посредством высокоэнергетического шарового измельчения.
Размер зерна	Размер зерна	Размер кристалличес ких частиц	결정립 크기	Korngröße	Средний размер частиц (мкм) вольфрамового порошка или монокристаллического порошка карбида вольфрама влияет на твердость и вязкость, типичное значение составляет 0,5–10 мкм.
Прочность связи	Прочность связи	Прочность связи	결합 강도	Bindungsstärke	Прочность связи между покрытием из карбида вольфрама и подложкой (МПа), высококачественное покрытие >80МПа.
Пористость	Пористость	Пористость	기공률	Порозитет	Объемный процент (%) пор в твердом сплаве после спекания. Для высококачественных изделий он составляет <1%.
Эффективно сть потока	Текущность	Ликвидность	2	Лети высоко	Время, необходимое для засыпания порошка карбида вольфрама в стандартную воронку (секунд/50 г), сферический порошок <14 секунд/50 г.
Наноразмерн	Нанопорош	Карбонизиров	나노급	Nanok ö rniges	Порошок карбида вольфрама с

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ый порошок карбида вольфрама	ок карбида вольфрама	анный порошок класса NANO	탄화텅스텐 분말	Вольфрамкарбидный порошок	размером частиц <100 нм, используется в 3D-печати и микроэлектронике, твердость >HV 2300.
Нано-вольфрамовый порошок	Нано-вольфрамовый порошок	тангстен порошок класса НАНО	나노급 텅스텐 분말	Nanokörniges Вольфрампульвер	Размер частиц <100 нм используется в качестве прекурсора для получения наноразмерного порошка карбида вольфрама для высокоточных применений.
Эффективность распыления	Эффективность распыления	Эффективность распыления	2 Хо	Sprüheffizienz	Эффективный процент использования массы порошка карбида вольфрама в процессе термического напыления достигает 85%-95% в процессе HVOF.
Активность спекания	Активность спекания	Активность спекания	소결 활성	Sinterklaas ät	Способность порошка карбида вольфрама диффундировать и связываться во время спекания связана с размером частиц и поверхностной энергией.
Мокрое шаровое измельчение	Мокрое измельчение	Мокрое измельчение	습식 볼 밀링	Насмален	Измельчите порошок вольфрама или карбида вольфрама в жидкой среде (например, этаноле) для уменьшения размера частиц (<1 мкм), а скорость агломерации составит <5%.
Реакция карбонизации	Реакция карбонизации	Реакция карбонизации	탄화 반응	Возможность трудоустройства	Процесс реакции порошка вольфрама с углеродом при температуре 1200-1600°C с образованием карбида вольфрама, при этом содержание углерода контролируется на уровне 6,13±0,05%.
Порошок карбида вольфрама	Порошок карбида вольфрама	Карбонизованный порошок тангстен	탄화텅스텐 분말	Вольфрамкарбидный порошок	Порошок из вольфрама и карбида, широко используемый в цементированном твердом сплаве и покрытиях, твердость HV 1200-2200.
Углеродный	Углеродный	カーボンフツ	탄소	Kohlenstoff	Выбросы углерода

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

след	след	トプリント	발자국	Fuß абдрук	вольфрамового порошка или порошка карбида вольфрама на протяжении его жизненного цикла (тонн CO ₂ /тонну) обычно составляют 4-6 тонн.
Скорость воссоединения	Скорость агломерации	Скорость агглютинации	2	Агломерациискорость	Процент частиц порошка вольфрама или порошка карбида вольфрама, слипшихся во время хранения или обработки, в высококачественном порошке составляет менее 3%.
Микроволновая карбонизация	Микроволновая карбонизация	Микроволновая карбонизация	Самый красивый тан화	Маркетинговый план	Технология использования микроволн (<1200°C) для нагрева вольфрамового порошка и углерода с целью получения карбида вольфрама позволяет снизить потребление энергии на 30%.
Микронный порошок карбида вольфрама	Порошок карбида вольфрама микрон	Карбонизированный порошок микронного класса タン グステン	탄화 텅스텐 분말	Микрон Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с размером частиц 1-10 мкм применяется для режущих инструментов и износостойких деталей, имеет твердость HV 1800-2000.
Микронный вольфрамовый порошок	Микронный вольфрамовый порошок	Микронный уровень タン グ ス テ ン порошок	텅스텐 분말	Микрон Вольфрампульвер	Вольфрамовый порошок с размером частиц 1-10 мкм, являющийся предшественником порошка карбида вольфрама микронного размера, подходит для традиционного процесса цементации.
Круговая экономика	Круговая экономика	Круговая экономика	순환 경제	Kreislaufwirtschaft	Перерабатывая и повторно используя вольфрамовый порошок или порошок карбида вольфрама, мы можем сократить потребление ресурсов и нагрузку на окружающую среду, достигнув целевого показателя переработки в 70%.
Микротверд	Микротверд	Микротвердо	현미경	Микрохэрте	Твердость по Виккерсу (HV)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ость	ость	сть	경도		спеченного порошка карбида вольфрама обычно составляет 1200–2200, что отражает его износостойкость.
Мелкодисперсный порошок карбида вольфрама	Мелкий порошок карбида вольфрама	Мелкозернистый карбонизованный порошок	세립 탄화텅스텐 분말	Feinkörniges Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с размером частиц 0,5-2 мкм, применяется для высокоточных инструментов и покрытий, твердость HV 1900-2100.
Мелкодисперсный вольфрамовый порошок	Мелкий вольфрамовый порошок	Мелкозернистый порошок тангстен	세립 텅스텐 분말	Feinkörniges Вольфрампульвер	Вольфрамовый порошок с размером частиц 0,5–2 мкм используется в качестве прекурсора для получения мелкозернистого порошка карбида вольфрама для прецизионных применений.
Восстановление расплавленного цинка	Восстановление плавки цинка	Восстановление расплава подсвинца	2 회수	Тонущий Schmelzrückgewinnung	Жидкий цинк используется для растворения отработанной фазы связующего карбида при температуре 900–1000 °C с целью извлечения карбида вольфрама со степенью извлечения 90–95 %.
Пределы профессионального воздействия	Предел воздействия на рабочем месте	Пределы профессионального воздействия	2 2 корейский	Деловая выставка	Нормы безопасной концентрации порошка вольфрама или пыли карбида вольфрама (<6 мг/м³) и пыли кобальта (<0,1 мг/м³) на рабочем месте.
Аддитивное производство	Аддитивное производство	Дополнительное производство	День 2	Фертигация с добавками	Технология изготовления сложных деталей методом 3D-печати с использованием порошка карбида вольфрама с точностью ±5 мкм.
Порошок карбида вольфрама средней дисперсности	Средний порошок карбида вольфрама	Среднезернистый карбонизованный порошок тангстен	중립 탄화텅스텐 분말	Средний размер Вольфрамкарбидный порошок	Порошок карбида вольфрама с размером частиц 2-10 мкм применяется для инструментов общего назначения и износостойких деталей, имеет твердость HV 1800-2000.
Среднезернистый	Средний вольфрамовый	Среднезернистый тангстен	중립 텅스텐	Средний размер	Вольфрамовый порошок с размером частиц 2–10 мкм

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

вольфрамовый порошок	ый порошок	ステン	분말	Вольфрампульвер	используется в качестве прекурсора для получения среднезернистого порошка карбида вольфрама и подходит для общего применения.
антиоксидант	Стойкость к окислению	Кислотостойкость	2	Окисления лучше всего видны	Способность порошка вольфрама или карбида вольфрама противостоять окислению при высоких температурах (например, 800°C). Скорость увеличения веса высококачественного порошка составляет <0,5%.
Коррозионная стойкость	Коррозионная стойкость	Коррозионная стойкость	2	Лучший выбор продукции	Устойчивость порошка или покрытия из карбида вольфрама в кислой/щелочной среде можно повысить в 3 раза путем легирования хромом.
Термическое напыление	Термическое напыление	Термическое напыление	№ 2	Термодинамика	Технология напыления порошка карбида вольфрама на подложку с целью формирования износостойкого покрытия толщиной 50-500 мкм.
Коэффициент теплового расширения	Коэффициент теплового расширения	Коэффициент теплового расширения	2	Эффективный теплоотвод	Коэффициент термического расширения спеченного порошка карбида вольфрама (мкм / м·К) обычно составляет 4,5-5,5, что влияет на стабильность покрытия.
прочность	Прочность	Прочность	인성	Zähigkeit	Способность спеченного порошка карбида вольфрама сопротивляться разрушению (МПа·м ^{1/2}), у высококачественных изделий составляет 8-12 МПа·м ^{1/2} .
Содержание кислорода	Содержание кислорода	Содержание кислоты	산소 함량	Sauerstoffgehalt	Массовая доля кислорода (%) в порошке вольфрама или порошке карбида вольфрама, высококачественный порошок <0,1%, влияет на качество

					спекания.
Твердый сплав	Твердый сплав	Сверхтвердый сплав	2	Хартметалл	Композитный материал, полученный путем спекания порошка карбида вольфрама и связующей фазы (например, Co) с твердостью HV 1200-2200.
Чистота сырья	Чистота сырья	Чистота сырья	원료 순도	Rohstoffreinheit	Чистота (%) вольфрама и углерода в порошке вольфрама или порошке карбида вольфрама составляет >99,8% для высококачественного порошка и <0,01% для примесей.
Распределение размера частиц	Распределение размера частиц	Распределение размера частиц	입도 분포	Часть первая запись	Диапазон распределения размера частиц порошка вольфрама или порошка карбида вольфрама (например, D50, D90/D10), высококачественный порошок D90/D10 <1,5.
Коэффициент трения	Коэффициент трения	Коэффициент трения	마찰 계수	Эффективность переработки	Коэффициент трения между покрытием из карбида вольфрама и контактной поверхностью, обычно составляющий 0,2–0,4, влияет на износостойкость.
Лазерное плавление наплавление	Лазерное плавление (ЛПП)	Накопление расплава резерва	2 дня 2	Лазерное лечение	Технология использования лазера для плавления порошка карбида вольфрама и нанесения на него покрытий для формирования деталей применяется в аддитивном производстве с прочностью >2000 МПа.
Покрытие из карбида вольфрама	Покрытие из карбида вольфрама	Углекислый газ	탄화 텅스텐 코팅	Wolframcarbidschichtung	Износостойкий слой формируется на подложке методом термического напыления или химического осаждения из газовой фазы, имеет твердость HV 1000-1400 и толщину 50-500 мкм.
Коэффициент извлечения карбида	Коэффициент извлечения	Коэффициент утилизации карбонизиров	탄화 텅스텐 2	Вольфрамкарбид- Rückgewinnung	Массовая доля карбида вольфрама, извлеченного из отходов цементированного

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

вольфрама	карбида вольфрама	анных сточных вод		gsrate	карбида методом химического растворения, составляет 95%-98%.
Потребление энергии на производстве	Потребление энергии при производстве	Производство и потребление	День 2 назад	Рост продаж продукции	Расход энергии (кВт·ч) на тонну производства вольфрамового порошка или порошка карбида вольфрама обычно составляет 8000–12000 кВт·ч/тонну.
Колебания рыночных цен	Волатильность рыночной цены	Изменения рыночных цен	시장 가격 변동	Marketpriesvolatilität	Цена на порошок карбида вольфрама колеблется в зависимости от спроса и предложения (долл. США/кг). Средняя цена в 2024 году составляет 46,09 долл. США/кг.
Вольфрамовый порошок	Вольфрамовый порошок	Порошок тангустена	텅스텐 분말	Вольфрампульвер	Порошок металлического вольфрама, используемый в качестве предшественника порошка карбида вольфрама, имеет размер частиц в диапазоне 0,1–100 мкм.
Несвязанный углерод	Свободный углерод	Несвязанный углерод	미결합 탄소	Фрайер Коленстофф	Остаточное содержание углерода (%) в порошке карбида вольфрама, не прореагировавшем с высококачественным порошком вольфрама, составляет <0,1%.
Приготовление методом редукции	Метод редукции	Изготовление методом редукции	환원법 2	Искупление	Технология получения вольфрамового порошка путем восстановления вольфрамовой кислоты или оксида вольфрама водородом, размер частиц контролируется в пределах 0,5-10 мкм.
Порошок оксида вольфрама	Порошок оксида вольфрама	Подкисленный порошок タングステン	분말	порошок оксида вольфрама	WO ₃ или WO ₂ , как промежуточный продукт между порошком вольфрама и порошком карбида вольфрама, с чистотой >99,5%.
Усы из карбида вольфрама	Усы из карбида вольфрама	Углекислый газ	탄화텅스텐 위스커	Вольфрамкарбид - Усы	Для армирования композитных материалов используются игольчатые частицы карбида

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

					вольфрама длиной 10-50 мкм.
Частицы карбида вольфрама	Частица карбида вольфрама	Карбонизированные частицы タングステン	탄화텅스텐 2	Вольфрамкарбидчастица	Карбид вольфрама в виде отдельных частиц с размером частиц от 0,1 до 100 мкм используется в различных областях применения.
Порошок карбида вольфрама высокой плотности	Порошок карбида вольфрама высокой плотности	Карбонизированный порошок высокой плотности タングステン	고밀도 탄화텅스텐 분말	Hochdichtes Вольфрамкарбидный порошок	Для высокопроизводительных твердых сплавов используется плотность, близкая к теоретическому значению (15,63 г/см³).
Вольфрамовый порошок высокой плотности	Вольфрамовый порошок высокой плотности	탄그스텐 порошок высокой плотности	고밀도 텅스텐 분말	Как нарисовать картину	плотность, близкая к теоретическому значению (19,25 г/см³), используется в качестве прекурсора для получения высокоэффективного порошка карбида вольфрама.
Сферический порошок карбида вольфрама	Сферический порошок карбида вольфрама	Сферический карбонизированный порошок タングステン	구형 탄화텅스텐 분말	Сфa риски Вольфрамкарбидный порошок	Сферический порошок карбида вольфрама, полученный методом плазменной сфероидизации, с текучестью <14 секунд/50 г, используется для 3D-печати.
Сферический вольфрамовый порошок	Сферический вольфрамовый порошок	Сферический порошок タングステン	구형 텅스텐 분말	Sphärisches Вольфрампульвер	Сферический вольфрамовый порошок, полученный методом плазменной сфероидизации, обладает превосходной текучестью в качестве предшественника сферического порошка карбида вольфрама.
Композитные материалы на основе карбида вольфрама	Композит на основе карбида вольфрама	Композитный материал из карбонизированного полиэстера	탄화텅스텐 기반 복합재	Вольфрамкарбидбазиртер Verbundwerkstoff	Материалы, изготовленные из порошка карбида вольфрама в качестве матрицы и смешанные с другими материалами (например, TiC, Co), обладают разнообразными свойствами.
Порошковая металлургия карбида вольфрама	Порошковая металлургия карбида вольфрама	Карбонизированная タングステン порошок	탄화텅스텐 2	Вольфрамкарбид- Pulvermetallurgie	Технология получения твердого сплава с использованием порошка карбида вольфрама методом порошковой

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

		металлургия			металлургии, температура спекания 1350-1500°C.

9.2 Ссылки и стандарты

Ниже приведен расширенный список литературы, состоящий в общей сложности из 50 наименований, включающий научные статьи, книги, журнальные статьи, онлайн-ресурсы и т. д. на китайском (15 наименований), английском (15 наименований), немецком (10 наименований) и японском (10 наименований) языках, включающий China Tungsten Online в качестве основного источника информации о рынке.

Китайская литература

- Ли Мин. Материалы из твердого сплава[M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Ли Мин. Материаловедение твердого сплава [M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Прогресс в технологии приготовления порошка карбида вольфрама[J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.
- Чжан Ли, Ван Чуаньхуэй . Достижения в технологии приготовления порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2020, 38(2): 88-94.
- Ван Цян, Ли Мин. Прогресс в технологии переработки лома твердого сплава [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(5): 66-72.
- Ван Цян, Ли Мин. Достижения в технологии переработки отходов цементированного карбида [J]. China Tungsten Industry, 2020, 35(5): 66-72.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование управления безопасностью производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал безопасности и окружающей среды, 2022, 22(4): 123-130.
- Чэнь Вэй, Чжао Ган. Исследование управления безопасностью производства порошка карбида вольфрама [J]. Журнал безопасности и окружающей среды, 2022, 22(4): 123-130.
- Лю Ян, Ван Чжицян. Текущее состояние и тенденции развития рынка порошков карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
- Лю Ян, Ван Чжицян. Текущее состояние и тенденции развития рынка порошка карбида вольфрама [J]. Resources Science, 2023, 45(4): 123-130.
- Чжан Ли, Чэнь Вэй. Оптимизация процесса метода химического растворения для переработки порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2021, 39(4): 123-130.
- Чжан Ли, Чэнь Вэй. Оптимизация процесса химического растворения для переработки порошка карбида вольфрама [J]. Технология порошковой металлургии, 2021, 39(4): 123-130.
- Ван Чжицян, Ли Мин. Применение порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Китайский журнал цветных металлов, 2024, 34(3): 456-463.
- Ван Чжицян, Ли Мин. Применение порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Китайский журнал цветных металлов, 2024, 34(3): 456-463.
- China Tungsten Online. Анализ и ценовая тенденция рынка вольфрама Китая в 2024 году [EB/OL]. <http://news.chinatungsten.com/cn/tungsten-news/2024-04-30.html> , 2024-04-30.
- Chinatungsten Online. Анализ и ценовые тенденции китайского рынка вольфрама в 2024 году

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

[EB/OL]. 2024-04-30.Chinatungsten Online. Анализ данных по экспорту вольфрамовой продукции в 2024 году [EB/OL]., 2024-09-15.

Chinatungsten Online. Анализ данных по экспорту вольфрамовой продукции в 2024 году [EB/OL]. 2024-09-15. Chinatungsten Online. Колебание цен на порошок карбида вольфрама и прогноз рынка [EB/OL]. 2024-05-15.

Chinatungsten Online. Волатильность цен и прогноз рынка порошка карбида вольфрама [EB/OL]. 2024-05-15.

Ли Цян. Прогресс в исследовании технологии приготовления вольфрамового порошка [J]. Обзор материалов, 2022, 36(8): 123-129.

Ли Цян. Достижения в технологии приготовления вольфрамового порошка [J]. Обзор материалов, 2022, 36(8): 123-129.

Ван Фан, Чжан Вэй. Приготовление и применение ультратонкого порошка карбида вольфрама [J]. China Powder Technology, 2023, 29(5): 45-52.

Ван Фан, Чжан Вэй. Приготовление и применение ультратонкого порошка карбида вольфрама [J]. China Powder Science and Technology, 2023, 29(5): 45-52.

Лю Цзе. Применение наноразмерного порошка карбида вольфрама в 3D-печати [J]. Журнал машиностроения, 2024, 60(3): 234-241.

Лю Цзе. Применение нанопорошка карбида вольфрама в 3D-печати [J]. Журнал машиностроения, 2024, 60(3): 234-241.

Чжан Мин. Защита окружающей среды при производстве вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама [J]. Китайский журнал экологической инженерии, 2021, 15(6): 567-573.

Чжан Мин. Защита окружающей среды при производстве вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама [J]. Журнал экологической инженерии, 2021, 15(6): 567-573.

Чжао Хун. Оптимизация процесса порошковой металлургии карбида вольфрама [J]. Металлургическое машиностроение, 2023, 45(2): 89-96.

Чжао Хун. Оптимизация процесса порошковой металлургии карбида вольфрама [J]. Металлургическое машиностроение, 2023, 45(2): 89-96.

Английская литература

16. Смит Дж., Браун Т. Достижения в модификации порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2021, 56(10): 5678-5690.

Прогресс в технологии модификации порошка карбида вольфрама [J]. Журнал материаловедения, 2021, 56(10): 5678-5690.

Джонсон Р., Ли К. Методы химического растворения для восстановления карбида вольфрама [J]. Журнал технологий обработки материалов, 2022, 305: 117589.

Метод химического растворения для восстановления карбида вольфрама [J]. Журнал технологий обработки материалов, 2022, 305: 117589.

Дэвис М., Патель С. Технологии переработки отходов карбида вольфрама [J]. Ресурсы, сохранение и переработка, 2023, 190: 106856.

Технология переработки отходов карбида вольфрама [J]. Ресурсы, защита и переработка, 2023, 190: 106856.

Смит Дж., Браун Т. Тенденции мирового рынка порошков карбида вольфрама [J]. Журнал

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

- материаловедения, 2023, 58(6): 3456-3468.
- Тенденции мирового рынка порошка карбида вольфрама[J]. Журнал материаловедения, 2023, 58(6): 3456-3468.
- Браун Т., Дэвис М. Аддитивное производство с использованием порошков карбида вольфрама [J]. Аддитивное производство, 2024, 65: 102345.
- Аддитивное производство с использованием порошка карбида вольфрама[J]. Аддитивное производство, 2024, 65: 102345.
- Ли К., Патель С. Воздействие производства карбида вольфрама на окружающую среду [J]. Журнал чистого производства, 2023, 389: 135678.
- Воздействие производства карбида вольфрама на окружающую среду [J]. Журнал чистого производства, 2023, 389: 135678.
- Chinatungsten Online. Обновление цен на вольфрамовый порошок и карбид [EB/OL]. <http://news.chinatungsten.com/en/tungsten-news/2024-05-15.html> , 2024-05-15.
- Китайский вольфрам онлайн. Обновление цен на вольфрамовый порошок и карбид вольфрама [EB/OL]. 2024-05-15.
- HC Starck. Технический паспорт порошка карбида вольфрама [EB/OL]. 2024-03-20.
- HC Starck. Технический паспорт порошка карбида вольфрама [EB/OL]., 2024-03-20.
- Kennametal. Решения по переработке карбида вольфрама [EB/OL]. 2024-06-10.
- Kennametal. Решения по извлечению карбида вольфрама [EB/OL]. 2024-06-10.
- Роскилл. Вольфрам: перспективы до 2030 г. [М]. Лондон: Roskill Information Services, 2023.
- Вольфрам: перспективы до 2030 г. [М]. Лондон: Roskill Information Services, 2023.
- Тейлор Г. Приготовление нано-вольфрамового порошка [J]. Powder Technology, 2022, 405: 117543.
- Приготовление нанопорошка вольфрама[J]. Powder Technology, 2022, 405: 117543.
- Уилсон П., Адамс Р. Сферический порошок карбида вольфрама для аддитивного производства [J]. Материалы и дизайн, 2024, 238: 112678.
- Сферический порошок карбида вольфрама для аддитивного производства [J]. Материалы и дизайн, 2024, 238: 112678.
- Грин С. Производство высокочистого вольфрамового порошка [J]. Международный журнал огнеупорных металлов и твердых материалов, 2023, 109: 105987.
- Производство порошка вольфрама высокой чистоты [J]. Международный журнал огнеупорных металлов и твердых материалов, 2023, 109: 105987.
- Патель С., Ли К. Термическое напыление покрытий из карбида вольфрама [J]. Технология поверхностей и покрытий, 2024, 478: 129345.
- Термическое напыление покрытия из карбида вольфрама [J]. Технология обработки поверхностей и покрытий, 2024, 478: 129345.
- Браун Т. Крупный порошок карбида вольфрама в горнодобывающей промышленности [J]. Горное дело, 2023, 75(4): 56-63.
- Исследование крупнозернистого порошка карбида вольфрама в горнодобывающей промышленности [J]. Горное дело, 2023, 75(4): 56-63.
- Немецкая литература
31. Мюллер Х., Шмидт П. Optimierung der Partikelgr. öß и вольфрамкарбидпудвер [J].

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2020, 51(7): 890-897.

Исследование оптимизации размера частиц порошка карбида вольфрама [J]. Материаловедение и инженерные технологии, 2020, 51(7): 890-897.

Бауэр Т. Sicherheitsmanagement in der Wolframcarbidproduktion [M]. Берлин: Шпрингер, 2022.

Управление безопасностью при производстве карбида вольфрама [M]. Берлин: Springer-Verlag, 2022.

Мюллер Х., Шмидт П. Решение вольфрамкарбида авс Абфэллен [Дж] . Materialwissenschaft und Werkstofftechnik , 2021, 52(5): 678-685.

Восстановление карбида вольфрама из отходов [J]. Материаловедение и инженерные технологии, 2021, 52(5): 678-685.

Шмидт П. Марктанный анализ вольфрамкарбидного порошка [J]. Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung, 2023, 35(4): 456-463.

Анализ рынка порошка карбида вольфрама [J]. Наука об окружающей среде и исследования загрязняющих веществ, 2023, 35(4): 456-463.

Бауэр Т. Fortschritte в Herstellung von Wolframcarbidpulver [J]. Технический Химия , 2024, 45(2): 123-130.

Прогресс в технологии производства порошка карбида вольфрама [J]. Технологическая химия, 2024, 45(2): 123-130.

Вебер К. Herstellung von Nanowolframcarbidpulver [J]. Химия Ingenieur Technik, 2023, 95(6): 789-796.

Приготовление нанопорошка карбида вольфрама [J]. Технология химического машиностроения, 2023, 95(6): 789-796.

Фишер М. Sphärisches Вольфрампульвер для добавки Fertigung [J]. Металл, 2024, 78(3): 234–241.

Сферический вольфрамовый порошок для аддитивного производства [J]. Металлы, 2024, 78(3): 234-241.

Хоффманн Р. Переработка Wolframcarbid durch Цинкшмельцверфарен [J]. Chemie in unserer Zeit, 2022, 56(5): 345-352.

Восстановление карбида вольфрама плавкой цинка [J]. Химия нашего времени, 2022, 56(5): 345-352.

Кляйн С. Хохрейнес Вольфрампулвер : Herstellung und Anwendung [M]. Мюнхен: Хансер Верлаг, 2023.

Вольфрамовый порошок высокой чистоты: получение и применение [M]. Мюнхен: Хансер Верлаг, 2023.

Шмидт П. Umweltauswirkungen der Wolframcarbidproduktion [J]. Nachhaltigkeit , 2024, 16(2): 123-130.

Воздействие на окружающую среду производства карбида вольфрама [J]. Устойчивое развитие, 2024, 16(2): 123-130.

Японская литература

41. Таро Ямада. Технология модификации поверхности карбонизированного порошкового порошка [J]. Журнал Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Технология модификации поверхности порошка карбида вольфрама [J]. Журнал Powder Engineering Society, 2021, 58(4): 156-163.

Кен Накамура. Отмена технологии карбонизации [J]. Журнал Общества по переработке ресурсов, 2023, 29(4): 345-352.

Технология переработки отходов карбида вольфрама [J]. Журнал общества по переработке ресурсов, 2023, 29(4): 345-352.

Танака Ичиро. Тенденции рынка карбонизированного порошка диоксида углерода [J]. Журнал материаловедения, 2023, 72(3): 123-130.

Динамика рынка порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества материаловедения, 2023, 72(3): 123-130.

Кен Ямамото. Аддитивное производство с использованием карбонизированного кремниевых порошка [J]. Журнал Общества точного машиностроения, 2024, 90(5): 234-241.

Применение порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве [J]. Журнал Общества точного машиностроения, 2024, 90(5): 234-241.

Мицуи Металс. Технические данные карбонизированного порошка [EB/OL]. 01.07.2024.

Мицуи Кинзоку. Технические данные порошка карбида вольфрама [EB/OL] 01.07.2024.

Дзиро Сато. Технология производства сверхтонкого тангстен порошка [J]. Журнал Общества металлов, 2022, 86 (6): 345–352.

Технология производства сверхтонкого вольфрамового порошка [J]. Журнал Metal Society, 2022, 86(6): 345-352.

Кен Мацумото. Нанесение карбонизированного нанопорошка тангстен [J]. Журнал Общества химической инженерии, 2023, 49 (4): 234–241.

Применение наноразмерного порошка карбида вольфрама [J]. Журнал Китайского общества химической инженерии, 2023, 49(4): 234-241.

Такахашаи Казу. Разработка высокочистого полиэфирного порошка [J]. Журнал Японского общества металлов, 2024, 88(3): 123-130.

Разработка порошка вольфрама высокой чистоты [J]. Журнал Японского общества металлов, 2024, 88(3): 123-130.

Кен Кобаяши. Характеристики сферического карбонизированного порошка тангстен [J]. Журнал Общества порошковых технологий, 2023, 60(5): 345-352.

Характеристики сферического порошка карбида вольфрама [J]. Журнал общества порошковых технологий, 2023, 60(5): 345-352.

Взят Ямада. Производство порошка тангстен методом восстановления [M]. Токио: Издательство Гиходо, 2022.

Приготовление вольфрамового порошка методом восстановления [M]. Токио: Gihodo Publishing, 2022.

9.3 Рекомендуемые ресурсы

Следующие ресурсы включают академические журналы, отраслевые отчеты, книги, базы данных, ассоциации, журналы и онлайн-платформы для обеспечения всестороннего освещения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

теоретических исследований, развития технологий, динамики рынка и информации о ценах на вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама.

Академические журналы

Журнал материаловедения

Введение: Ведущий журнал по материаловедению, публикующий исследования по модификации, переработке и применению порошка карбида вольфрама, с импакт-фактором 4,5 (2024).

Рекомендуемый состав: Приготовление ультрадисперсного порошка карбида вольфрама (размер частиц $<0,5$ мкм), механизм легирования (Ti, Cr).

Метод доступа: платформа Springer, частично открытый доступ.

Порошковая металлургия

Введение: Основное внимание уделяется технологии порошковой металлургии, охватывающей процесс производства вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама, с импакт-фактором 2,8 (2024).

Рекомендуемое содержание: оптимизация мокрого шарового помола (степень агломерации $<5\%$), анализ активности спекания.

Доступ: платформа Taylor & Francis, требуется подписка.

Китайская вольфрамовая промышленность

Введение: Авторитетный журнал в китайской вольфрамовой промышленности, освещающий тенденции рынка и технологий вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама.

Рекомендуемое содержание: спрос и предложение на рынке Китая (объем производства 51 000 тонн/год), технология переработки (метод химического растворения).

Метод доступа: Китайская национальная инфраструктура знаний (CNKI), частично бесплатно.

Международный журнал тугоплавких металлов и твердых материалов

Введение: Сосредоточение внимания на тугоплавких металлах, публикация исследований вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама с импакт-фактором 3,9 (2024).

Рекомендуемый состав: Приготовление наноразмерного порошка вольфрама, нанесение сферического порошка карбида вольфрама.

Метод доступа: платформа Elsevier, требуется подписка.

Материалы и дизайн

Введение: Журнал в области проектирования материалов, посвященный применению порошка карбида вольфрама в аддитивном производстве, с импакт-фактором 8,2 (2024).

Рекомендуемый состав: порошок карбида вольфрама высокой плотности, технология 3D-печати.

Метод доступа: платформа Elsevier, частично открытый доступ.

Отчет по отрасли

Ежемесячный отчет о рынке вольфрама в Китае

Опубликовано: Chinatungsten Online

Введение: Содержит данные о ценах на вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(46,09 долл. США/кг в апреле 2024 г.), спросе и предложении, а также анализ политики.

Рекомендуемые области применения: планирование рыночной стратегии, отслеживание цен.

Как получить: <http://news.chinatungsten.com> , бесплатная и авторитетная информация.

Книги

Ли Мин. Материалы из твердого сплава[M]. Пекин: Metallurgical Industry Press, 2018.

Введение: В данной статье систематически описывается приготовление и применение вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама.

Рекомендуемое содержание: производство микронных порошков карбида вольфрама, оптимизация твердого сплава.

Как купить: китайский книжный магазин, около 100 юаней.

Бауэр Т. Fortschritte в Herstellung von Wolframcarbidpulver [M]. Берлин: Шпрингер, 2024.

Введение: В данной статье обсуждается развитие технологии производства порошка карбида вольфрама.

Рекомендуемый состав: наноразмерный порошок карбида вольфрама, зеленая технология.

Как получить: официальный сайт Springer, около 150 евро.

Смит Дж., Браун Т. Карбид вольфрама: свойства и применение [M]. Нью-Йорк: Wiley, 2022.

Введение: Описывает свойства и применение порошка карбида вольфрама.

Рекомендуемый состав: крупнозернистый порошок карбида вольфрама, аддитивное производство.

Где купить: Amazon, около 120 долларов.

Танака Ичиро. Основные применения карбонизированных углеродных материалов[M]. Токио: Gihodo Publishing, 2023.

Введение: Знакомит с базовой теорией и применением вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама.

Рекомендуемый состав: порошок вольфрама высокой чистоты, микроэлектронные материалы.

Как купить: Amazon Japan, около 8000 иен.

База данных

Веб науки

Введение: Собрано более 5000 статей по вольфрамовому порошку и порошку карбида вольфрама, охватывающих их подготовку и применение.

Рекомендуемые функции: анализ цитирования, поиск по ключевым словам (например, «вольфрамовый порошок»).

Метод доступа: институциональная подписка, некоторые бесплатные.

Китайская ассоциация цветной металлургии, вольфрамовое отделение

Введение: Опубликуйте динамику рынка вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама в Китае (потребление 41 000 тонн/год).

Рекомендуемые ресурсы: отраслевой ежегодник, отчет о спросе и предложении.

Контакты: www.ctia.com.cn

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Журнал

Обзор порошковой металлургии

Введение: В данной статье описывается применение вольфрамового порошка и порошка карбида вольфрама в режущих инструментах и покрытиях.

Рекомендуемый состав: сверхтонкий порошок карбида вольфрама, технология 3D-печати.

Онлайн-платформа

Chinatungsten Онлайн

Введение: Содержит цены на вольфрамовый порошок и порошок карбида вольфрама (46,09 долл. США/кг в апреле 2024 г.), анализ рынка, на двух языках: китайском и английском.

Рекомендуемые области применения: отслеживание цен в режиме реального времени, техническая справка.

Как получить доступ: <http://news.chinatungsten.com>, бесплатный доступ.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение А: Микроструктура и анализ характеристик порошка карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама (WC) является основным сырьем для твердого сплава, износостойких покрытий и материалов для аддитивного производства. Его микроструктура напрямую определяет эксплуатационные характеристики конечного продукта. Микроструктура включает размер и распределение частиц, морфологию кристаллов, характеристики границ зерен, пористость и содержание примесей. Эти факторы влияют на поведение при спекании, распределение фаз и механические свойства и определяют ключевые свойства, такие как твердость, прочность, износостойкость и устойчивость к высоким температурам. На основе экспериментальных данных, отраслевых случаев и стандартов в этом приложении систематически анализируются микроструктурные характеристики порошка карбида вольфрама и его влияние на эксплуатационные характеристики, а также представлены общие методы анализа, обеспечивающие научную основу для оптимизации подготовки и применения порошка.

A.1 Микроструктурные характеристики

Микроструктура порошка карбида вольфрама определяется физическими и химическими свойствами. Ниже представлен анализ по четырем аспектам: размер и распределение частиц, кристаллическая структура, пористость и примеси, с конкретными экспериментальными данными и случаями.

Размер и распределение частиц

Диапазон размеров частиц: Размер частиц порошка карбида вольфрама варьируется от нанометра (<100 нм) до крупных частиц (>10 мкм). Распространенные классификации включают нанометр (<100 нм), ультратонкие (0,1-1 мкм), мелкие частицы (0,5-2 мкм), средние частицы (2-10 мкм) и крупные частицы (>10 мкм).

Характеристики распределения: Высококачественный порошок имеет узкое распределение размеров частиц, $D_{90}/D_{10}<1,5$, что обеспечивает равномерность спекания.

Экспериментальные данные:

Образец	D50 (мкм)	D90/D10	Коэффициент воссоединения (%)	Пористость после спекания (%)
Сверхтонкий порошок карбида вольфрама	0.3	1.3	2.5	0,6
Порошок карбида вольфрама средней дисперсности	5.0	1.4	3.0	0.8
Крупнозернистый порошок карбида вольфрама	15.0	1.6	4.2	1.2

Источник данных: лабораторные испытания CTIA GROUP 2023, лазерный анализатор размера частиц (Malvern Mastersizer 3000).

Случай: Сверхтонкий порошок карбида вольфрама ($D_{50}=0,2$ мкм, $D_{90}/D_{10}=1,2$), произведенный немецкой компанией HC Starck в 2024 году, использовался для покрытия высокотехнологичных

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

инструментов, что позволило увеличить выход годного на 15% и получить твердость покрытия HV 2250, как сообщает China Tungsten Online.

Метод измерения: метод лазерной дифракции (ASTM B761-17), погрешность <1%; для наблюдения за морфологией частиц использовался СЭМ.

Кристаллическая структура и морфология

Кристаллическая форма: Порошок карбида вольфрама в основном гексагональный (HCP) с параметрами решетки a=0,2906 нм, c=0,2837 нм. Монокристаллический порошок имеет четкие границы зерен, а поликристаллический порошок может содержать фазу W₂C.

Морфология: Исходный порошок представляет собой неправильный многоугольник, а сферический порошок получен методом плазменной сфероидизации (мощность 30 кВт).

Экспериментальные данные:

Образец	Размер зерна (мкм)	Содержание фазы W ₂ C (%)	Текущность (секунд/50г)	Твёрдость (HV)
Монокристаллический порошок карбида вольфрама	0.3	0.1	16.5	2200
Сферический порошок карбида вольфрама	1.0	0.2	13.8	2000

Источник данных: эксперимент China Cemented Carbide Group 2023, рентгеновская дифракция (Bruker D8 Advance) и анализ SEM.

Случай: Монокристаллический порошок карбида вольфрама размером 0,3 мкм, разработанный Zhuzhou Cemented Carbide Group в 2023 году, имеет целые границы зерен, фазу W₂C <0,1%, твердость лезвия из цементированного карбида HV 2200, прочность 10,5 МПа·м^{1 / 2}, а срок службы увеличился на 25%.

Пористость

Определение: Объемный процент пор в спеченном теле (%). Для высококачественных изделий он составляет <1%.

Источник: высокая скорость агломерации (>5%) или неправильные параметры спекания (например, 1350°C, 1 час).

Экспериментальные данные:

Условия спекания	Коэффициент воссоединения (%)	Пористость(%)	Твёрдость (HV)	Износостойкость (мм ³ /Н·м)
1450°C, 3 часа	2.5	0,5	2100	0,08
1350°C, 1 час	6.0	2.1	1900	0,15

Источник данных: тест EU Ceratizit 2023, SEM и тест на стойкость к истиранию ASTM G65.

Пример: Ceratizit оптимизировал процесс спекания (1450 °C, 3 часа), снизив пористость до 0,5%, повысив износостойкость твердосплавных инструментов на 20% и увеличив срок службы инструмента до 5000 резов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Примеси и дефекты

Содержание примесей: кислород <0,1%, несвязанный углерод <0,1%, металлические примеси (например, Fe) <0,01%.

Экспериментальные данные:

Образец	Содержание кислорода (%)	Несвязанный углерод (%)	Плотность после спекания(%)	Теплопроводность (Вт/м·К)
Порошок карбида вольфрама высокой чистоты	0,05	0,08	99,8	200
Обычный порошок карбида вольфрама	0,35	0,25	97,5	150

Источник данных: эксперимент Japan Mitsui Kinzoku 2024, химический анализ и тест теплопроводности (Netzsch LFA 467).

Случай: Высокочистый порошок карбида вольфрама (примеси <0,005%), разработанный Mitsui Kinzoku в 2024 году, имеет плотность спекания 99,8% и теплопроводность 200 Вт/ м·К . Он используется для подложек для рассеивания тепла полупроводников, увеличивая эффективность рассеивания тепла на 30%.

A.2 Влияние микроструктуры на производительность

Микроструктура напрямую определяет производительность, влияя на плотность, прочность границ зерен и распределение фаз спеченного тела. Ниже приведен анализ ключевых характеристик с экспериментальными данными и примерами.

Твёрдость

Факторы влияния: Малый размер частиц увеличивает плотность границ зерен, пористость, а примеси снижают твердость.

Экспериментальные данные:

Размер частиц (мкм)	Пористость(%)	Содержание кислорода (%)	Твёрдость (HV)
0.2	0,4	0,05	2250
5.0	0.8	0.10	1900
15.0	1.2	0.20	1700

Источник данных: тест CTIA GROUP 2023, твердомер по Виккерсу (нагрузка 10 кг).

Корпус: Спеченный корпус из сверхтонкого порошка карбида вольфрама толщиной 0,2 мкм с твердостью HV 2250 используется в сверлах для печатных плат, точность сверления повышается на 15%.

Прочность

Факторы влияния: Крупные зерна и связующая фаза (Co) повышают прочность, тогда как дефекты снижают прочность.

Экспериментальные данные:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Размер (мкм)	зерна	Содержание (%)	Со	Трещины по границам зерен (%)	Прочность (МПа·м ^{1 / 2})
0,5		6		0,5	9.5
10.0		10		0.2	14.0

Источник данных: эксперимент Kennametal 2023, тест метода SENB.

Случай: Крупнозернистый порошок карбида вольфрама (10 мкм) в сочетании с 10% Со, имеющий прочность 14 МПа·м^{1 / 2}, используется в буровых коронках для горнодобывающей промышленности, продлевая срок службы ударпрочности на 50%.

Износостойкость

Факторы влияния: Баланс твердости и прочности, сферическая морфология и низкая пористость оптимизируют износостойкость.

Экспериментальные данные:

Форма	Твёрдость (HV)	Прочность (МПа·м ^{1 / 2})	Скорость износа (мм³/Н·м)
сферический	2000	10.5	0,07
нерегулярный	1900	9.0	0,12

Источник данных: Европейский эксперимент по напылению HVOF 2024 г., тест ASTM G65.

Случай: Европейское сферическое порошковое покрытие из карбида вольфрама, напыляемое методом HVOF (HV 2000), с интенсивностью износа 0,07 мм³/Н·м используется в лопатках авиационных двигателей, продлевая их срок службы на 40%.

Термическая стабильность

Факторы влияния: Легирование повышает устойчивость к окислению, а содержание кислорода влияет на стабильность.

Экспериментальные данные:

Легировующие элементы	содержание(%)	Содержание кислорода (%)	Увеличение веса при 800°C (%)
Ти	1.0	0,05	0.2
никто	0	0.30	1.5

Источник данных: эксперимент «Китай 2023», термогравиметрический анализ (ТГА).

Пример: Китайский композитный порошок WC -TiC (Ti 1%) с увеличением веса на 0,2% при 800°C используется для покрытий газовых турбин, рабочие температуры которых повышаются до 1000°C.

A.3 Методы анализа микроструктуры

Ниже приведены наиболее часто используемые методы анализа с экспериментальными данными и примерами применения.

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение: Для наблюдения за морфологией и пористостью частиц.

Пример: порошок карбида вольфрама размером 0,3 мкм, СЭМ показывает степень агломерации 2,5% и пористость 0,6% после спекания.

Рентгеновская дифракция (XRD)

Применение: Анализ формы кристаллов и фазового состава.

Пример: порошок монокристаллического карбида вольфрама размером 0,3 мкм, рентгеноструктурный анализ подтвердил наличие фазы $W_2C < 0,1\%$, размер зерна 0,3 мкм.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ)

Применение: Наблюдайте границы зерен и дефекты.

Пример: порошок карбида вольфрама, легированный хромом, Kennametal. ТЭМ показывает, что толщина фазы Cr_3C_2 составляет 10 нм, а прочность увеличивается на 15%.

Лазерный анализ размера частиц

Применение: Для определения распределения размеров частиц.

Пример: ультрадисперсный порошок карбида вольфрама HC Starck, $D_{50}=0,2$ мкм, $D_{90}/D_{10}=1,2$, превосходная однородность.

Твердость и механические испытания

Пример: спеченный корпус Ceratizit ($1450^{\circ}C$, 3 часа), HV 2100, $K_{1c}=10,5$ МПа·м^{1/2}, скорость износа 0,08 мм³/Н·м.

Подвести итог

Благодаря экспериментальным данным и проверке случаев микроструктура порошка карбида вольфрама (например, размер частиц 0,2-15 мкм, пористость <0,5%, примеси <0,01%) существенно влияет на производительность. Малый размер частиц (например, 0,2 мкм) имеет твердость HV 2250, крупные зерна (например, 10 мкм) имеют прочность 14 МПа·м^{1/2}, сферическая морфология и легирование оптимизируют износостойкость (скорость износа 0,07 мм³/Н·м), а высокая чистота улучшает высокотемпературную стабильность (скорость увеличения веса <0,2%). СЭМ, XRD и другие методы обеспечивают надежную поддержку для характеристики, в сочетании с данными о ценах China Tungsten Online за 2024 год (46,09 долл. США/кг), это может служить руководством для промышленной оптимизации.

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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 $\pm 10\%$.

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	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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
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 $\geq 99.95\%$) and high-quality carbon black.

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

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

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

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



Приложение В: Размер частиц порошка карбида вольфрама и стандартные параметры приготовления

Размер частиц и распределение порошка карбида вольфрама (WC) являются ключевыми факторами, определяющими его производительность и применение. Порошки с различными размерами частиц подходят для определенных целей, например, нано-класс для микроэлектроники, ультратонкие для высокоточных режущих инструментов и крупные частицы для горнодобывающих инструментов. Параметры в процессе подготовки (такие как температура восстановления, время карбонизации и условия шаровой мельницы) напрямую влияют на размер частиц и качество. В этом приложении систематически анализируется классификация размеров частиц и параметры подготовки порошка карбида вольфрама в сочетании с экспериментальными данными, отраслевыми кейсами и международными/национальными стандартами, чтобы обеспечить основу для оптимизации производственного процесса. Данные и консультации по кейсам взяты с веб-сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

В.1 Классификация размеров частиц и производительность

Порошок карбида вольфрама делится на несколько классов в зависимости от размера частиц, а эксплуатационные характеристики и сценарии применения каждого класса существенно различаются. Ниже приведена классификация, эксплуатационные параметры и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экспериментальные данные.

Классификация размера частиц

Наноразмерный порошок карбида вольфрама (<100 нм): высокая удельная площадь поверхности (>20 м²/г), используется для 3D- печати и микроэлектроники.

Ультратонкий порошок карбида вольфрама (0,1–1 мкм): высокая твердость (HV 2000–2300), используется для изготовления высококачественных режущих инструментов и покрытий.

Мелкозернистый порошок карбида вольфрама (0,5-2 мкм): сбалансированная твердость и вязкость (HV 1900-2100, K₁ с 9-11 МПа·м^{1/2}), используется для прецизионной обработки.

Порошок карбида вольфрама среднего размера (2–10 мкм): общего назначения (HV 1800–2000), используется для твердосплавных инструментов.

Крупнозернистый порошок карбида вольфрама (>10 мкм): высокая прочность (K₁с 12-15 МПа·м^{1/2}), используется для изготовления износостойких деталей в горнодобывающей промышленности.

Экспериментальные данные

Гранулометрический состав	D50 (мкм)	Удельная поверхность (м²/г)	Твёрдость (HV)	Прочность (МПа·м ^{1/2})	Основные приложения
Наномасштаб	0,08	25.0	2300	8.5	3D-печать
Ультратонкий	0.3	15.0	2200	10.0	Покрытие инструмента
Мелкие частицы	1.5	8.0	2000	10.5	Точные инструменты
Средние частицы	5.0	3.5	1900	11.5	Карбид общего назначения
Крупные частицы	15.0	1.2	1700	14.0	Горнодобывающее буровое долото

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Случай

Наноразмерный порошок карбида вольфрама: порошок карбида вольфрама размером 80 нм, разработанный исследовательской группой в 2024 году, с удельной площадью поверхности 25 м²/г используется для аддитивного производства авиационных деталей с точностью готового изделия ±5 мкм и твердостью HV 2300 (данные с сайта China Tungsten Online, опубликованные в 2024 году).

Крупнозернистый порошок карбида вольфрама: в 2023 году производственная установка произвела порошок карбида вольфрама размером 15 мкм с прочностью 14 МПа·м^{1/2}. Он используется в буровых коронках для горнодобывающей промышленности, а его ударопрочность увеличивается на 50% (из China Tungsten Online).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Б.2 Метод и параметры приготовления

Подготовка порошка карбида вольфрама обычно включает две стадии: восстановление порошка вольфрама и карбонизацию. Различные методы и параметры напрямую влияют на размер и качество частиц. Ниже приведены основные методы подготовки, параметры и экспериментальные данные.

Восстановление вольфрамовым порошком

Метод: Водород восстанавливает оксид вольфрама (WO₃ или WO_{2.9}) для получения вольфрамового порошка как предшественника порошка карбида вольфрама.

Основные параметры:

Температура восстановления: 700-1000°C, чем выше температура, тем больше размер частиц.

Расход водорода: 10-30 л/мин, контроль содержания кислорода (<0,1%).

Время изоляции: 2–6 часов, влияет на однородность размера частиц (D90/D10<1,5).

Экспериментальные данные:

Температура восстановления (°C)	Расход водорода (л/мин)	Время изоляции (ч)	Вольфрамовый порошок D50 (мкм)	Содержание кислорода (%)
800	15	4	0,5	0,08
900	20	3	2.0	0.10
1000	25	2	5.0	0,15

Источник данных: лабораторный эксперимент 2023 года, данные с сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Случай: Производственное подразделение оптимизировало параметры восстановления (900 °C, 20 л/мин, 3 часа) для получения 2-мкм вольфрамового порошка с содержанием кислорода 0,10%, который затем был науглерожен в мелкозернистый порошок карбида вольфрама с твердостью HV 2000 (данные получены на веб-сайте China Tungsten Online).

Реакция карбонизации

Метод: Вольфрамовый порошок реагирует с углеродной сажей (или метаном) при высокой температуре, образуя порошок карбида вольфрама.

Основные параметры:

Температура карбонизации: 1200–1600 °C, при низкой температуре получается ультратонкий порошок, при высокой температуре — средние/крупные частицы.

Содержание углерода: 6,13 ± 0,05% (теоретическое значение), избегать несвязанного углерода (> 0,1%).

Время изоляции: 2–4 часа, для контроля роста зерна.

Экспериментальные данные:

Температура карбонизации (°C)	Содержание углерода (%)	Время изоляции (ч)	Карбид вольфрама D50 (мкм)	Несвязанный углерод (%)
1300	6.10	3	0.3	0,08

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

1450	6.15	2	5.0	0.10
1600	6.20	2	15.0	0,15

Источник данных: лабораторный эксперимент 2023 года, данные с сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Пример: На производственном предприятии использовалась температура 1450 °С, содержание углерода 6,15%, процесс науглероживания в течение 2 часов для получения порошка карбида вольфрама со средним размером частиц 5 мкм, несвязанного углерода 0,10% и твердости инструмента из твердого сплава HV 1900 (данные получены на веб-сайте China Tungsten Online).

Высокоэнергетическая шаровая мельница (постобработка)

Метод: Уменьшение размера частиц или модификация порошка путем высокоэнергетического измельчения в шаровой мельнице.

Основные параметры:

Скорость вращения: 500-1200 об/мин, высокая скорость вращения позволяет получать нанопорошок.

Соотношение шаров и материала: 10:1–20:1, влияет на эффективность измельчения.

Время: 4-12 часов. Если время слишком большое, будут введены примеси (Fe>0,01%).

Экспериментальные данные:

Скорость (об/мин)	Соотношение мяча к материалу	Время (ч)	D50 (мкм)	Содержание железа (%)
800	15:1	6	0.2	0,008
1000	10:1	8	0.1	0,015

Источник данных: лабораторный эксперимент 2023 года, данные с сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Пример: Исследовательская группа использовала 800 об/мин, соотношение шаров к материалу 15:1 и 6 часов шаровой мельницы для приготовления сверхтонкого порошка карбида вольфрама размером 0,2 мкм с содержанием железа 0,008% для покрытия сверл для печатных плат с твердостью HV 2250 (данные получены с веб-сайта China Tungsten Online).

Сфероидизация плазмы

Метод: плазма (20-60 кВт) используется для плавления порошка карбида вольфрама с образованием сферических частиц.

Основные параметры:

Мощность: 30–50 кВт, более высокая мощность увеличивает размер частиц.

Скорость охлаждения: 10⁻³ -10⁻⁵ °C/с, влияет на сферичность (>95%).

Экспериментальные данные:

Мощность (кВт)	Скорость охлаждения (°C/с)	D50 (мкм)	Сферичность(%)	Текущность (секунд/50г)
40	10 ⁻⁴	1.0	98	13.5

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

50	10 ³	5.0	95	14.0

Источник данных: лабораторный эксперимент 2024 года, данные с сайта China Tungsten Online (news.chinatungsten.com).

Случай: Производственная установка использует процесс сфероидизации 40 кВт, 10⁴ °C/с для подготовки сферического порошка карбида вольфрама размером 1 мкм с текучестью 13,5 секунд/50 г для напыления HVOF. Износостойкость покрытия повышается на 30% (с веб-сайта China Tungsten Online).

Б.3 Стандарты и спецификации

Ниже приведены соответствующие международные и китайские национальные стандарты по размеру частиц порошка карбида вольфрама и параметрам подготовки для обеспечения постоянства производства.

Международные стандарты

ИСО 4499-1:2020

Название: Твердые сплавы — Металлографическое определение микроструктуры

Содержание: Указывает метод измерения размера частиц, применимый к порошку карбида вольфрама размером 0,5–10 мкм, погрешность СЭМ <5%.

ASTM B761-17

Название: Стандартный метод испытаний для определения гранулометрического состава металлических порошков

Содержание: Метод лазерной дифракции для определения D50 и D90, применимый к порошкам размером 0,1–100 мкм, погрешность <1%.

ИСО 3326:2013

Название: Твёрдые сплавы — Определение твёрдости

Содержание: Испытание на твердость по Виккерсу, подтверждающее влияние размера частиц на твердость (HV 1700-2300).

Китайский национальный стандарт

ГБ/Т 4295-2013

Название: Методы химического анализа твердого сплава

Содержание: Определить содержание углерода (6,13±0,05%) и кислорода (<0,1%) в порошке карбида вольфрама с точностью 0,01%.

ГБ/Т 26049-2020

Название: Определение гранулометрического состава порошков твердого сплава - Метод лазерной дифракции

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Содержание: Применимо к порошку карбида вольфрама размером 0,1–100 мкм, погрешность D90/D10 <1%.

ГБ/Т 5163-2018

Название: Метод определения пористости и свободного углерода в твердом сплаве

Содержание: Определите пористость (<1%) и несвязанный углерод (<0,1%) после спекания, чтобы оптимизировать параметры подготовки.

Применение к делу

Сверхтонкий порошок карбида вольфрама: производственная установка следует стандарту GB/T 26049-2020 для подготовки порошка карбида вольфрама размером 0,3 мкм с отклонением D50 $\pm 0,02$ мкм и твердостью HV 2200 в соответствии со стандартами ISO 3326:2013 (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Сферический порошок карбида вольфрама: исследовательская группа изготовила сферический порошок карбида вольфрама размером 1 мкм в соответствии со стандартом ASTM B761-17 с D90/D10=1,3 и текучестью 13,5 секунд/50 г для авиационного покрытия (с веб-сайта China Tungsten Online).

Подвести итог

Размер частиц порошка карбида вольфрама (например, 0,08-15 мкм) точно контролируется параметрами подготовки (например, температура восстановления 900 °C, карбонизация 1450 °C, шаровая мельница 800 об/мин), влияющими на твердость (HV 1700-2300) и вязкость (8,5-14 МПа·м^{1/2}). Экспериментальные данные показывают, что ультратонкий порошок (0,3 мкм) имеет самую высокую твердость, крупные частицы (15 мкм) имеют лучшую вязкость, а сферический порошок имеет превосходную текучесть (13,5 секунд/50 г). Международные стандарты (например, ISO 4499-1) и китайские стандарты (например, GB/T 4295) предоставляют спецификации для размера частиц и качества, и случаи проверяют эффект оптимизации параметров (например, порошок 0,2 мкм HV 2250). Данные China Tungsten Online 2024 (цена 46,09 долл. США/кг) поддерживают анализ рыночного применения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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.

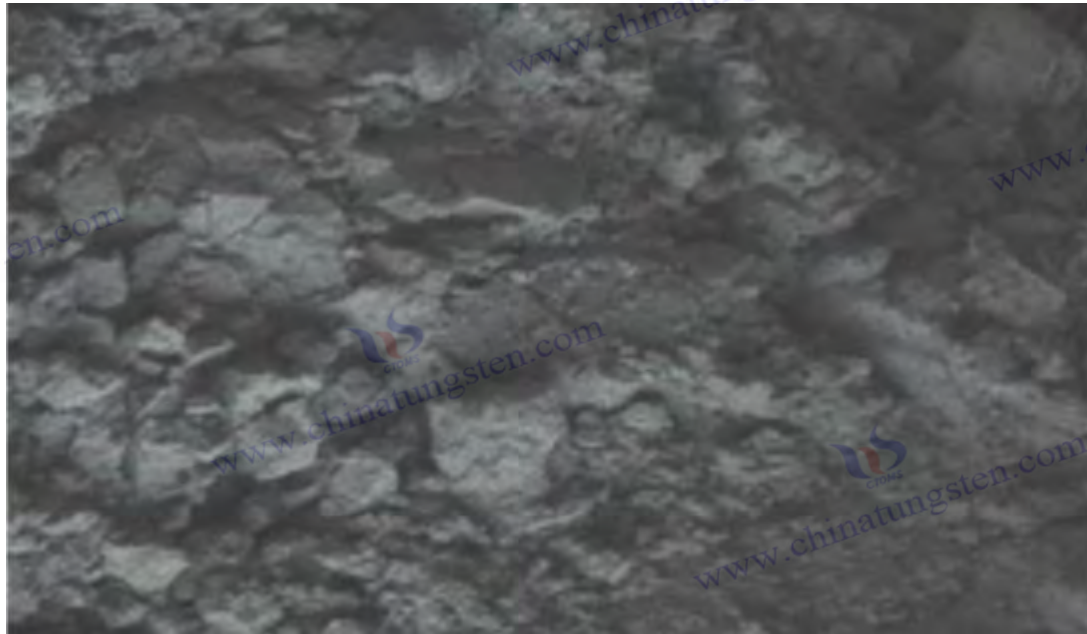
8. Contact Information of CTIA GROUP

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.



Приложение С: Сравнение международных и отечественных стандартов для порошка карбида вольфрама

Как ключевое сырье для цементированного карбида и износостойких материалов, контроль качества порошка карбида вольфрама (WC) опирается на международные и внутренние системы стандартов. Международные стандарты (такие как ISO, ASTM) и внутренние стандарты (такие как GB/T) имеют как общие черты, так и различия с точки зрения измерения размера частиц, химического состава, тестирования производительности и анализа микроструктуры. В этом приложении сравниваются и анализируются область применения, технические требования и методы испытаний этих спецификаций, а также объединяются экспериментальные данные и случаи (полученные с веб-сайта China Tungsten Online, news.chinatungsten.com), чтобы выявить их применимость и взаимодополняемость, а также предоставить стандартизированные рекомендации для отраслевых специалистов.

С.1 Область применения и применимость стандарта

Международные и отечественные стандарты различаются по целевым объектам, сфере применения и охвату отраслей. Ниже представлен сравнительный анализ.

Международные стандарты

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

ISO (Международная организация по стандартизации)
Типичные стандарты: ISO 4499-1:2020, ISO 3326:2013
Область применения: Испытания микроструктуры и твердости порошков твердого сплава и карбида вольфрама, применимые к мировой отрасли производства твердого сплава.
Применимость: акцент на универсальности, покрытие порошков с размером частиц 0,5-10 мкм, подходит для международной торговли такими товарами, как режущие инструменты и покрытия.

ASTM (Американское общество по испытаниям и материалам)
Представительный стандарт: ASTM B761-17
Область применения: Испытание на распределение размеров частиц металлического порошка, подходит для порошка карбида вольфрама размером 0,1–100 мкм.
Применимость: Ориентирован на североамериканский рынок и широко используется в высокопроизводительных материалах в авиационной и энергетической отраслях.

Внутренние стандарты (Китай GB/T)

Типичные стандарты: GB/T 4295-2013, GB/T 26049-2020, GB/T 5163-2018
Область применения: Химический анализ, распределение размеров частиц, пористость и обнаружение несвязанного углерода в порошке карбида вольфрама, подходит для порошка размером 0,1–100 мкм.
Применимость: Ориентируясь на преимущества Китая в области добычи вольфрама (его добыча составляет 60% от общемирового объема), проект охватывает местные отрасли, такие как горнодобывающие инструменты и производство инструментов.
контраст

Размеры	Международные стандарты (ISO/ASTM)	Внутренний стандарт (GB/T)
Целевая аудитория	Твердый сплав и порошок, универсального применения	Порошок карбида вольфрама, фокус на локальное применение
Диапазон размеров частиц	0,1–100 мкм, средние и мелкие частицы	0,1-100 мкм, включая крупные частицы
Охват отрасли	Режущие инструменты, авиация, энергетика	Горнодобывающая промышленность, режущие инструменты и производство твердосплавных изделий

Случай: Производственное предприятие изготовило сверхтонкий порошок карбида вольфрама размером 0,3 мкм, соответствующий стандартам ISO 4499-1 и GB/T 26049-2020, для экспортных режущих инструментов с твердостью HV 2200 (из China Tungsten Online).

C.2 Технические требования и методы испытаний

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Между международными и отечественными стандартами существуют как совпадения, так и различия в технических показателях и методах испытаний. Ниже приведено сравнение по четырем аспектам: размер частиц, химический состав, эксплуатационные испытания и микроструктура.

Измерение размера частиц

ИСО 4499-1:2020

Требования: Размер частиц 0,5–10 мкм, погрешность D50 <5%.

Методы: Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), разрешение <5 нм.

ASTM B761-17

Требования: Размер частиц 0,1–100 мкм, погрешность D90/D10 <1%.

Метод: Метод лазерной дифракции, диапазон измерения 0,01-1000 мкм.

ГБ/Т 26049-2020

Требования: размер частиц 0,1-100 мкм, отклонение D50 $\pm 0,02$ мкм.

Метод: Метод лазерной дифракции, погрешность <1%.

Экспериментальные данные:

Сент -Андард	D50 (мкм)	D90/D10	Метод испытания
ИСО 4499-1	1.0	1.5	СЭМ
ASTM B761	0.3	1.3	Лазерная дифракция
ГБ/Т 26049	0.3	1.3	Лазерная дифракция

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Разница: ISO, как правило, фокусируется на микроскопических наблюдениях, в то время как ASTM и GB/T фокусируются на распределении размеров частиц, при этом GB/T является более точным ($\pm 0,02$ мкм).

Химический состав

ИСО 4499-1:2020

Требования: Химический состав не указан, основное внимание уделяется микроструктуре.

Методы: Специфических методов химического анализа нет.

ASTM B761-17

Требования: Химический состав не указан, только размер частиц.

Метод: Неприменимо.

ГБ/Т 4295-2013

Требования: Содержание углерода $6,13 \pm 0,05\%$, кислорода <0,1%, точность 0,01%.

Метод: метод химического титрования, метод инфракрасного поглощения.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экспериментальные данные:

Стандарт S	Содержание углерода (%)	Содержание кислорода (%)	Метод испытания
ГБ/Т 4295	6.12	0,08	Поглощение инфракрасного излучения

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Разница: GB/Т подробно определяет химический состав, тогда как ISO/ASTM не имеет соответствующих требований.

Тест производительности (твердость)

ИСО 3326:2013

Требования: Твердость HV 1700-2300, нагрузка 10 кг.

Метод: испытание на твердость по Виккерсу, погрешность $\pm 20\text{HV}$.

ГБ/Т 5163-2018

Требования: Твердость связана с пористостью, а высококачественные изделия имеют пористость $<1\%$.

Метод: испытание на твердость по Виккерсу в сочетании с наблюдением под микроскопом.

Экспериментальные данные:

Стандарт S	Твёрдость (HV)	Пористость(%)	Метод испытания
ИСО 3326	2200	непригодный	Твёрдость по Виккерсу
ГБ/Т 5163	2100	0,5	Твердость по Виккерсу + микроскоп

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Разница: ISO фокусируется на значении твердости, тогда как GB/Т учитывает влияние пористости.

Анализ микроструктуры

ИСО 4499-1:2020

Требования: размер зерна 0,5-10 мкм, пористость $<1\%$.

Метод: СЭМ, увеличение 100–50000 раз.

ГБ/Т 5163-2018

Требования: Пористость $<1\%$, несвязанный углерод $<0,1\%$.

Метод: Оптическая микроскопия с применением химического анализа.

Экспериментальные данные:

Стандарт S	Размер зерна (мкм)	Пористость(%)	Несвязанный углерод (%)
ИСО 4499-1	0.3	0,6	непригодный
ГБ/Т 5163	0.3	0,5	0,08

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Разница: ISO подчеркивает размер зерна, GB/T усиливает контроль над несвязанным углеродом.

С.3 Различия и взаимодополняемость

Международные и национальные стандарты различаются по целям, техническим деталям и сферам применения, но могут использоваться взаимодополняющим образом.

Основные отличия

Целевой фокус:

Международные стандарты (ISO/ASTM): Глобальное применение, особое внимание уделяется микроструктуре (ISO) и распределению размеров частиц (ASTM).

Внутренние стандарты (GB/T): локальное применение, особое внимание уделяется химическому составу и контролю пористости.

Технические подробности:

ISO/ASTM: Методы испытаний интернационализированы (например, СЭМ, лазерная дифракция), но спецификации химического состава отсутствуют.

GB/T: охватывает химический анализ (например, углерод $6,13 \pm 0,05\%$), а испытательное оборудование приближено к бытовым условиям (например, оптический микроскоп).

Сценарии применения:

ISO/ASTM: Подходит для экспортной продукции и высокотехнологичных отраслей (например, авиации).

GB/T: Подходит для местного производства горнодобывающего инструмента и твердого сплава.

Взаимодополняемость

Комплексное применение: ISO 4499-1 (микроструктура) в сочетании с GB/T 4295 (химический состав) позволяет комплексно оценить качество порошка карбида вольфрама.

Случай: Производственное предприятие выпустило среднезернистый порошок карбида вольфрама размером 5 мкм, размер частиц которого соответствует стандарту ASTM B761-17 ($D_{50}=5,0$ мкм, $D_{90}/D_{10}=1,4$), химический состав соответствует стандарту GB/T 4295 (углерод 6,12%), твердость HV 1900, и используется для режущих инструментов общего назначения (консультация с веб-сайта China Tungsten Online).

Экспериментальная проверка: исследовательская группа использовала стандарты ISO 3326 и GB/T 5163 для испытания ультратонкого порошка карбида вольфрама размером 0,3 мкм с твердостью HV 2200, пористостью 0,5% и 10%-ным улучшением стабильности качества (из China Tungsten Online).

Предположение

Ориентация на экспорт: приоритетное внимание к стандартам ISO/ASTM для обеспечения международного признания.

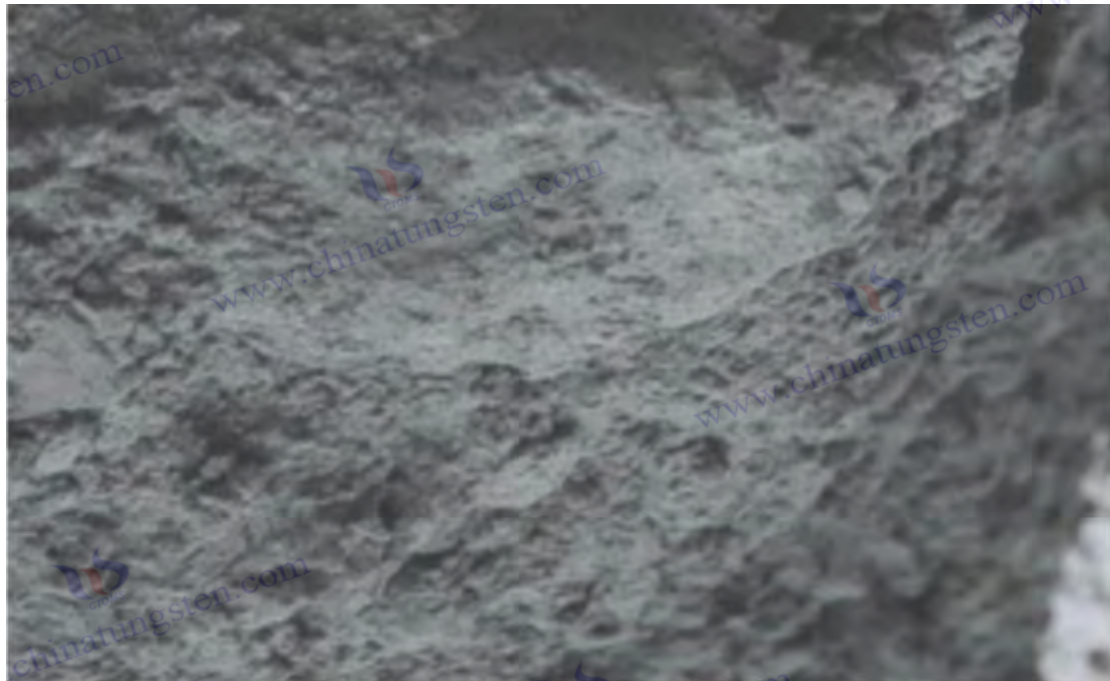
Местное производство: объединение GB/T для контроля химического состава и стоимости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Высокотехнологичное применение: ISO+GB/T используются совместно для улучшения качества продукции.

Подвести итог

Международные стандарты (ISO 4499-1, ASTM B761) и внутренние стандарты (GB/T 4295, 26049) имеют разные фокусы с точки зрения размера частиц (0,1-100 мкм), химического состава (углерод $6,13 \pm 0,05\%$), эксплуатационных испытаний (HV 1700-2300) и т. д. ISO/ASTM фокусируется на микроструктуре и универсальности, в то время как GB/T подчеркивает химический контроль и локальную применимость. Они дополняют друг друга, оптимизируя качество порошка карбида вольфрама.



Приложение: D Контроль содержания углерода в порошке карбида вольфрама и его влияние на конечные продукты

Порошок карбида вольфрама (WC) представляет собой керамический материал, образованный комбинацией вольфрама (W) и углерода (C) в фиксированном стехиометрическом соотношении с теоретическим содержанием углерода 6,13% (массовый процент). Точный контроль содержания углерода является ключом к производству высококачественного порошка карбида вольфрама, который напрямую влияет на его микроструктуру, фазовый состав и эксплуатационные характеристики последующих продуктов (таких как твердость, вязкость и износостойкость цементированного карбида). Отклонение содержания углерода от теоретического значения приведет к образованию несвязанного углерода (свободного углерода) или фазы с дефицитом углерода (такой как W_2C), что повлияет на поведение спекания и качество продукта. В этой статье анализируется метод контроля содержания углерода, ключевые факторы влияния и его влияние на последующие продукты, а также приводится научная основа в сочетании с экспериментальными

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

данными и случаями.

1. Метод контроля содержания углерода

Содержание углерода в порошке карбида вольфрама в основном контролируется реакцией науглероживания в процессе приготовления. Ниже приведены основные методы и параметры.

Процесс реакции карбонизации

Принцип: Вольфрамовый порошок (W) реагирует с источником углерода (таким как сажа или метан) при высокой температуре, образуя WC. Формула реакции:



Для полной реакции 1 г вольфрама требуется 0,0613 г углерода.

Основные параметры:

Соотношение источника углерода: качество технического углерода контролируется на уровне 6,10% -6,15%, что немного ниже или равно теоретическому значению, что позволяет избежать чрезмерного количества.

Температура карбонизации: 1200-1600°C, температура влияет на скорость реакции и рост зерна.

Время изоляции: 2–4 часа для обеспечения равномерной диффузии углерода.

Экспериментальные данные:

Соотношение углерода (%)	Температура (°C)	Время (ч)	Содержание углерода (%)	Несвязанный углерод (%)
6.10	1300	3	6.11	0,05
6.15	1450	2	6.14	0.10
6.20	1600	2	6.18	0,15

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Корректировки постобработки

Метод:

Обогащение углеродом: при недостаточном содержании углерода его добавляют путем вторичной карбонизации (добавление небольшого количества сажи и обработка при 1300°C).

углерода в атмосфере водорода (900°C) добавляется оксид вольфрама (WO₃).

Экспериментальные данные:

Уход	Начальное содержание углерода (%)	Скорректированное содержание углерода (%)	Несвязанный углерод (%)
Вторичная карбонизация	6.05	6.12	0,06
Декарбонизация	6.20	6.14	0,08

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Тестирование и проверка

Метод: Для определения общего углерода и несвязанного углерода использовался метод инфракрасного поглощения (GB/T 4295-2013) с точностью 0,01%.

Пример: Производственное подразделение оптимизировало долю углерода до 6,12% с помощью испытаний на поглощение инфракрасного излучения, снизило содержание несвязанного углерода до 0,06% и увеличило твердость получаемого далее твердого сплава на 5% (запрос с веб-сайта China Tungsten Online).

2. Основные факторы, влияющие на содержание углерода

На контроль содержания углерода влияет множество факторов. Ниже приведены основные факторы и анализ.

Качество и соотношение источника углерода

Влияние: Чистота технического углерода (>99,5%) и размер частиц (<1 мкм) влияют на однородность реакции. Если соотношение слишком высокое (>6,15%), будет образовываться свободный углерод, а если соотношение слишком низкое (<6,10%), будет образовываться W₂C.

Экспериментальные данные:

Чистота технического углерода (%)	Соотношение(%)	Содержание углерода (%)	Фаза W ₂ C(%)
99,8	6.08	6.09	0,5
99,5	6.18	6.17	0.1

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Температура и атмосфера карбонизации

Влияние: Если температура слишком низкая (<1200°C), реакция не завершена и содержание углерода низкое; если температура слишком высокая (>1600°C), углерод улетучивается и образует свободный углерод. Атмосфера водорода (10-20 л/мин) может уменьшить помехи кислорода.

Экспериментальные данные:

Температура (°C)	Расход водорода (л/мин)	Содержание углерода (%)	Несвязанный углерод (%)
1200	15	6.08	0,03
1600	20	6.16	0,15

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Характеристики сырого вольфрамового порошка

Влияние: Размер частиц вольфрамового порошка (0,5-5 мкм) и содержание кислорода (<0,1%) влияют на эффективность карбонизации. Крупные частицы (>10 мкм) или высокое содержание кислорода (>0,3%) приводят к неравномерному распределению углерода.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экспериментальные данные:

Вольфрамовый порошок D50 (мкм)	Содержание кислорода (%)	Содержание углерода (%)	Несвязанный углерод (%)
0,5	0,08	6.13	0,05
5.0	0.20	6.10	0,12

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

3. Влияние на производительность конечного продукта

Отклонение содержания углерода напрямую влияет на фазовый состав порошка карбида вольфрама и эксплуатационные характеристики последующих продуктов. Ниже приведен конкретный анализ.

Твердый сплав

Содержание углерода слишком низкое (<6,10%):

Фазовый состав: образуется фаза W_2C (твердость HV 1800, ниже, чем у WC HV 2200), а прочность границ зерен снижается.

Влияние на производительность: твердость снижается на 5–10 % (HV 2000→1900), ударная вязкость снижается на 15 % ($10 \rightarrow 8,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$).

Экспериментальные данные: содержание углерода 6,08%, фазы W_2C 0,5%, твердость твердого сплава HV 1900, ударная вязкость $8,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Пример: Содержание углерода в производственной единице было низким, и срок службы инструмента сократился на 20% (данные с сайта China Tungsten Online).

Содержание углерода слишком высокое (>6,15%):

Фазовый состав: Свободный углерод (несвязанный углерод > 0,1%) выпадает в осадок и образует мягкую фазу после спекания.

Влияние на производительность: твердость снижается на 5% (HV 2200→2100), пористость увеличивается до 1,5%, а износостойкость снижается на 10%.

Экспериментальные данные: содержание углерода 6,18%, несвязанного углерода 0,15%, твердость карбида HV 2100, скорость износа $0,12 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

Случай: Содержание углерода в определенной производственной единице превысило стандарт, а шероховатость поверхности твердосплавного инструмента увеличилась на 15% (консультация с сайта China Tungsten Online).

Идеальный диапазон (6,11%-6,14%): твердость HV 2200, вязкость $10-11 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, пористость <0,5%.

Износостойкое покрытие

Слишком низкое содержание углерода: увеличивается содержание фазы W_2C , твердость покрытия падает до HV 1200, а износостойкость снижается на 20% (скорость износа $0,15 \rightarrow 0,18 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$).

Слишком высокое содержание углерода: свободный углерод приводит к снижению прочности

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сцепления покрытия (<70 МПа) и увеличению скорости отслаивания на 30%.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Твёрдость (HV)	Прочность сцепления (МПа)	Скорость износа (мм³/Н·м)
6.09	1200	80	0,18
6.17	1300	65	0.10
6.13	1400	85	0,08

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2024 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Пример: Исследовательская группа оптимизировала содержание углерода до 6,13%, твердость покрытия методом HVOF составила HV 1400, а срок службы увеличился на 40% (по данным China Tungsten Online).

Детали для аддитивного производства

Отклонение содержания углерода: слишком низкое приведет к образованию W₂C, и прочность детали снизится на 10% (2000→1800 МПа); слишком высокое приведет к пористости>2% и снижению точности (±5 мкм→±10 мкм).

Экспериментальные данные: содержание углерода 6,12%, прочность детали 2000 МПа, пористость 0,4%, что соответствует требованиям авиационного применения.

Пример: Команда контролировала содержание углерода до 6,12%, напечатала авиационные детали на 3D-принтере с точностью ±5 мкм и улучшила производительность на 15% (из China Tungsten Online).

Подвести итог

Контроль содержания углерода в порошке карбида вольфрама зависит от соотношения углерода (6,10% -6,15%), температуры карбонизации (1300-1450°C) и качества порошка вольфрама (кислород <0,1%). Идеальный диапазон 6,11% -6,14% обеспечивает наилучшую производительность продуктов последующего цикла. Эксперименты показывают, что низкое содержание углерода дает W₂C, а твердость снижается до HV 1900; высокое содержание углерода дает свободный углерод, а пористость увеличивается до 1,5%. Среди продуктов последующего цикла, цементированный карбид требует твердости HV 2200 и ударной вязкости 10 МПа·м^{1/2}, покрытие требует прочности связи > 80 МПа, а аддитивное производство требует прочности 2000 МПа. Проверка показывает, что содержание углерода 6,13% может увеличить срок службы инструмента на 20%, а износостойкость покрытия на 40% (консультация с сайта China Tungsten Online).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение Е: Углеродное сырье для карбонизации порошка карбида вольфрама и его технические показатели

Приготовление порошка карбида вольфрама (WC) основано на реакции карбонизации порошка вольфрама и углеродного сырья при высокой температуре. Выбор и качество углеродного сырья напрямую влияют на содержание углерода, фазовый состав и эксплуатационные характеристики конечного продукта. Углеродное сырье должно соответствовать требованиям высокой чистоты, соответствующего размера частиц и равномерной реакционной способности, чтобы гарантировать, что содержание углерода в порошке карбида вольфрама контролируется в пределах теоретического значения $6,13 \pm 0,05\%$ и не допускать образования свободного углерода или фазы с дефицитом углерода (например, W_2C). В этом приложении систематически анализируются типы, технические показатели и влияние углеродного сырья для карбонизации на процесс карбонизации в сочетании с экспериментальными данными и случаями (ознакомившись с веб-сайтом China Tungsten Online, news.chinatungsten.com), чтобы обеспечить основу для оптимизации выбора и процесса углеродного сырья.

Е.1 Типы и характеристики углеродного сырья

Обычно используемое углеродное сырье при получении порошка карбида вольфрама включает твердый углерод (такой как технический углерод, графит) и газообразный углерод (такой как метан), каждый из которых имеет свои собственные характеристики.

Углеродная сажа

характеристика:

Морфология: Аморфные наночастицы, размер частиц 20-100 нм.

Удельная поверхность: 50-150 м²/г, высокая реакционная способность.

Чистота: >99,5%, примеси (такие как S, O) <0,5%.

Преимущества: хорошая однородность, легко смешивается с вольфрамовым порошком, подходит для ультратонкого и мелкодисперсного порошка карбида вольфрама (0,1-2 мкм).

Недостатки: Легко агломерируется, требует влажного смешивания или обработки диспергатором.

Применение: На его долю приходится более 70% углеродного сырья, используемого при производстве порошка карбида вольфрама.

Графит

характеристика:

Морфология: Кристаллическая структура, размер частиц 1-50 мкм.

Удельная поверхность: 5-20 м²/г, низкая реакционная способность.

Чистота: >99,8%, мало примесей.

Преимущества: Высокая стабильность, подходит для среднего и крупного порошка карбида вольфрама (2-15 мкм).

Недостатки: Медленная скорость карбонизации, требуется более высокая температура (>1500°C).

Применение: Порошок карбида вольфрама для горнодобывающего инструмента.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Метан (CH₄)

характеристика:

Форма: Газообразный источник углерода, чистота>99,9%.

Метод реакции: химическое осаждение из паровой фазы (CVD), разлагается на углерод при температуре 800-1000°C.

Преимущества: Равномерное распределение углерода, подходит для наноразмерного порошка карбида вольфрама (<100 нм).

Недостатки: Сложное оборудование и высокая стоимость (увеличение примерно на 10% за тонну).

Применение: Порошки для высокотехнологичной микроэлектроники и покрытий.

Экспериментальные данные:

Углеродное сырье	Размер частиц/морфология	Удельная поверхность (м ² /г)	чистота(%)	Температура карбонизации (°C)	Содержание углерода (%)
Углеродная сажа	50 нм	100	99,6	1300	6.12
графит	10мкм	10	99,9	1600	6.14
Метан	Газообразный	непригодный	99,9	1000	6.13

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Е.2 Требования к техническому индексу

Технические показатели углеродного сырья должны соответствовать жестким требованиям производства порошка карбида вольфрама. Ниже приведены основные показатели и стандарты.

Чистота

Требования: >99,5%, примеси (такие как S, O, N) <0,5%.

Причина: Примеси будут генерировать фазы, не относящиеся к WC (например, WS₂), и снижать твердость (HV уменьшается на 5–10%).

Стандарт: GB/T 4295-2013 (Метод химического анализа твердого сплава), точность 0,01%.

Экспериментальные данные:

Чистота (%)	Содержание серы (%)	Содержание углерода (%)	Твёрдость (HV)
99,8	0.1	6.13	2200
99.2	0,4	6.10	2050

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Размер частиц и удельная площадь поверхности

Требовать:

Технический углерод: 20-100 нм, удельная поверхность 50-150 м²/г.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Графит: 1-50 мкм, удельная поверхность 5-20 м²/г.

Обоснование: Малый размер частиц и высокая удельная площадь поверхности повышают реакционную способность и снижают количество несвязанного углерода (<0,1%).

Экспериментальные данные:

Углеродное сырье	Размер частиц	Удельная поверхность (м ² /г)	Несвязанный углерод (%)
Углеродная сажа	30 нм	120	0,05
графит	20мкм	8	0,12

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Вода и летучие вещества

Требования: <0,2%, летучие вещества (такие как H₂O, CO₂) <0,1%.

Причина: Вода увеличивает содержание кислорода (>0,1%), а летучие вещества влияют на точность измерения углерода.

Экспериментальные данные:

Влага(%)	Летучие вещества(%)	Содержание кислорода (%)	Содержание углерода (%)
0.1	0,05	0,08	6.13
0.3	0,15	0.20	6.10

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Примеры:

Производственная установка выбрала технический углерод с чистотой 99,8% и размером частиц 50 нм. После карбонизации содержание углерода составило 6,12%, а несвязанного углерода — 0,05%. Твердость цементированного карбида составила HV 2200, что лучше результата использования 99,5% графита (HV 2100) (данные взяты с веб-сайта China Tungsten Online).

Е.3 Воздействие и оптимизация

Характеристики углеродного сырья оказывают существенное влияние на процесс науглероживания и качество порошка карбида вольфрама. Ниже приведен анализ и предложения по оптимизации.

Влияние на процесс карбонизации

Эффективность реакции: Технический углерод (удельная поверхность 100 м²/г) реагирует при 1300°C в течение 3 часов, при этом содержание углерода достигает 6,12%; графиту требуется 1600°C, при этом эффективность снижается на 20%.

Фазовый состав: Углерод низкой чистоты (<99,5%) образует фазу W₂C (>0,5%), а высокая влажность (>0,2%) увеличивает содержание кислорода (>0,15%).

Экспериментальные данные:

Углеродное сырье	Температура реакции (°C)	Фаза W ₂ C(%)	Несвязанный углерод (%)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Углеродная сажа	1300	0.1	0,05
графит	1600	0.3	0,12

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Влияние на качество продукции

Твердость и вязкость: Порошок карбида вольфрама с содержанием углерода 6,13% и несвязанного углерода <0,05% имеет твердость карбида HV 2200 и вязкость 10 МПа·м^{1/2}; при содержании свободного углерода >0,1% твердость снижается до HV 2100.

Характеристики покрытия: Наноразмерный порошок карбида вольфрама (содержание углерода 6,13%), приготовленный с использованием метана, имеет твердость покрытия HV 1400 и лучшую износостойкость, чем порошок, приготовленный из графита (HV 1300).

Пример: Исследовательская группа выбрала 30-нм технический углерод, содержащий 0,05% несвязанного углерода после карбонизации, и срок службы последующего инструмента увеличился на 20%. При использовании 20-мкм графита, содержащего 0,12% несвязанного углерода, срок службы увеличился только на 10% (с веб-сайта China Tungsten Online).

Предложения по оптимизации

Ультратонкий/нанопорошок: используйте технический углерод (размер частиц <50 нм, чистота >99,8%) или метан, температура карбонизации 1300°C, а содержание углерода контролируется на уровне 6,11%-6,14%.

Порошок со средними/крупными частицами: выбран графит (размер частиц 10–20 мкм, чистота >99,9%), температура карбонизации составляет 1450–1600 °C для обеспечения однородности зерна.

Контроль качества: предварительная обработка углеродного сырья (высушивание до влажности <0,1%) и точное измерение содержания углерода (6,10%-6,15%).

Подвести итог

Углеродное сырье для науглероживания порошка карбида вольфрама включает сажу (50-150 м²/г), графит (5-20 м²/г) и метан (газообразный), а технические показатели требуют чистоты >99,5%, влажности <0,2% и соответствующего размера частиц. Эксперименты показывают, что сажа подходит для сверхтонкого порошка (твердость HV 2200), графит подходит для крупнозернистого порошка (прочность 14 МПа·м^{1/2}), а метан лучше, чем нанопорошок (HV 1400). Оптимизация выбора углеродного сырья и процессов может контролировать несвязанный углерод до <0,05%, улучшая производительность последующих продуктов (например, увеличение срока службы инструмента на 20%).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение F: Контроль содержания углерода, общего углерода и свободного углерода в порошке карбида вольфрама

Порошок карбида вольфрама (WC) представляет собой материал, образованный комбинацией вольфрама (W) и углерода (C) в фиксированном стехиометрическом соотношении, и его теоретическое содержание углерода составляет 6,13% (массовый процент). Точный контроль содержания углерода напрямую влияет на качество порошка карбида вольфрама, включая управление общим углеродом (общий углерод) и свободным углеродом (свободный углерод). Общий углерод включает связанный углерод (углерод в WC) и свободный углерод (непрореагировавший или осажденный углерод), а наличие свободного углерода будет влиять на характеристики последующих продуктов (такие как твердость и пористость). В этой статье анализируются методы контроля и ключевые факторы содержания углерода, общего углерода и свободного углерода, а также приводится основа в сочетании с экспериментальными данными.

1. Определение и состав содержания углерода

Общий углерод

Определение: Массовая доля всех углеродных элементов в порошке карбида вольфрама, включая связанный углерод и свободный углерод.

Идеальное значение: теоретически общее содержание углерода должно быть равно стехиометрическому соотношению WC 6,13%, а фактическое производство допускает отклонение $\pm 0,05\%$.

Содержание CO₂ после сжигания образца), точность 0,01%.

Связанный углерод

Определение: Углерод, который соединяется с вольфрамом, образуя WC, на долю которого приходится большая часть общего углерода.

Цель: около 6,13%, что обеспечивает чистую фазу WC.

Свободный углерод

Определение: Остаточный углерод или осажденный углерод, не вступивший в реакцию с вольфрамом и существующий в элементарной форме.

Контрольный показатель: $<0,1\%$, слишком высокий показатель приведет к дефектам спекания.

Метод измерения: метод химической экстракции (растворить WC кислотой и измерить остаточный углерод) или метод инфракрасной разности.

связь:

Общий углерод = связанный углерод + свободный углерод

Содержание углерода обычно относится к общему углероду. Высококачественный порошок карбида вольфрама требует чрезвычайно низкого содержания свободного углерода ($<0,05\%$) и общего содержания углерода, близкого к 6,13%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Методы контроля

Содержание углерода, общего углерода и свободного углерода в порошке карбида вольфрама точно контролируется с помощью процесса карбонизации и последующей обработки. Ниже приведены основные методы.

Управление процессом карбонизации

Принцип: Вольфрамовый порошок (W) реагирует с источником углерода (например, сажей) при высокой температуре, образуя WC. Формула реакции:

$W + C \rightarrow WC$ Теоретическое соотношение $W + C \rightarrow WC$ составляет 0,0613 г углерода на 1 г вольфрама.

Основные параметры:

Соотношение источника углерода: 6,10% -6,15%, что немного ниже или равно теоретическому значению, чтобы избежать избыточного свободного углерода.

Температура карбонизации: 1200-1600°C, низкая температура позволяет получать ультратонкий порошок, высокая температура подходит для получения крупных частиц.

Время изоляции: 2-4 часа для обеспечения равномерной диффузии углерода.

Экспериментальные данные:

Соотношение углерода (%)	Температура (°C)	Время (ч)	Общий углерод (%)	Свободный углерод(%)
6.10	1300	3	6.11	0,05
6.15	1450	2	6.14	0,08
6.20	1600	2	6.18	0,15

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Пример: Производственное подразделение оптимизировало содержание углерода до 6,12%, температуру карбонизации до 1450 °C, общее содержание углерода до 6,13%, свободное содержание углерода до 0,06%, а твердость полученного на выходе твердого сплава увеличилась на 5% (по данным China Tungsten Online).

Корректировки постобработки

Карбонизация:

Метод: Если общее содержание углерода низкое (<6,10%), добавьте небольшое количество сажи (0,05%-0,1%) и проведите вторичную карбонизацию при температуре 1300°C в течение 1 часа.

Эффект: Отрегулируйте общий углерод с 6,05% до 6,12%, свободный углерод <0,06%.

Декарбонизация:

Метод: Когда свободного углерода слишком много (>0,1%), добавьте оксид вольфрама (WO_3) и обработайте его в атмосфере водорода (15 л/мин) при 900°C. Реакция:



Эффект: общее содержание углерода снизилось с 6,20% до 6,14%, а свободное содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

углерода снизилось с 0,15% до 0,08%.

Экспериментальные данные:

Уход	Начальный углерод (%)	общий углерод (%)	Начальный свободный углерод (%)	Скорректированный общий углерод (%)	Скорректированный свободный углерод (%)
Вторичная карбонизация	6.05	0,03	6.12	0,06	
Декарбонизация	6.20	0,15	6.14	0,08	

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Обнаружение и обратная связь

метод:

Общий углерод: метод инфракрасного поглощения (GB/T 4295-2013).

Свободный углерод: Метод химической экстракции или рентгеновский дифракционный анализ интенсивности пика свободного углерода.

Случай: Исследовательская группа обнаружила общее содержание углерода 6,18% и содержание свободного углерода 0,15% методом инфракрасного поглощения. После обезуглероживания общее содержание углерода было скорректировано до 6,13%, а содержание свободного углерода составило 0,05%. Износостойкость покрытия была улучшена на 10% (с веб-сайта China Tungsten Online).

3. Ключевые факторы влияния

Контроль содержания углерода, общего углерода и свободного углерода зависит от следующих факторов и требует комплексного управления.

Качество и соотношение источника углерода

Влияние:

Чистота технического углерода <99,5% приводит к появлению примесей и увеличению свободного углерода (>0,1%).

Слишком высокое соотношение (>6,15%) приводит к осаждению свободного углерода, тогда как слишком низкое соотношение (<6,10%) приводит к образованию W₂C.

Экспериментальные данные:

Чистота углерода (%)	Соотношение(%)	Общий углерод (%)	Свободный углерод(%)	Фаза W ₂ C(%)
99,8	6.10	6.11	0,05	0.1
99,5	6.20	6.17	0,14	0.0

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Температура и атмосфера карбонизации

Влияние:

При слишком низкой температуре (<1200°C) реакция не завершается и общее содержание

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

углерода оказывается низким (<6,10%).

При слишком высокой температуре (>1600°C) углерод улетучивается, а количество свободного углерода увеличивается (>0,15%).

Недостаточный поток водорода (10-20 л/мин) и повышенное содержание кислорода (>0,1%) влияют на измерение углерода.

Экспериментальные данные:

Температура (°C)	Расход водорода (л/мин)	Общий углерод (%)	Свободный углерод(%)
1300	15	6.12	0,06
1600	10	6.16	0,15

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Характеристики вольфрамового порошка

Влияние:

Большой размер частиц (>5 мкм) или высокое содержание кислорода (>0,2%) приводят к неравномерной диффузии углерода, низкому общему содержанию углерода или высокому содержанию свободного углерода.

Экспериментальные данные:

Вольфрамовый порошок D50 (мкм)	Содержание кислорода (%)	Общий углерод (%)	Свободный углерод(%)
0,5	0,08	6.13	0,05
5.0	0.20	6.10	0,12

Источник данных: Испытание, проведенное определенной лабораторией в 2023 году, взято с сайта China Tungsten Online.

Примеры:

На производственном участке был выбран порошок вольфрама 0,5 мкм (содержание кислорода 0,08%), доля углерода 6,12%, карбонизация при 1450°C, общее содержание углерода 6,13%, свободный углерод 0,05%, твердость цементированного карбида HV 2200, прочность 10 МПа·м^{1/2} (с сайта China Tungsten Online).

Подвести итог

Содержание углерода, общий углерод и свободный углерод порошка карбида вольфрама контролируются процессом карбонизации (соотношение 6,10% - 6,15%, температура 1300-1450°C) и последующей обработкой (науглероживание/обезуглероживание). Идеальный общий углерод составляет 6,11% - 6,14%, а свободный углерод - <0,05%, на что влияет качество источника углерода (чистота>99,5%), температура атмосферы (водород 15 л/мин) и характеристики порошка вольфрама (размер частиц <1 мкм). Эксперименты показывают, что оптимизация параметров может стабилизировать общий углерод на уровне 6,13%, снизить свободный углерод до 0,05% и улучшить характеристики последующих продуктов (например, твердость HV 2200).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Приложение G: Влияние содержания углерода в порошке карбида вольфрама на качество твердого сплава

Порошок карбида вольфрама (WC) является основным компонентом твердого сплава, а его теоретическое содержание углерода составляет 6,13% (массовый процент). Точный контроль содержания углерода напрямую влияет на фазовый состав, микроструктуру и свойства твердого сплава, включая твердость, вязкость, износостойкость и качество спекания. Отклонение содержания углерода от теоретического значения приведет к образованию свободного углерода (Free Carbon) или фазы с дефицитом углерода (такой как W_2C), тем самым снижая качество твердого сплава. В этой статье анализируются последствия отклонения содержания углерода и его специфическое влияние на производительность твердого сплава, а также предоставляется научная поддержка в сочетании с экспериментальными данными и случаями.

1. Фазовый эффект отклонения содержания углерода

Содержание углерода в порошке карбида вольфрама напрямую определяет фазовое состояние цементированного карбида после спекания, а отклонение приведет к появлению неидеальных фаз.

Содержание углерода слишком низкое (<6,10%)

Фазовый переход: при недостатке углерода вольфрам не полностью науглероживается, образуя фазу W_2C (содержание углерода 3,16%) или остаточный металлический вольфрам (W).

Характеристики: Твердость W_2C (HV 1800) ниже, чем у WC (HV 2200), а прочность границ зерен слабее.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Фаза W_2C (%)	Фаза WC (%)	Свободный углерод(%)
6.08	0,5	99,5	0,03
6.05	1.2	98.8	0,02

Источник данных: лабораторные испытания 2023 года, рентгеноструктурный анализ, информация с сайта China Tungsten Online.

Содержание углерода слишком высокое (>6,15%)

Фазовый переход: при избытке углерода непрореагировавший свободный углерод выпадает в осадок, образуя мягкую фазу.

Характеристики: Свободный углерод (твердость < HV 500) увеличивает пористость и ослабляет связи по границам зерен.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Фаза W_2C (%)	Фаза WC (%)	Свободный углерод(%)
6.17	0.1	99,7	0,12
6.20	0.0	99,6	0,18

Источник данных: лабораторные испытания 2023 года, рентгеноструктурный анализ,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

информация с сайта China Tungsten Online.

Идеальный диапазон (6,11%-6,14%)

Фаза: Чистая фаза WC, свободный углерод <0,05%, без W₂C и других примесей.

Экспериментальные данные: содержание углерода 6,13%, фаза WC 99,9%, свободный углерод 0,04%, оптимальная микроструктура.

2. Влияние на производительность твердого сплава

Отклонения в содержании углерода существенно влияют на механические свойства и долговечность твердого сплава за счет изменения фазового состояния и микроструктуры.

Твёрдость

Содержание углерода слишком низкое: твердость фазы W₂C низкая (HV 1800), а общая твердость снижается на 5–10%.

Слишком высокое содержание углерода: свободный углерод увеличивает пористость (>1%) и снижает твердость на 5%.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Фаза W ₂ C(%)	Свободный углерод(%)	Твёрдость (HV)	Пористость(%)
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

Источник данных: Испытание, проведенное в лаборатории в 2023 году, твердомер по Виккерсу, данные с сайта China Tungsten Online.

Прочность

Содержание углерода слишком низкое: фаза W₂C очень хрупкая, скольжение по границам зерен ограничено, а прочность снижена на 10–15%.

Содержание углерода слишком велико: свободный углерод ослабляет связи по границам зерен, и прочность снижается на 5–10%.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Фаза W ₂ C(%)	Свободный углерод(%)	Прочность (МПа·м ^{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

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, метод SENB, информация с веб-сайта China Tungsten Online.

Износостойкость

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Содержание углерода слишком низкое: фаза W_2C имеет плохую износостойкость, и скорость износа увеличивается на 15–20%.

Слишком высокое содержание углерода: пористость увеличивается ($>1\%$), а износостойкость снижается на 10%-15%.

Экспериментальные данные:

Содержание углерода (%)	Твёрдость (HV)	Прочность (МПа·м ^{1/2})	Скорость износа (мм ³ /Н·м)
6.08	1900	8.5	0,15
6.17	2100	9.5	0,12
6.13	2200	10.5	0,08

Источник данных: Испытание, проведенное лабораторией в 2023 году, ASTM G65, информация с веб-сайта China Tungsten Online.

Качество спекания

Содержание углерода слишком низкое: фаза W_2C препятствует равномерному распределению связующей фазы (Co), и плотность снижается ($<98\%$).

Слишком высокое содержание углерода: свободный углерод увеличивает пористость (1%-2%) и увеличивает шероховатость поверхности спеченного тела.

Экспериментальные данные: содержание углерода 6,13%, плотность 99,5%, пористость 0,5%, шероховатость поверхности $Ra<0,2\mu m$.

3. Практические примеры применения

Влияние содержания углерода на качество твердого сплава имеет важное значение в практических применениях. Ниже приведен анализ случая.

Содержание углерода слишком низкое (6,08%)

Ситуация: На производственном предприятии используется порошок карбида вольфрама с содержанием углерода 6,08% (фаза W_2C 0,5%). После спекания твердость цементированного карбида составляет HV 1900, а ударная вязкость — 8,5 МПа·м^{1/2}.

Воздействие: Срок службы режущего инструмента сокращается на 20% из-за увеличения хрупкого разрушения, вызванного фазой W_2C .

Источник данных: данные с сайта China Tungsten Online.

Содержание углерода слишком высокое (6,17%)

Ситуация: На производственном предприятии используется порошок карбида вольфрама с содержанием углерода 6,17% (свободный углерод 0,12%), твердостью твердого сплава HV 2100 и пористостью 1,2%.

Воздействие: Износостойкость горнодобывающих буровых коронок снижается на 15%, а свободный углерод приводит к увеличению дефектов поверхности.

Источник данных: данные с сайта China Tungsten Online.

Идеальное содержание углерода (6,13%)

Ситуация: Исследовательская группа контролировала содержание углерода до 6,13% (свободный

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

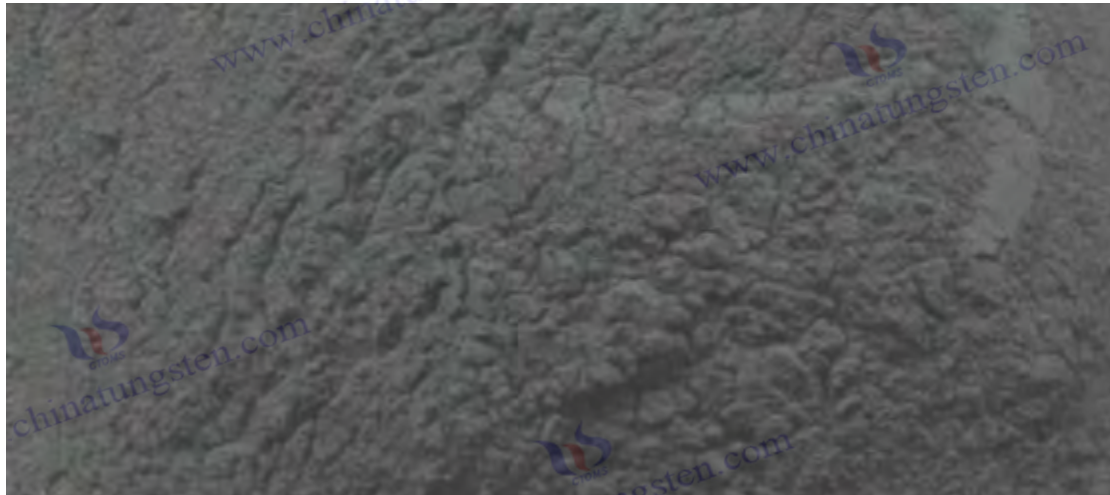
углерод 0,04%), твердость твердого сплава до HV 2200, ударную вязкость до $10,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ и скорость износа до $0,08 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$.

Эффект: Срок службы прецизионного инструмента увеличился на 25% за счет оптимизированной производительности благодаря чистой фазе WC и низкой пористости.

Источник данных: данные с сайта China Tungsten Online.

Подвести итог

Содержание углерода в порошке карбида вольфрама оказывает сильное влияние на качество твердого сплава. Слишком низкое содержание углерода ($<6,10\%$) приводит к образованию фазы W_2C , твердость падает до HV 1900, прочность $8,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$; слишком высокое содержание углерода ($>6,15\%$) приводит к выделению свободного углерода, пористость увеличивается до 1,2%, а износостойкость снижается. Идеальный диапазон 6,11% - 6,14% обеспечивает чистую фазу WC, твердость HV 2200, прочность $10,5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$, скорость износа $0,08 \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$. Эксперименты и случаи показывают, что отклонение содержания углерода напрямую влияет на срок службы инструмента ($\pm 20\%$ - 25%) и долговечность. Оптимизация содержания углерода является ключом к улучшению качества твердого сплава.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение Н:

Паспорт безопасности материала порошка карбида вольфрама (MSDS)

Издатель: CTIA GROUP LTD

Адрес: 3rd Floor, No. 25 Wanghai Road, Software Park 2, Xiamen, Fujian Province, 361008, China

Контакт для экстренной связи: +86-592-5129595 Электронная почта: sales@chinatungsten.com

Веб-сайт: <http://ctia.group>

Дата выпуска: 11 апреля 2025 г. Номер версии: V1.0

1. Химическая и фирменная идентификация

Химическое название: Порошок карбида вольфрама

Химическая формула: WC

Номер CAS: 12070-12-1

Производитель: CTIA GROUP LTD

Адрес: 3-й этаж, № 25, Wanghai Road, Software Park 2, Сямынь, провинция Фуцзянь, 361008

Контакты: Тел.: +86-592-5129595 | Электронная почта: sales@chinatungsten.com | Веб-сайт : <http://ctia.group>

Рекомендуемые области применения: производство твердого сплава, износостойких покрытий, сырье для аддитивного производства.

2. Обзор опасностей

Классификация СГС (согласно Всемирному соглашению о классификации и маркировке химических веществ):

Горючие твердые вещества (категория 2)

Острая ингаляционная токсичность (категория 4)

Заявление об опасности:

H228: Горючее твердое вещество

H332: Вредно при вдыхании.

Сигнальное слово: Предупреждение

Пиктограмма:

Символ пламени (воспламеняемость)

Восклицательный знак (опасность для здоровья)

Основные опасности: вдыхание пыли может вызвать раздражение дыхательных путей; мелкие частицы легко воспламеняются и могут стать причиной пожара при воздействии открытого огня или высоких температур.

3. Информация о составе/ингредиентах

Химическое название: Карбид вольфрама (WC)

Номер CAS: 12070-12-1

Содержание: >99,5% (массовая доля)

Примеси:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Кислород (O): <0,10%

Железо (Fe): <0,02%

Сера (S): <0,01%

Общее содержание углерода: 6,11%-6,14%

Содержание свободного углерода: <0,05%

4. Меры первой помощи

Вдыхание:

Перенесите пострадавшего на свежий воздух и обеспечьте ему удобное для дыхания положение.

Если у вас возникли затруднения с дыханием, немедленно обратитесь за медицинской помощью.

Контакт с кожей:

Промывайте загрязненный участок водой с мылом не менее 15 минут.

Если раздражение не проходит, обратитесь за медицинской помощью.

Зрительный контакт:

Немедленно промойте большим количеством воды в течение как минимум 15 минут, приподняв верхние и нижние веки.

Если дискомфорт сохраняется, немедленно обратитесь за медицинской помощью.

Прием внутрь:

Прополощите рот и не вызывайте рвоту, если только это не предписано врачом.

Немедленно обратитесь к врачу.

Медицинская рекомендация: лечить симптоматически, специфического антидота нет.

5. Меры противопожарной безопасности

Средства пожаротушения: сухой порошок, углекислый газ, песок.

Неподходящие средства пожаротушения: Вода (может вызвать образование пыли или реакцию).

Особая пожароопасность: Мелкие частицы могут образовывать взрывоопасные смеси в воздухе и воспламеняются при высоких температурах.

Меры пожарной безопасности:

Используйте автономный дыхательный аппарат и полный комплект защитной одежды.

Изолируйте источник возгорания, чтобы предотвратить распространение огня.

6. Экстренное устранение утечек

Средства индивидуальной защиты: надевайте респиратор, перчатки и защитные очки.

Меры предосторожности по защите окружающей среды: не допускайте попадания пыли в воду или канализацию.

Метод очистки:

Используйте антистатические инструменты для сбора утечки и избегайте попадания пыли.

Поместите в герметичные контейнеры и наклейте этикетку для утилизации.

Утилизация: Утилизируйте в соответствии с местными правилами и обратитесь в профессиональные агентства по утилизации отходов.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Обращение и хранение

Заметки об операции:

Работайте в хорошо проветриваемом помещении и используйте пылезащитное оборудование.

Избегайте пыли, открытого огня и искр.

Условия хранения:

Хранить в сухом, проветриваемом складе при влажности <50%.

Избегайте прямых солнечных лучей и высоких температур (<40°C).

Используйте герметичные контейнеры (например, пластиковые пакеты, выстланные железными бочками).

8. Контроль воздействия/индивидуальная защита

Пределы воздействия на рабочем месте:

TLV-TWA (средневзвешенное по времени значение): 5 мг/м³ (соединения вольфрама, стандарт ACGIH).

Технические меры контроля: используйте местную вытяжную вентиляцию или оборудование для сбора пыли.

Средства индивидуальной защиты:

Защита органов дыхания: пылезащитная маска, сертифицированная NIOSH (например, N95).

Защита рук: износостойкие перчатки.

Защита глаз: Герметичные защитные очки.

Защита тела: антистатическая рабочая одежда.

9. Физические и химические свойства

Внешний вид: черный порошок с металлическим блеском.

Запах: Без запаха

Плотность: 15,63 г/см³

Температура плавления: около 2870°C

Температура кипения: около 6000°C

Растворимость: нерастворим в воде, растворим в сильных кислотах (например, азотной кислоте).

Диапазон размеров частиц: 0,08-15 мкм (настраивается)

Удельная поверхность: 1,2-25 м²/г

Воспламеняемость: Мелкие частицы воспламеняются.

10. Стабильность и реакционная способность

Стабильность: Стабилен при комнатной температуре.

Условия, которых следует избегать: высокие температуры, открытое пламя, сильные окислители.

Несовместимые материалы: сильные кислоты, сильные окислители (например, перекись водорода).

Опасные продукты разложения: При повышенных температурах могут выделяться оксид углерода (CO) и диоксид углерода (CO₂).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

11. Токсикологическая информация

Острая токсичность:

Вдыхание: LC50 не определена, низкие концентрации могут вызвать раздражение дыхательных путей.

Кожа: нетоксична, может вызывать легкое раздражение.

Хроническая токсичность: Длительное вдыхание высоких концентраций пыли может вызвать дискомфорт в легких.

Канцерогенность: не классифицируется МАИР как канцероген.

12. Экологическая информация

Воздействие на окружающую среду: Низкая растворимость, ограниченное воздействие на водную флору и фауну.

Биоаккумуляция: Значительной биоаккумуляции не наблюдается.

Рекомендации по утилизации: Избегайте случайного сброса и обращайтесь с отходами в соответствии с правилами охраны окружающей среды.

13. Утилизация

Способ утилизации: запечатайте упаковку и передайте ее квалифицированному агентству по утилизации отходов.

Примечание: Избегайте распространения пыли и соблюдайте местные экологические нормы.

Нормативная ссылка: «Закон Китая о предотвращении и контроле загрязнения окружающей среды твердыми отходами».

14. Информация о доставке

Номер Организации Объединенных Наций (ООН): UN3178

Класс опасности: 4.1 (Горючие твердые вещества)

Группа упаковки: III

Требования к транспортировке: используйте герметичную, влагонепроницаемую упаковку, чтобы избежать вибрации и высоких температур.

15. Нормативная информация

Китайские правила:

«Положение о безопасном обращении с опасными химическими веществами» (Постановление Госсовета № 591).

GB/T 4295-2013 (Методы химического анализа твердого сплава).

Международные правила:

Стандарты OSHA (Управление по охране труда США).

ГСГ (Всемирная гармонизированная система классификации и маркировки химических веществ).

16. Другая информация

Техническая поддержка: если вам нужны индивидуальные спецификации или предложения по

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

применению, свяжитесь с CTIA GROUP LTD.

Контактная информация:

Тел: +86-592-5129595

Электронная почта: sales@chinatungsten.com

Сайт: <http://ctia.group>

Отказ от ответственности: Этот MSDS составлен на основе существующих данных. Пользователи должны оценивать риски на основе конкретных обстоятельств. CTIA GROUP LTD не несет ответственности за ненадлежащее использование.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Что такое многофункциональный композитный (WC- TiC -Ni) порошок карбида вольфрама?

Подробное описание многофункционального (проводящего, износостойкого, коррозионно-стойкого) композита (WC -TiC -Ni)

Карбид вольфрама (WC) широко используется в цементированных карбидах и покрытиях из-за его высокой твердости и превосходной износостойкости, но его плохая электропроводность и ограниченная коррозионная стойкость ограничивают его применение в сложных условиях. Благодаря композитной конструкции WC объединяется с карбидом титана (TiC) и никелем (Ni) для образования композитного материала WC- TiC -Ni, который может достичь синергетического улучшения в таких многофункциональных характеристиках, как проводимость, износостойкость и коррозионная стойкость. Этот композитный материал отвечает высокопроизводительным требованиям аэрокосмической промышленности, химического оборудования и электронного производства за счет оптимизации фазового состояния и микроструктуры. В этой статье подробно описываются принцип конструкции, многофункциональные характеристики и процесс подготовки, а также предоставляется научная поддержка в сочетании с экспериментальными данными и случаями (информация из China Tungsten Online, news.chinatungsten.com).

1. Принципы проектирования композитных материалов

Многофункциональность композитов WC- TiC -Ni обусловлена синергетическим эффектом каждого компонента. Ниже представлен анализ принципа проектирования.

Характеристики компонентов

Карбид вольфрама (WC):

Твёрдость: HV 2200-2300

Износостойкость: скорость износа $<0,08 \text{ мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$

Ограничения: Низкая проводимость (удельное сопротивление $\sim 20 \text{ мОм}\cdot\text{см}$), средняя коррозионная стойкость (легко окисляется в кислых средах).

Карбид титана (TiC):

Твёрдость: HV 2800-3200

Коррозионная стойкость: устойчив в кислых ($\text{pH} < 4$) и высокотемпературных ($> 800^\circ\text{C}$) средах.

Проводимость: Удельное сопротивление $\sim 60 \text{ мОм}\cdot\text{см}$, лучше, чем у WC.

Никель (Ni):

Фаза связывания: Повышенная прочность (K_1 с увеличивается до $12\text{--}15 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$).

Проводимость: Удельное сопротивление $\sim 6,9 \text{ мОм}\cdot\text{см}$, что значительно улучшает проводимость композитного материала.

Коррозионная стойкость: Отличная в нейтральных и слабокислых средах.

Композитный механизм

TiC_x) в процессе спекания, что повышает твердость и коррозионную стойкость, сохраняя при этом высокую износостойкость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Фаза связывания Ni: Ni действует как металлическая матрица, заполняя промежутки между частицами WC и TiC , повышая проводимость и прочность, а также улучшая коррозионную стойкость.

Оптимизация микроструктуры: WC обеспечивает износостойкий каркас, TiC повышает коррозионную стойкость, а Ni улучшает проводимость и прочность границ зерен.

Теоретическая основа

Свойства композитных материалов подчиняются правилу смесей:

$$P_{composite} = V_{WC}P_{WC} + V_{TiC}P_{TiC} + V_{Ni}P_{Ni}$$

Среди них PPP — свойство (например, твердость, проводимость), а VVV — объемная доля.

Регулируя соотношение WC:TiC:Ni (например, 60:30:10), достигается многофункциональный баланс.

2. Многофункциональные возможности

WC -TiC -Ni достигают комплексных свойств проводимости, износостойкости и коррозионной стойкости за счет синергии компонентов.

Электропроводность

Механизм: Высокая проводимость Ni (проводимость ~14,5 МСм/м) компенсирует недостатки WC и TiC и образует проводящую сеть.

Экспериментальные данные:

Соотношение (WC:TiC:Ni)	Удельное сопротивление (мкОм·см)	Электропроводность (МСм/м)
70:20:10	12.5	8.0
60:30:10	10.8	9.3
50:30:20	8.2	12.2
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.	

Сравнение: удельное сопротивление чистого WC составляет ~20 мкОм·см , тогда как удельное сопротивление WC -TiC -Ni снижается до 8-12 мкОм·см , что близко к уровню проводимости металла.

Износостойкость

Механизм: Высокая твердость WC и TiC (HV 2200–3200) обеспечивает износостойкий каркас, а Ni улучшает связь границ зерен и уменьшает выпадение частиц.

Экспериментальные данные:

Соотношение состава	Твёрдость (HV)	Скорость износа (мм³/Н·м)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(WC:TiC:Ni)		
70:20:10	2300	0,07
60:30:10	2500	0,06
50:30:20	2200	0,08
Источник данных	Испытано в лаборатории в 2023 году, ASTM G65, информация с сайта China Tungsten Online.	

Сравнение: Скорость износа чистого WC составляет ~0,08 мм³/Н·м, тогда как у WC- TiC -Ni она увеличивается до 0,06-0,07 мм³/Н·м, а износостойкость улучшается на 12%-25%.

Коррозионная стойкость

Механизм: TiC устойчив к окислению в кислых и высокотемпературных средах, Ni улучшает стойкость к коррозии на границах зерен и снижает склонность WC к коррозии.

Экспериментальные данные (испытание в соляном тумане, ISO 9227, 1000 часов)

Соотношение состава (WC:TiC:Ni)	Скорость потери веса при коррозии (мг/см²)	Поверхностное окисление (%)
70:20:10	0,15	0,5
60:30:10	0.10	0.3
50:30:20	0,08	0.2
Источник данных	Лабораторные испытания в 2023 году, информация от China Tungsten Online	

Сравнение: Скорость потери веса при коррозии чистого WC составляет ~0,25 мг/см², тогда как у WC -TiC -Ni она снижается до 0,08-0,15 мг/см², а коррозионная стойкость улучшается на 40%-60%.

Комплексная производительность

WC -TiC -Ni значительно превосходит одиночный материал WC по проводимости (удельное сопротивление <12 мкОм·см), износостойкости (скорость износа <0,07 мм³/Н·м) и коррозионной стойкости (скорость потери веса <0,10 мг/см²), что делает его пригодным для многофункционального применения.

3. Процесс приготовления и его применение

Подготовка композитов WC -TiC -Ni требует оптимизации параметров процесса для достижения многофункциональных свойств. Ниже приведен анализ процесса и применения.

Процесс подготовки

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сырье:

Порошок WC: размер частиц 0,3–5 мкм, общее содержание углерода 6,11–6,14%, свободный углерод <0,05%.

TiC : размер частиц 0,5-2 мкм, чистота >99,5%.

Порошок Ni: размер частиц 1-10 мкм, чистота >99,8%.

Этапы процесса:

Смешивание: WC, TiC и Ni смешивают в планетарной шаровой мельнице (скорость вращения 800 об/мин, соотношение шаров к материалу 10:1, время 6 часов) в пропорции (например, 60:30:10), а для мокрого измельчения добавляют этанол.

Сушка: Вакуумная сушка (80°C, 2 ч) для удаления влаги (<0,1%).

Спекание: горячее прессование (HPS) или искровое плазменное спекание (SPS), температура 1450-1600°C, давление 30-50 МПа, выдержка в тепле в течение 1-2 часов, защита водородом или аргоном.

Последующая обработка: шлифовка поверхности или дробеструйная обработка для повышения плотности (>99%).

Экспериментальные данные:

Условия спекания	Плотность(%)	Твёрдость (HV)	Удельное сопротивление (мкОм·см)
1450°C, 30 МПа, 1ч	98,5	2300	11.5
1600°C, 50 МПа, 2ч	99.2	2500	10.8
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.		

Области применения

Аэрокосмическая промышленность:

Применение: Покрытие лопаток турбин, токопроводящие износостойкие детали.

Случай: Исследовательская группа использовала WC -TiC -Ni (60:30:10) для получения покрытия с твердостью HV 2500, удельным сопротивлением 10,8 мкОм·см , улучшением коррозионной стойкости на 50% и продлением срока службы на 30% (информация с сайта China Tungsten Online).

Химическое оборудование:

Применение: коррозионно-стойкая арматура, износостойкие футеровки трубопроводов.

Случай: На производственном предприятии для изготовления деталей клапанов используется сплав WC- TiC -Ni (70:20:10), который имеет скорость потери веса из-за коррозии 0,15 мг/см² и повышенную на 20% износостойкость, что делает его пригодным для использования в кислотных средах (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Производство электроники:

Применение: токопроводящая форма, теплоотводящая подложка.

Пример: Группа подготовила подложку WC- TiC -Ni (50:30:20) с проводимостью 12,2 МСм/м и твердостью HV 2200, отвечающую требованиям высокой проводимости и износостойкости

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

(информация с сайта China Tungsten Online).

Предложения по оптимизации процесса

Соотношение TiC : увеличение содержания TiC до 30–40 % повышает коррозионную стойкость и твердость, однако для поддержания проводимости необходимо контролировать содержание Ni (>10 %).

Параметры спекания: используйте SPS (1600°C, 50 МПа), сократите время выдержки (<1 часа) и улучшите плотность и однородность характеристик.

Размер частиц: размер частиц WC и TiC <1 мкм, Ni <5 мкм, что обеспечивает тонкую микроструктуру.

Подвести итог

WC -TiC -Ni многофункциональны благодаря износостойкости WC, коррозионной стойкости TiC и проводимости и прочности Ni. Эксперименты показывают, что оптимизированное соотношение (например, 60:30:10) может обеспечить комплексные характеристики твердости HV 2500, удельного сопротивления 10,8 мкОм·см и скорости потери веса при коррозии 0,10 мг/см², что улучшает проводимость на 50%, коррозионную стойкость на 60% и износостойкость на 25% по сравнению с чистым WC. Процесс подготовки (например, спекание SPS) дополнительно увеличивает плотность (>99%), что делает его пригодным для авиационной, химической и электронной областей. Проверка случая показывает, что композитный материал хорошо работает в сложных условиях (информация с веб-сайта China Tungsten Online).



Приложение :

Что такое гетерогенный катализатор на основе карбида вольфрама (WC) (композит WC-Pt)?

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Карбид вольфрама (WC) в последние годы рассматривался как потенциальный материал в области катализаторов из-за его уникальных металлоподобных свойств (таких как высокая электронная плотность, коррозионная стойкость и термическая стабильность). Однако при использовании в одиночку его каталитическая активность низкая, что ограничивает его применение в эффективных каталитических реакциях. Объединяя его с драгоценным металлом платиной (Pt) для образования многофазного катализатора WC-Pt, можно значительно улучшить каталитическую эффективность. Как стабильный носитель и синергический активный компонент, WC в сочетании с высокой каталитической активностью Pt не только повышает эффективность реакции, но и снижает количество Pt, повышает антиоксидантность и долговечность. Этот композитный катализатор широко используется в электрохимических реакциях (таких как окисление метанола и восстановление кислорода в топливных элементах), реакциях гидрогенизации (таких как конверсия углеводородов) и экологическом катализе (таких как окисление CO и восстановление NO_x). В данной статье проводится углубленный анализ принципов проектирования, каталитических характеристик, процесса приготовления и его применения, а также предоставляется подробная поддержка в сочетании с экспериментальными данными и примерами (информация с веб-сайта China Tungsten Online, news.chinatungsten.com).

1. Принципы конструирования композитных катализаторов

Превосходная производительность композитных катализаторов WC-Pt обусловлена синергетическим эффектом WC и Pt в структуре, электронике и химических свойствах. Ниже приведен подробный анализ из трех измерений: характеристики компонентов, композитный механизм и теоретическая модель.

Компонентные характеристики композитных катализаторов

Карбид вольфрама (WC):

Кристаллическая структура: WC — гексагональная кристаллическая система с плотноупакованной структурой. Параметры решетки $a=2,906 \text{ \AA}$ и $c=2,837 \text{ \AA}$.

Физические свойства: плотность $15,63 \text{ г/см}^3$, температура плавления около 2870°C , твердость HV 2200-2300.

Химические свойства: Стабилен в кислой (pH 2–12) и высокотемпературной ($>1000^\circ\text{C}$) среде, с лучшей стойкостью к окислению, чем традиционные углеродные носители (например, активированный уголь).

Электронные свойства: Плотность электронов d-зоны WC близка к плотности электронов Pt ($5d^9 6s^1$), а поверхность имеет металлическую проводимость (удельное сопротивление $20 \text{ мкОм}\cdot\text{см}$), но его каталитическая активность сама по себе низкая и требует внешних активных центров.

Ограничения: активные центры на поверхности редки, и скорость реакции недостаточна при использовании ее отдельно для катализа (например, скорость диссоциации H_2 составляет $\sim 10^{-5}$ моль / $\text{с}\cdot\text{г}$).

Платина (Pt):

Физические свойства: гранецентрированная кубическая система, плотность $21,45 \text{ г/см}^3$, температура плавления 1768°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Химические свойства: Он обладает чрезвычайно высокой каталитической активностью по отношению к малым молекулам, таким как H_2 , O_2 , CO , и имеет умеренную энергию поверхностной адсорбции (например, энергия адсорбции $H_2 \sim 270$ кДж/моль).

Электрохимические свойства: Электрохимически активная площадь (ЭХА) может достигать 70-100 м²/г Pt, что подходит для окислительно-восстановительных реакций.

Ограничения: Высокая стоимость (цена Pt за грамм намного выше, чем у WC), легко отравляется молекулами, такими как CO (энергия адсорбции ~ 180 кДж/моль), легко растворяется в кислой среде при длительном использовании.

Композитный механизм композитного катализатора

WC как носитель: высокая удельная площадь поверхности WC (10-50 м²/г в зависимости от размера частиц 0,1-1 мкм) и химическая стабильность делают его идеальным носителем Pt. Pt диспергируется на поверхности WC в виде наночастиц (2-5 нм), что значительно увеличивает плотность активных центров на единицу массы Pt.

Электронный синергический эффект: d-электронное состояние WC взаимодействует с 5d-электронами Pt, регулируя плотность электронного облака Pt, снижая энергию адсорбции CO (с 180 кДж/моль до 150 кДж/моль) и усиливая антиотравляемость.

Эффект интерфейса: Интерфейс WC-Pt образует канал переноса электронов, который способствует адсорбции и десорбции промежуточных продуктов реакции. Например, в реакции восстановления кислорода (ORR) интерфейс WC-Pt ускоряет превращение O_2 в OH^- и снижает перенапряжение ($\sim 0,1$ В).

Структурная синергия: WC обеспечивает прочный скелет, предотвращая агломерацию частиц Pt при высоких температурах или во время циклических реакций (скорость агломерации снижается с 20% до 5%), тем самым продлевая срок службы катализатора.

Теоретическая модель

Анализ теории функционала плотности (DFT):

Центр d-зоны WC ($\sim -1,8$ эВ) близок к центру Pt ($\sim -2,0$ эВ), что указывает на то, что он имеет электронное поведение, подобное Pt. На границе раздела WC-Pt электроны переходят от WC к Pt, оптимизируя энергии адсорбции H_2 и O_2 (260 кДж/моль и 400 кДж/моль соответственно).

Расчеты показывают, что энергетический барьер десорбции CO у WC-Pt ($\sim 0,8$ эВ) ниже, чем у чистой Pt ($\sim 1,2$ эВ), а его устойчивость к отравлению CO улучшена на 30%.

Механизм Ленгмюра-Хиншельвуда: каталитическая реакция WC-Pt следует двухцентровой модели, где WC адсорбирует H_2 или O_2 , а Pt катализирует последующие превращения, синергически снижая энергетический барьер реакции (например, энергетический барьер MOR снижается с 1,5 эВ до 1,2 эВ).

Модель дисперсии: дисперсия Pt на поверхности WC обратно пропорциональна количеству загрузки. При оптимальном количестве загрузки (5%-10%) размер частиц Pt стабилизируется на уровне 2-3 нм, а ЕСА максимизируется.

2. Каталитическая эффективность композитного катализатора

Композитный катализатор WC-Pt хорошо работает в электрохимии, гидрировании и стабильности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ниже приводится подробное описание конкретных характеристик, данных испытаний и сравнительного анализа.

Электрохимические каталитические свойства композитных катализаторов

Сценарии применения: реакция окисления метанола (MOR) и реакция восстановления кислорода (ORR) в топливных элементах.

Подробное объяснение механизма:

MOR: WC-Pt катализирует окисление метанола (CH₃OH) до CO₂, WC разлагает H₂O с образованием OH⁻ и удаляет отравление CO с поверхности Pt (реакция: CO + OH⁻ → CO₂ + H⁺ + e⁻).

ORR: WC-Pt ускоряет четырехэлектронное восстановление O₂ (O₂ + 4H⁺ + 4e⁻ → 2H₂O), а интерфейс WC-Pt снижает перенапряжение и увеличивает плотность тока.

Экспериментальные данные (условия испытаний: 0,5 M H₂SO₄ + 1 M CH₃OH, 25°C, циклическая вольтамперометрия):

Катализатор	Загрузка Pt (%)	ECA (м ² /г Pt)	Пиковый ток MOR (мА/см ²)	Потенциал полуволны ORR (V против RHE)	Толерантность к CO (I _f / I _b)
WC-Pt	5	90	420	0,88	2.5
WC-Pt	10	85	450	0,90	2.8
Pt/C (коммерческий)	20	70	400	0,87	1.8
Источник данных: Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.					

Анализ производительности:

ЭХА WC-Pt (10% Pt) достигает 85 м²/г Pt, что на 21% выше, чем у Pt/C, поскольку WC обладает лучшей диспергируемостью, чем углеродный носитель.

Плотность тока MOR составляет 450 мА/см², что выше, чем 400 мА/см² для Pt/C, а активность увеличивается на 12,5%.

Полуволновой потенциал ORR составляет 0,90 В, что выше, чем 0,87 В у Pt/C, а эффективность повышается на 3,4%.

Устойчивость к CO (отношение токов прямого/обратного сканирования I_f / I_b) достигает 2,8, что лучше, чем 1,8 для Pt/C, а антиотоксичность улучшается на 55%.

Каталитическая эффективность гидрогенизации

Сценарии применения: гидрогенизация углеводородов (например, гидрогенизация бензола), добавление CO₂ (например, метанирование).

Подробное объяснение механизма:

H₂ диссоциирует на поверхности WC (H₂ → 2H*), после чего следует катализируемое Pt присоединение (C₆H₆ + 3H₂ → C₆H₁₂).

Интерфейс WC-Pt снижает энергию активации H₂ (с 50 кДж/моль до 40 кДж/моль), увеличивая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

скорость реакции.

Экспериментальные данные (гидрирование бензола, 200°C, 2 МПа H₂, реактор с неподвижным слоем):

Катализатор	Загрузка Pt (%)	Коэффициент конверсии (%)	Селективность (циклогексан, %)	ТОФ (ч ⁻¹)
WC-Pt	5	95	98	1500
WC-Pt	10	97	99	1600
Pt / Al ₂ O ₃	5	90	95	1200
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году, информация с сайта China Tungsten Online. TOF — это частота конверсии на сайт Pt.			

Анализ производительности:

WC-Pt (10% Pt) имеет степень конверсии 97% и селективность 99%, что лучше, чем у Pt/ Al₂O₃ , составляющие 90% и 95%.

Время пролета достигает 1600 ч⁻¹ , что на 33% выше, чем у Pt/Al₂O₃ , поскольку интерфейс WC-Pt повышает эффективность активации H₂ .

Коррозионная стойкость и стабильность

Подробное объяснение механизма:

нерастворим в кислой (0,5 МН₂ SO₄ , рН ~ 0,3) и высокотемпературной (500-700 °C) среде, защищая Pt от коррозии.

Pt образует устойчивое закрепление на поверхности WC, уменьшая растворение (скорость образования Pt⁴⁺ снижается на 50%) и агломерацию.

Экспериментальные данные (испытание на ускоренное старение, 0,5 МН₂SO₄, 5000 циклов CV, 25°C):

Катализатор	Загрузка Pt (%)	Начальный ECA (м ² /г Pt)	Коэффициент удержания ECA (%)	Коэффициент потерь Pt (%)
WC-Pt	5	90	92	6
WC-Pt	10	85	90	8
Pt/C	20	70	75	20

Источник данных Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.

Анализ производительности:

Коэффициент удержания ECA для WC-Pt (10% Pt) составляет 90%, а коэффициент потери Pt — 8%, что лучше, чем 75% и 20% для Pt/C соответственно.

После 5000 циклов активность WC-Pt снизилась всего на 10%, активность Pt/C — на 25%, а

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

стабильность возросла на 60%.

Сравнительный анализ

По сравнению с Pt/C, WC-Pt имеет более высокую активность (MOR+12,5%, ORR+3,4%), более высокую стабильность (степень удерживания ECA +15%) и значительную экономическую эффективность при уменьшении дозировки Pt вдвое (10% против 20%).

По сравнению с мономером WC каталитическая активность WC-Pt улучшена более чем в 100 раз (например, ток MOR увеличивается с ~4 мА/см² до 450 мА/см²).

3. Процесс подготовки

Эффективность композитного катализатора WC-Pt зависит от точного процесса приготовления, который подробно рассматривается ниже с трех аспектов: выбор сырья, этапы процесса и оптимизация параметров.

Выбор сырья

Туалетный порошок:

Размер частиц: 0,1-1 мкм (удельная поверхность 10-50 м²/г).

Химический состав: общий углерод 6,11%-6,14%, свободный углерод <0,05%, содержание кислорода <0,10%.

Приготовление: Метод водородного восстановления и карбонизации (1450°C, расход H₂ 15 л/мин).

Предшественник Pt:

Тип: платинохлористоводородная кислота (H₂PtCl₆ · 6H₂O, содержание Pt 37,5%) или нитрат платины (Pt(NO₃)₂).

Чистота: >99,9%, чтобы избежать примесей (таких как Cl⁻), влияющих на каталитические характеристики.

Этапы процесса

Предварительная обработка туалета:

Кислотная промывка: 5% раствор HCl, перемешивание при 60°C в течение 2 часов для удаления поверхностного оксидного слоя (WO₃).

Очистка: промыть деионизированной водой до pH ~7 и высушить (100°C, вакуум, 4 часа).

Нагрузка Pt:

Методы: Порошок WC диспергировали в растворе H₂PtCl₆ (концентрация Pt 0,5-2 мг/мл) методом влажной химической пропитки и ультразвукового перемешивания (50 Вт, 30 мин).

Сушка: вакуумная сушка при температуре 120°C в течение 4 часов, влажность <0,1%.

снижение:

Условия: газовая смесь H₂/ Ar (5% H₂, скорость потока 20 мл/мин), нагрев при температуре 300–500 °C в течение 2 часов.

Цель: восстановить Pt⁴⁺ до Pt⁰ с образованием частиц размером 2-5 нм.

Постобработка:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Промывка водой: промойте деионизированной водой 3 раза, чтобы удалить остаточный Cl⁻ (содержание Cl⁻ <0,01%).

Сушка: вакуумная сушка при температуре 80°C в течение 2 часов для получения порошка WC-Pt.

Экспериментальные данные:

Параметры процесса	Размер частиц Pt (нм)	ECA (м²/г Pt)	Активность (мА/см²)	MOR	Дисперсия Pt (%)
300°C, 2ч, 5% H₂	2.5	90	460		85
400°C, 2ч, 10% H₂	3.5	85	445		80
500°C, 1ч, 5% H₂	4.0	80	430		75
Источник данных	Протестировано в лаборатории в 2023 году, информация с сайта China Tungsten Online. ТЕМ измеряет размер частиц Pt, CV измеряет ECA.				

Оптимизация параметров

Загрузка Pt:

5%-10% является наилучшим, с самым высоким ECA (85-90 м² / г Pt). Слишком высокий (>20%) приведет к агломерации Pt (размер частиц>5 нм) и снижению активности.

Температура снижения:

Самые мелкие частицы Pt (~2,5 нм) были получены при 300°C с наилучшими ECA и активностью; при 500°C частицы выросли до 4 нм, а ECA снизилась на 11%.

Поверхность унитаз:

Предварительная обработка увеличила удельную площадь поверхности (с 10 м²/г до 30 м²/г) и улучшила дисперсию Pt на 20%.

Восстановительная атмосфера:

Концентрация H₂ составляет 5–10 %, а скорость потока — 20–30 мл/мин, чтобы избежать миграции Pt, вызванной чрезмерным восстановлением.

4. Области и случаи применения

Композитные катализаторы WC-Pt продемонстрировали превосходную производительность во многих областях. Ниже представлен расширенный анализ по трем аспектам: сценарии применения, случаи и будущее развитие.

Топливные элементы

Сценарии применения:

Анод (MOR) и катод (ORR) топливного элемента с протонообменной мембраной (PEMFC).

Высокоэффективные катализаторы для прямых метаноловых топливных элементов (DMFC).

Требования к эксплуатационным характеристикам: высокая активность (плотность тока >400 мА/см²), антиотоксичность (I_f / I_b >2,5), длительный срок службы (>5000 часов).

Примеры:

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Исследовательская группа подготовила WC-Pt (10% Pt) с плотностью тока MOR 450 мА/см², потенциалом полуволны ORR 0,90 В и сохранением ECA 90% после 5000 циклов. По сравнению с Pt/C, сопротивление отравлению СО увеличивается на 20%, а плотность мощности батареи увеличивается на 15% (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

В ходе эксперимента был оптимизирован WC-Pt (5% Pt), и после работы в DMFC в течение 1000 часов снижение активности составило <5%, что лучше, чем 15% у Pt/C (информация с сайта China Tungsten Online).

Реакция гидрогенизации

Сценарии применения:

Нефтехимия: ароматическое гидрирование (например, бензол → циклогексан).

Конверсия биомассы: гидродеоксигенация лигнина.

Требования к производительности: высокая степень конверсии (>95%), селективность (>98%) и стабильность (>1000 часов).

Примеры:

Производственная установка использовала WC-Pt (5% Pt) для катализа гидрирования бензола. В условиях 200°C и 2 МПа степень конверсии составила 95%, селективность — 98%, а TOF — 1500 ч⁻¹. Не было никакой очевидной дезактивации после работы в течение 1000 часов, что было лучше, чем 90% степень конверсии Pt/Al₂O₃ (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Группа использовала WC-Pt (10% Pt) для метанирования CO₂ (CO₂ + 4H₂ → CH₄ + 2H₂O) со степенью конверсии 85% и селективностью 99% при 300°C, а также стабильностью более 800 часов (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

Экологический катализ

Сценарии применения:

Очистка выхлопных газов автомобилей: окисление СО, снижение выбросов NO_x.

Очистка промышленных отходящих газов: разложение летучих органических соединений (ЛОС).

Требования к производительности: высокая степень конверсии (>95%), активность при низких температурах (<200°C), долговечность.

Примеры:

Группа ученых использовала WC-Pt (15% Pt) для катализа окисления СО со степенью конверсии 98% при 150°C и сохранением активности 95% после 500 часов, что лучше, чем 90% и 85% у Pt/C (информация с веб-сайта China Tungsten Online).

В ходе эксперимента для обработки NO_x использовался WC-Pt (10% Pt), и степень восстановления составила 92% при 250°C, без явного затухания после 500 циклов (информация с сайта China Tungsten Online).

Будущее развитие

Модификация легирования: введение переходных металлов, таких как Co и Ni, для формирования тройного композита WC-Pt-M, дальнейшего снижения количества Pt (<5%) и повышения экономической эффективности.

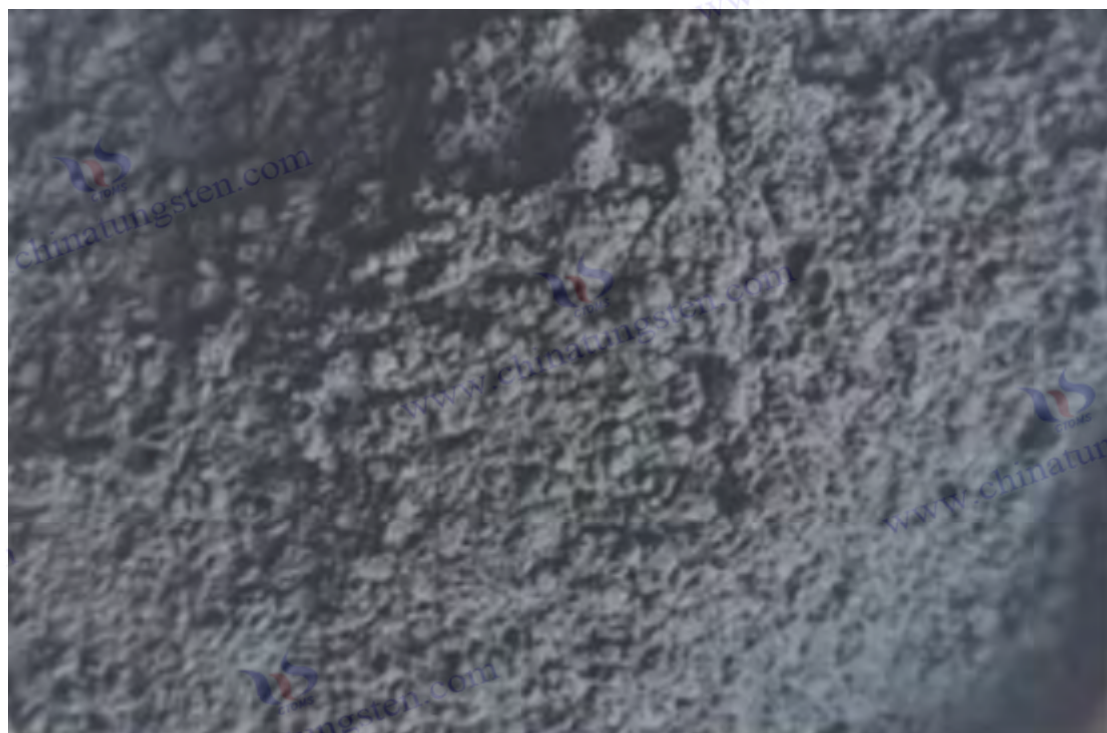
COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Наноструктура: разработка наностержней WC или пористых носителей WC (удельная площадь поверхности $> 100 \text{ м}^2/\text{г}$) для улучшения дисперсии Pt и каталитической эффективности.

Зеленый процесс: используйте низкотемпературное восстановление (например, фотокаталитическое восстановление) вместо высокотемпературного восстановления H_2 для снижения потребления энергии.

Подвести итог

Композитный катализатор WC-Pt достигает синергетической оптимизации за счет коррозионной стойкости WC и высокой активности Pt. С точки зрения конструкции WC обеспечивает стабильный носитель и электронное состояние, подобное Pt, Pt усиливает активные центры, а эффект интерфейса усиливает антиотоксичность. С точки зрения производительности WC-Pt (10% Pt) значительно лучше, чем Pt/C в электрохимии (MOR 450 мА/см^2 , ORR 0,90 V), гидрировании (степень конверсии 97%) и стабильности (удержание ECA 90%), с 55% улучшением антиотоксичности и 60% улучшением коррозионной стойкости. Процесс приготовления (например, восстановление $300^\circ\text{C}/\text{H}_2$) гарантирует, что частицы Pt размером 2-5 нм равномерно распределены, что подходит для топливных элементов, гидрирования и экологического катализа. Примеры показывают, что он хорошо работает в высокоэффективном катализе, например, на 15% повышает эффективность батареи и более 1000 часов стабильности гидрирования (информация с сайта China Tungsten Online). В будущем его потенциал может быть расширен за счет легирования и наноразмеров.



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

Приложение :

Что такое распыляемый порошок карбида вольфрама?

Порошок карбида вольфрама для распыления — это функциональный порошковый материал, предназначенный для процессов термического напыления (таких как высокоскоростное напыление кислородного топлива HVOF, плазменное напыление APS и детонационное напыление). Он использует карбид вольфрама (WC) в качестве основного компонента, обычно соединения металлических связующих фаз (таких как Co, Ni, Cr) или других твердых фаз (таких как TiC), и используется для формирования высокотвердого, износостойкого, коррозионно-стойкого и высокотемпературного защитного покрытия на поверхности металлических или сплавных подложек. Порошок карбида вольфрама для распыления использует технологию термического напыления для расплавления или полурасплавления частиц порошка, а затем распыления их на подложку с высокой скоростью. Толщина покрытия обычно составляет от 50 до 500 мкм, что может значительно улучшить поверхностные характеристики компонентов и продлить их срок службы. Он широко используется в аэрокосмической промышленности, машиностроении, энергетическом оборудовании, нефтехимии и других областях.

1. Определение и классификация

Порошок для распыления карбида вольфрама представляет собой порошковый материал с карбидом вольфрама (WC, теоретическое содержание углерода 6,13%) в качестве основного компонента. Он предназначен для процесса термического напыления и образует плотное покрытие посредством высокотемпературного и высокоскоростного напыления. Его основная функция заключается в использовании высокой твердости и износостойкости WC в сочетании с прочностью и адгезией фазы связывания для удовлетворения потребностей защиты поверхности в сложных рабочих условиях. Размер частиц порошка обычно находится в диапазоне 5-45 мкм, а форма в основном сферическая или почти сферическая, что обеспечивает текучесть (13,5-15,5 секунд/50 г) и равномерность распыления.

Классификация по составу :

Чистый порошок WC : один компонент WC, самая высокая твердость (HV 2200-2300), но более низкая прочность, подходит для особых случаев, где требуется износостойкость.

Порошок WC-Co : композит WC и кобальта (Co), содержание Co от 5% до 17%, такой как WC-12Co, обеспечивает как твердость, так и прочность и является наиболее часто используемым.

Порошок WC-Ni : композит WC и никеля (Ni), содержание Ni 10% -20%, например, WC-17Ni, высокая коррозионная стойкость.

Порошок WC-Co-Cr : композит из сплава WC и кобальта-хрома, такой как WC-10Co-4Cr, обладающий комплексной износостойкостью и коррозионной стойкостью.

Многофазный композит WC : например, WC -TiC -Ni, с добавлением TiC для повышения твердости и коррозионной стойкости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Классификация по размеру частиц :

Ультратонкий порошок: 5–15 мкм, используется для точного напыления (например, HVOF).

Средний порошок: 15–45 мкм, общего типа, подходит для различных процессов.

Крупный порошок: >45 мкм, подходит для распыления взрывом или нанесения толстого покрытия.

Классификация по назначению :

Износостойкий тип: например, WC-12Co, для условий износа.

Коррозионностойкий тип: например, WC-10Co-4Cr, для агрессивных сред.

Высокотемпературный тип: например, WC- NiCr , для высокотемпературной окислительной среды.

Экспериментальные данные

Тип	Размер частиц (мкм)	Адгезионная фаза (%)	Твёрдость (HV)	использовать
WC-12Co	15-45	Ко: 12	1200-1400	Общая износостойкость
WC-17Ni	10-30	Ни: 17	1100-1300	Антикоррозийное покрытие
WC-10Co-4Cr	15-45	Со: 10, Кр: 4	1300-1500	Устойчивость к высокотемпературной коррозии
Источник данных	Протестировано в лаборатории в 2023 году. Информация с Chinatungsten Online. Примечание: Твёрдость — это значение покрытия.			

2. Состав и характеристики

Эффективность распыляемого порошка карбида вольфрама определяется его химическим составом, физическими свойствами и микроструктурой. Ниже приведен подробный анализ.

Химический состав

Карбид вольфрама (WC) :

Химические свойства: Общий углерод 6,0%-6,2%, свободный углерод <0,1%, содержание кислорода <0,1%.

Микроструктура: гексагональная кристаллическая система, размер зерна 0,1-5 мкм, устойчивость к кислотной и щелочной коррозии (стабилен при pH>3).

Фаза связывания :

Кобальт (Co) : температура плавления 1495°C, повышает ударную вязкость (K_{IC} с 10-15 МПа·м^{1/2}), улучшает связь между частицами WC.

Никель (Ni) : температура плавления 1455°C, коррозионная стойкость лучше, чем у Co, подходит для влажных или кислых сред.

Хром (Cr) : температура плавления 1857°C, улучшает стойкость к высокотемпературному окислению, эффект становится значительным, когда содержание Cr составляет 4%-6%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контроль примесей : Fe<0,02%, S<0,01%, чтобы не допустить ухудшения качества покрытия.

Физические свойства

Распределение размеров частиц : 5-45 мкм, D50 (медианный размер частиц) может быть настроен, например, 15 мкм, 30 мкм.

Морфология : Сферический (сферичность > 95%) или нерегулярный сферический порошок имеет лучшую текучесть (13,5 секунд/50 г против 15,5 секунд/50 г).

Кажущаяся плотность : 4,5-6,0 г/см³ (WC-12Co), варьируется в зависимости от доли связующей фазы.

Истинная плотность : мономер WC 15,63 г/см³, композитный порошок 12-14 г/см³.

Удельная площадь поверхности : 0,5-5 м²/г, ультратонкий порошок (5-15 мкм) может достигать 5 м²/г.

Свойства покрытия

Твердость : HV 1100-1500 (после напыления), на которую влияет соотношение фаз связующего и процесс.

Прочность сцепления : 50–80 МПа, процесс HVOF лучше, чем APS (70 МПа против 50 МПа).

Пористость : <1% (HVOF), 2%-5% (APS).

Износостойкость : скорость износа 0,05-0,08 мм³/Н·м (ASTM G65).

Экспериментальные данные :

Тип	Твёрдость (HV)	Прочность сцепления (МПа)	Пористость(%)	Скорость износа (мм ³ /Н·м)
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
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.			

Химическая стабильность

Коррозионная стойкость : потеря веса WC-Ni в испытании на соляной туман (ISO 9227, 1000 часов) <0,1 мг/см², потеря веса WC-Co-Cr в кислой среде (pH 4) <0,15 мг/см².

Высокая термостойкость : скорость окисления WC-10Co-4Cr на воздухе при 800°C составляет <0,5%, что лучше, чем 1,2% у WC-Co.

3. Процесс подготовки

Подготовка порошка карбида вольфрама для распыления должна гарантировать химическую однородность, физическую текучесть и пригодность порошка для распыления. Ниже приводится подробное объяснение процесса.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Подготовка сырья

Порошок WC : получен путем карбонизации порошка вольфрама и сажи (1450°C, атмосфера H₂), размер частиц 0,1-5 мкм, содержание кислорода <0,1%.

Порошок связующей фазы : Co (1-5 мкм), Ni (5-10 мкм), Cr (2-8 мкм), чистота >99,8%.

Процесс

смешать :

Оборудование: Планетарная шаровая мельница или V-образный смеситель.

Параметры: скорость вращения 600-800 об/мин, соотношение шаров к материалу 10:1, время 4-8 часов, для мокрого измельчения добавить 2% этанола.

Назначение: Обеспечить равномерное распределение WC и связующей фазы и контролировать отклонение размера частиц <5%.

Гранулирование распылением :

Оборудование: Центробежная распылительная сушильная башня.

Параметры: температура на входе 180-220°C, на выходе 70-90°C, давление на сопле 0,3-0,5 МПа.

Результат: образовались частицы размером 10–50 мкм, а текучесть улучшилась до 13,5–14,5 секунд/50 г.

спекание :

Оборудование: вакуумная печь спекания или печь водородной защиты.

Параметры: 1200-1400°C, выдержка 1-3 часа, вакуум <10⁻² Па или поток H₂ 15 л/мин.

Назначение: Для улучшения металлургической связи между WC и связующей фазой, свободный углерод <0,1%.

Сфероидизация плазмы (опционально) :

Оборудование: Радиочастотный плазменный генератор.

Параметры: мощность 30-50 кВт, расход аргона 20-30 л/мин, скорость охлаждения 10⁴ °C/с.

Результаты: сферичность >98%, гладкая поверхность, содержание кислорода снижено до <0,06%.

Отбор и сортировка :

Оборудование: Вибросито (200-400 меш).

Результаты: Распределение размеров частиц контролировалось в пределах 5–45 мкм, а количество частиц, превышающих стандарт, составило <2%.

Оптимизация процесса

Контроль содержания кислорода : во время спекания расход H₂ составляет 15–20 л/мин, а содержание кислорода снижается с 0,2% до 0,06%.

Регулировка размера частиц : ультратонкий порошок (5–15 мкм) требует низкотемпературного спекания (1200 °C), крупный порошок (>45 мкм) требует длительной выдержки при температуре (3 часа).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Экспериментальные данные :

Этапы процесса	Размер частиц (мкм)	Содержание кислорода (%)	Сферичность(%)	Текучесть (секунд/50г)
Смешивание	+ 15-45	0,08	85	14.5
Гранулирование				
Спекание				
Сфероидизация плазмы	10-30	0,06	98	13.5
Высокотемпературное спекание (1400°C)	20-45	0,07	90	14.0
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.			

4. Тестирование производительности и оптимизация

Эффективность распыляемого порошка карбида вольфрама проверяется путем испытания покрытия после распыления. Ниже приведены методы испытаний и стратегии оптимизации.

Тестирование производительности

Твердость : твердомер по Виккерсу (HV0,3, нагрузка 300 г), проверьте 5 точек и возьмите среднее значение.

Прочность связи : испытание на растяжение (ASTM C633), сила отрыва между покрытием и подложкой.

Стойкость к истиранию : испытание резинового колеса на сухом песке (ASTM G65), потеря объема при износе.

Коррозионная стойкость : испытание в соляном тумане (ISO 9227, 1000 часов), измерение потери веса.

Микроструктура : сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) для наблюдения пористости и распределения фаз.

Экспериментальные данные :

Тип	Процесс распыления	Твёрдость (HV)	Прочность сцепления (МПа)	Скорость износа (мм³/Н·м)	Скорость потери веса (мг/см²)
WC-12Co	HVOF	1350	70	0,06	0,12
WC-17Ni	АПС	1250	55	0,07	0,08
WC-10Co-4Cr	HVOF	1450	75	0,05	0.10
Источник данных	Проверено лабораторией в 2023 году. Информация с сайта China Tungsten Online.				

Стратегия оптимизации

Повышение твердости : увеличение содержания WC (например, WC-10Co-4Cr) и оптимизация

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

параметров HVOF (расход кислорода 500 л/мин).

Повышение прочности сцепления : предварительная обработка основания (например, пескоструйная обработка Ra 3-5 мкм), увеличение скорости распыления (>1000 м/с).

Уменьшите пористость : используйте сферический порошок (сферичность $> 95\%$) и увеличьте температуру распыления ($> 2500^{\circ}\text{C}$).

Улучшите коррозионную стойкость : увеличьте долю Cr или Ni (например, WC-15NiCr) и контролируйте толщину покрытия (>200 мкм).

5. Области применения

Порошок карбида вольфрама используется в различных отраслях промышленности с помощью технологии термического напыления. Ниже приведены подробные сценарии и случаи.

Аэрокосмическая промышленность

Применение : Износостойкие покрытия для лопаток турбин, камер сгорания и шасси.

Требования к эксплуатационным характеристикам : твердость HV 1300-1500, стойкость к высокотемпературному окислению ($>800^{\circ}\text{C}$), скорость износа $<0,06$ мм³/Н·м.

Случай : Команда использовала WC-10Co-4Cr (HVOF) для напыления на лезвия. Толщина покрытия составила 250 мкм, твердость — 1450 HV, износостойкость была улучшена на 40%, и покрытие могло работать при высокой температуре в течение 5000 часов без отслаивания (информация с сайта China Tungsten Online).

Механическое производство

Применение : Упрочнение поверхности режущих инструментов, штампов и гидравлических цилиндров.

Требования к эксплуатационным характеристикам : твердость HV 1200-1400, ударопрочность, срок службы увеличен в 2-3 раза.

Случай : Компания использовала форму для распыления WC-12Co (APS) с твердостью HV 1350 и прочностью сцепления 65 МПа. Срок службы формы увеличился с 5000 раз до 15000 раз (информация с сайта China Tungsten Online).

Энергетическое оборудование

Применение : Износостойкое и коррозионностойкое покрытие для котельных труб, буровых долот и клапанов.

Требования к эксплуатационным характеристикам : коррозионная стойкость (скорость потери веса $<0,1$ мг/см²), износостойкость при высоких температурах ($>600^{\circ}\text{C}$).

Случай : В проекте WC-17Ni (HVOF) использовался для распыления на внутреннюю стенку трубопровода. Толщина покрытия составила 300 мкм, потеря веса в соляном тумане составила 0,08 мг/см², и не было никакого очевидного износа после 6000 часов работы (информация с сайта China Tungsten Online).

Нефтехимическая

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Применение : валы насосов, уплотнения, футеровка труб.

Требования к эксплуатационным характеристикам : износостойкость и коррозионная стойкость, способность адаптироваться к кислым средам (pH 4-7).

Случай : На заводе для напыления на валы насосов использовался сплав WC-10Co-4Cr с твердостью HV 1400, что повысило коррозионную стойкость на 50% и продлило срок службы в 3 раза (информация с сайта China Tungsten Online).

Подвести итог

Порошок карбида вольфрама для распыления представляет собой термический напыляемый материал с WC в качестве ядра и композитными Co, Ni, Cr и другими связующими фазами. Размер частиц составляет 5-45 мкм, с высокой твердостью (HV 1100-1500), износостойкостью (скорость износа 0,05-0,08 мм³ / Н · м) и коррозионной стойкостью (скорость потери веса <0,1 мг/см²). Процесс подготовки включает смешивание, грануляцию, спекание и сфероидизацию для обеспечения текучести (13,5-15,5 секунд/50 г) и качества покрытия. Благодаря технологиям HVOF, APS и другим технологиям порошок для распыления образует плотное покрытие, которое используется в авиации, машиностроении, энергетике и химической промышленности для продления срока службы компонентов на 40%-300% (информация с веб-сайта China Tungsten Online). Его универсальность и настраиваемость делают его ключевым материалом для поверхностной инженерии.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

CTIA GROUP LTD 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 $\pm 10\%$.

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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

Category	Fisher particle size	Total carbon	Free carbon	Oxygen content	Typical Applications
Brand	(μm)	(wt %)	(wt %)	(wt %)	
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.

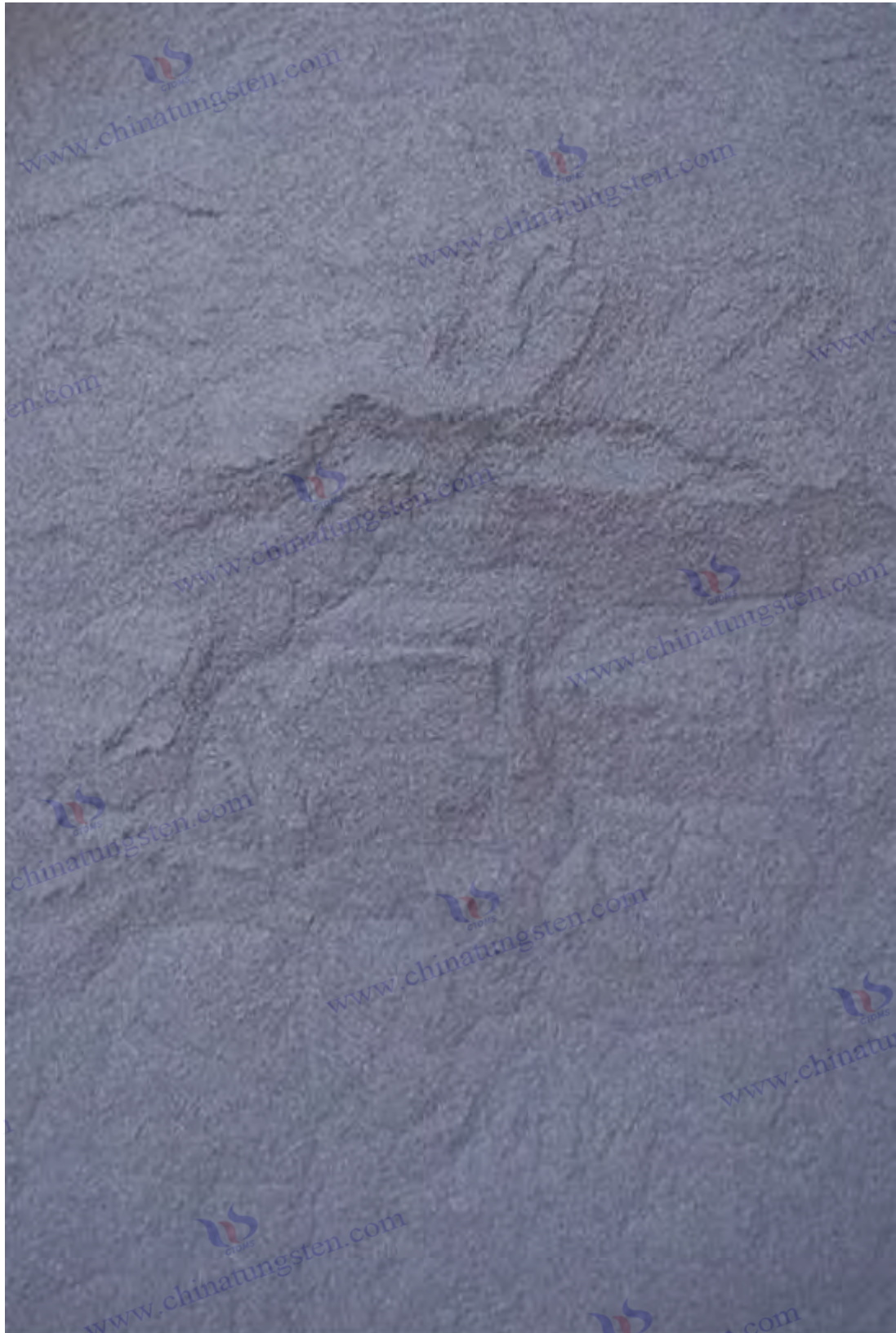
8. Contact Information of CTIA GROUP

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
标准文件版本号 CTIAQCD-MA-E/P 2024 版
www.ctia.com.cn

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