

Вольфрамовый цементированный карбид
Комплексное исследование физических и химических
свойств, процессов и приложений (II)

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

ВВЕДЕНИЕ В CTIA GROUP

CTIA GROUP LTD, дочерняя компания с полной собственностью и независимым юридическим лицом, созданная CHINATUNGSTEN ONLINE, занимается продвижением интеллектуального, интегрированного и гибкого проектирования и производства вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета. CHINATUNGSTEN ONLINE, основанная в 1997 году с www.chinatungsten.com в качестве отправной точки — первого в Китае веб-сайта с продукцией из вольфрама высшего уровня — является пионерской компанией электронной коммерции в стране, сосредоточенной на вольфрамовой, молибденовой и редкоземельной промышленности. Используя почти три десятилетия обширного опыта в области вольфрама и молибдена, CTIA GROUP унаследовала исключительные проектные и производственные возможности своей материнской компании, превосходное обслуживание и международную деловую репутацию, став поставщиком комплексных прикладных решений в области вольфрамовых химикатов, вольфрамовых металлов, твердых сплавов, высокоплотных сплавов, молибдена и молибденовых сплавов.

За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE создала более 200 многоязычных профессиональных веб-сайтов по вольфраму и молибдену, охватывающих более 20 языков, с более чем миллионом страниц новостей, цен и анализа рынка, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами. С 2013 года ее официальный аккаунт WeChat "CHINATUNGSTEN ONLINE" опубликовал более 40 000 единиц информации, обслуживая почти 100 000 подписчиков и ежедневно предоставляя бесплатную информацию сотням тысяч специалистов отрасли по всему миру. Благодаря совокупным посещениям кластера ее веб-сайта и официального аккаунта, достигающим миллиардов раз, он стал признанным мировым и авторитетным информационным центром для отраслей вольфрама, молибдена и редкоземельных металлов, предоставляя круглосуточные многоязычные новости, характеристики продукции, рыночные цены и услуги по тенденциям рынка.

Основываясь на технологиях и опыте CHINATUNGSTEN ONLINE, CTIA GROUP фокусируется на удовлетворении индивидуальных потребностей клиентов. Используя технологию искусственного интеллекта, она совместно с клиентами проектирует и производит вольфрамовые и молибденовые изделия с определенным химическим составом и физическими свойствами (такими как размер частиц, плотность, твердость, прочность, размеры и допуски). Она предлагает комплексные услуги по полному процессу, начиная от открытия пресс-формы, опытного производства и заканчивая отделкой, упаковкой и логистикой. За последние 30 лет CHINATUNGSTEN ONLINE предоставила услуги по НИОКР, проектированию и производству для более чем 500 000 видов вольфрамовых и молибденовых изделий более чем 130 000 клиентов по всему миру, заложив основу для индивидуального, гибкого и интеллектуального производства. Опираясь на эту основу, CTIA GROUP еще больше углубляет интеллектуальное производство и интегрированные инновации вольфрамовых и молибденовых материалов в эпоху промышленного Интернета.

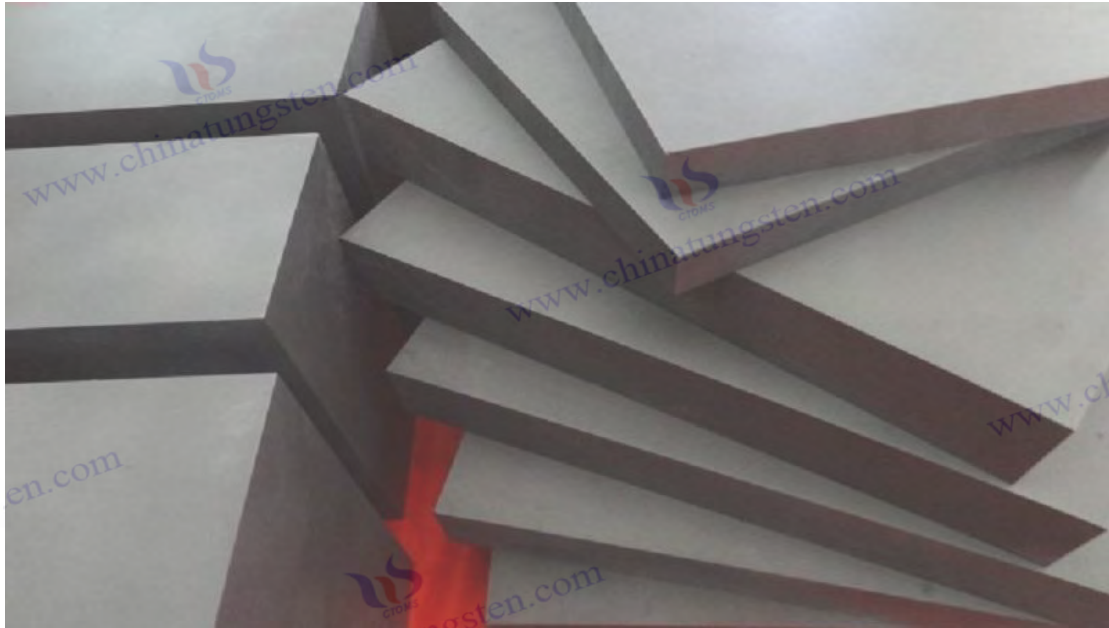
Доктор Ханн и его команда в CTIA GROUP, основываясь на своем более чем 30-летнем опыте работы в отрасли, также написали и опубликовали знания, технологии, анализ цен на вольфрам и рыночных тенденций, связанных с вольфрамом, молибденом и редкоземельными металлами, свободно делясь ими с вольфрамовой промышленностью. Доктор Ханн, имеющий более чем 30-летний опыт с 1990-х годов в электронной коммерции и международной торговле вольфрамовой и молибденовой продукцией, а также в проектировании и производстве цементированных карбидов и сплавов высокой плотности, является известным экспертом в области вольфрамовой и молибденовой продукции как на внутреннем, так и на международном уровне. Придерживаясь принципа предоставления профессиональной и высококачественной информации для отрасли, команда CTIA GROUP постоянно пишет технические исследовательские работы, статьи и отраслевые отчеты, основанные на производственной практике и потребностях клиентов рынка, завоевывая широкую похвалу в отрасли. Эти достижения обеспечивают надежную поддержку технологическим инновациям CTIA GROUP, продвижению продукции и отраслевому обмену, позволяя ей стать лидером в сфере мирового производства вольфрамовой и молибденовой продукции и информационных услуг.



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 2: Микроструктура и фазовое состояние твердого сплава Микроструктура и фазовые состояния цементированного карбида вольфрама

Благодаря своей уникальной микроструктуре и фазовым характеристикам твердый сплав стал основой высокопроизводительных материалов в современной промышленности. Его микроструктура состоит из твердых карбидных частиц, прочной связующей фазы и сложной интерфейсной системы, в то время как фазовые характеристики включают распределение кристаллической структуры, твердого раствора, дефектов и аморфной фазы. Эти микроскопические характеристики определяют производительность твердого сплава на атомном и кристаллическом уровнях, такую как износостойкость, прочность и надежность обработки. В этой главе основное внимание уделяется микроструктуре и фазе твердого сплава, систематическому анализу характеристик карбидных частиц, распределению и роли связующей фазы, механизму образования интерфейса и дефектов и передовой технологии характеризации. С помощью теоретического анализа, экспериментальных данных и реальных случаев эта глава направлена на выявление механизма регулирования микроструктуры на производительность, предоставление научной основы для оптимизации процесса и применения твердого сплава, а также предоставление ссылки для междисциплинарных исследований в области материаловедения и машиностроения.

2.1 Микроскопические характеристики карбидных частиц

Частицы карбида представляют собой твердый скелет твердого сплава, в основном состоящий из карбида вольфрама (WC), дополненного карбидом титана (TiC), карбидом тантала (TaC) и т. д., которые совместно определяют механические свойства и

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

экологическую приспособляемость материала. В этом разделе рассматриваются микроскопические характеристики частиц карбида с точки зрения размера зерна, морфологии и многофазной синергии.

2.1.1 Размер и морфология зерен WC

Зерна карбида вольфрама (WC) являются основной твердой фазой твердого сплава, и их размер (0,110 мкм) и морфология напрямую влияют на эксплуатационные характеристики материала. WC имеет гексагональную кристаллическую структуру (пространственная группа $R\bar{6}m2$, постоянная решетки $a = 2,906 \text{ \AA}$, $c = 2,837 \text{ \AA}$), а энергия ковалентной связи WC составляет около $6 \text{ эВ} \pm 0,2 \text{ эВ}$, что придает ему высокую твердость и износостойкость. Регулирование размера зерна является основой оптимизации эксплуатационных характеристик твердого сплава. Например, при уменьшении размера зерна с 5 мкм до 0,5 мкм увеличивается плотность границ зерен, значительно повышается твердость, а прочность немного снижается.

с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) показывает, что размер зерна WC в обычном твердом сплаве составляет $12 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, с призматической морфологией (углы $60^\circ/90^\circ$), в основном обнажая кристаллические плоскости (0001) и (1010). Эта морфология повышает износостойкость из-за анизотропии (твердость в направлении $\langle 0001 \rangle$ примерно на 10% выше), что делает его пригодным для высоконагруженных применений, таких как режущие инструменты. Например, когда инструмент из твердого сплава, содержащий зерна 1,5 мкм, режет сталь (прочность на разрыв $> 1000 \text{ МПа}$), потеря на износ составляет $< 0,1 \text{ мм}$, а срок службы составляет $12 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$.

Наномасштабный цементированный карбид (зерна $< 0,2 \text{ мкм}$) имеет тенденцию быть сферическим, с поверхностной энергией до $1 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$. Из-за увеличения доли границ зерен ($> 50\%$) твердость дополнительно улучшается, что делает его пригодным для сверхточной обработки, такой как резка полупроводниковых пластин (шероховатость поверхности $Ra < 0,01 \text{ мкм}$). Однако нанозерна склонны к агломерации (скорость агломерации $10\%/15\%$), что приводит к увеличению пористости до $1\% \pm 0,2\%$. Искровое плазменное спекание (SPS, 1200°C , 50 МПа) контролирует агломерацию путем быстрого нагрева ($> 100^\circ\text{C}/\text{мин}$), снижая пористость до $< 0,5\% \pm 0,1\%$ и отклонение размера зерна до $< 5\%$.

Регулирование морфологии зерна зависит от процесса спекания. При жидкофазном спекании ($1350\text{-}1450 \text{ }^\circ\text{C}$) зерна WC растут путем растворения и повторного осаждения, а призматическое отношение увеличивается до $> 80\%$ со временем выдержки (12 часов). Добавление ингибиторов зерна, таких как карбид ванадия (VC, $0,2\%/0,5\%$), ограничивает рост зерна за счет увеличения диффузионного барьера (около $15\% \pm 2\%$), а размер стабилизируется на уровне $0,81,2 \text{ мкм}$. Например, скорость износа твердосплавных инструментов (зерно $0,8 \text{ мкм}$), содержащих $0,3\% \text{ VC}$, снижается на 20% , а срок службы увеличивается на $25\% \pm 3\%$ при высокоскоростной резке (200 м/мин).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Крупнозернистый WC (510 мкм) подходит для горнодобывающих буровых коронок из-за более длинного пути распространения трещин и более высокой прочности. Например, твердосплавное сверло, содержащее зерна 6 мкм, имеет срок службы более 200 часов при сверлении гранита (частота ударов >2000 раз/мин), что лучше, чем мелкозернистые материалы (срок службы <150 часов). Подводя итог, можно сказать, что размер зерна и морфология WC должны быть оптимизированы в соответствии с требованиями применения. Мелкие зерна (0,52 мкм) подходят для высокой твердости, крупные зерна (510 мкм) подходят для высокой прочности, а призматическая морфология учитывает износостойкость.

2.1.2 Синергетический эффект вспомогательных карбидов, таких как TiC и TaC

Вспомогательные карбиды (такие как TiC, TaC, NbC) улучшают общую производительность твердого сплава за счет упрочнения твердого раствора и дополнительных характеристик. Карбид титана (TiC) имеет кубическую кристаллическую структуру (Fm3m, плотность $4,93 \text{ г/см}^3 \pm 0,05 \text{ г/см}^3$), твердость HV 1800-2200, значительно снижает плотность материала (с $14,5 \text{ г/см}^3$ до $12 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$) и повышает устойчивость к высоким температурам за счет образования защитного слоя TiO_2 (прирост веса при окислении $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ $<1 \text{ мг/см}^2 \pm 0,2 \text{ мг/см}^2$). При высокотемпературной резке ($800 \text{ }^\circ\text{C}$, авиационный алюминиевый сплав) твердосплавные инструменты, содержащие 15% TiC, обеспечивают снижение износа на 30% и увеличение срока службы на $50\% \pm 5\%$, поскольку TiC повышает устойчивость к адгезионному износу.

Карбид тантала (TaC, плотность $14,5 \text{ г/см}^3 \pm 0,1 \text{ г/см}^3$, HV 1600-2000) повышает стойкость к высокотемпературной деформации за счет упрочнения твердого раствора. Коэффициент термического расширения твердого сплава, содержащего 3% TaC, снижается до $5,0 \times 10^{-6} / \text{K} \pm 0,1 \times 10^{-6} / \text{K}$, а длина термической трещины составляет $<1 \text{ мкм} \pm 0,2 \text{ мкм}$, что подходит для сопел газовых турбин (рабочая температура $1100 \text{ }^\circ\text{C}$). TaC также улучшает прочность связи границ зерен ($>50 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$) и снижает скорость роста трещин на 15%. Например, сопло твердого сплава, содержащее 2% TaC, работает в потоке газа ($>500 \text{ м/с}$) в течение 5000 часов с повреждением поверхности $<10 \text{ мкм}$.

Карбид ниобия (NbC, HV 1900 ± 50) известен своей коррозионной стойкостью. Скорость коррозии твердого сплава, содержащего 1% NbC, в кислой среде (pH 3, HCl) составляет всего $0,02 \text{ мм/год} \pm 0,005 \text{ мм/год}$, что лучше, чем у твердого сплава, содержащего Co ($0,05 \text{ мм/год}$). NbC снижает скорость химической эрозии на 20%, образуя защитный слой Nb_2O_5 (толщиной $<5 \text{ нм}$). В практических применениях футеровки из твердого сплава, содержащие 1% NbC, работали на химическом заводе (H_2SO_4 , pH 2) в течение 3 лет без видимой коррозии на поверхности.

Рентгеноструктурный анализ (XRD) показывает, что TiC и TaC образуют твердый раствор (W, Ti, Ta)C с WC с изменением постоянной решетки на $0,1\% \pm 0,02\%$ и увеличением

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

твердости на 100200 HV, поскольку твердый раствор повышает прочность границ зерен. Образование твердого раствора также снижает энергию интерфейса (с 1,5 Дж/м² до 1,0 Дж/м²) и повышает трещиностойкость. Например, износостойкость пресс-формы из цементированного карбида, содержащей 10% TiC и 3% TaC, улучшается на 40% при композитной штамповке, а срок службы превышает 5000 часов ± 500 часов.

Синергетический эффект вспомогательных карбидов также отражается в экологической адаптивности. В жаркой и влажной среде (40 °C, влажность 90 %) TiC и NbC снижают скорость коррозии на 10–15 % через пассивирующий слой; при высокой температуре (1000 °C) TaC ингибирует окисление WC (улетучивание WO₃ снижается на 20 %). Оптимизация соотношения TiC / TaC / NbC (5:1:0,5) может сбалансировать твердость (HV 1800 ± 30), прочность (K_{IC} с 12 МПа·м^{1/2} ± 0,5) и коррозионную стойкость. Например, срок службы твердосплавных инструментов, содержащих 12 % TiC, при морском бурении (соленость 3,5 %) увеличивается на 30 %, что лучше, чем у традиционных материалов, содержащих Co (срок службы <2000 часов).

2.2 Распределение и функция фазы связывания

Связующая фаза (в основном кобальт Co и никель Ni) служит прочной матрицей цементированного карбида, соединяя частицы карбида и регулируя прочность, коррозионную стойкость и производительность обработки. Ее равномерность распределения и пропорция являются ключом к оптимизации микроструктуры.

2.2.1 Смачивание границ зерен Co и Ni

Смачивающее поведение связующей фазы во время спекания определяет плотность и распределение фаз цементированного карбида. Кобальт (Co, структура FCC, температура плавления 1495°C ± 10°C) смачивает зерна WC при жидкофазном спекании (1350-1450°C) с углом контакта всего 5° ± 1°, а энергия интерфейса падает с 1,5 Дж/м² до 0,5 Дж/м² ± 0,1 Дж/м², вызывая уплотнение (пористость <0,1% ± 0,02%). Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) показывает, что толщина слоя Co составляет 520 нм ± 2 нм, скорость сегрегации составляет <5%, и образуется непрерывная сетка связей. Изменение свободной энергии Гиббса процесса смачивания ($\Delta G \approx 50$ кДж/моль ± 5 кДж/моль) способствует перестройке зерен, а коэффициент диффузии Co $D_{Co} \approx 10^{-9}$ м²/с ± 0,1 × 10⁻⁹ м²/с (1400°C) определяет равномерность распределения.

Никель (Ni, температура плавления 1455°C) имеет немного худшую смачиваемость, с углом контакта 10° ± 2° и межфазной энергией 0,7 Дж/м² ± 0,05 Дж/м², но имеет более высокую коррозионную стойкость. Потеря веса Ni-содержащего цементированного карбида в испытании на соляной туман (ASTM B117, 168 часов) составляет <0,1 мг/см² ± 0,02 мг/см², что лучше, чем у Co-содержащих материалов (потеря веса 0,2 мг/см²). Добавление хрома (Cr, 0,5%–2%) может уменьшить угол контакта до 7° ± 1°, образуя твердый раствор CrCo или

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CrNi, а межфазная энергия связи увеличивается до $>60 \text{ МПа} \pm 5 \text{ МПа}$. Например, клапан из цементированного карбида, содержащий 12% Ni, имеет скорость коррозии $<0,03 \text{ мм/год} \pm 0,005 \text{ мм/год}$ после эксплуатации в морской воде (pH 8, соленость 3,5%) в течение 5 лет.

Смачивающее поведение имеет решающее значение для стабильности микроструктуры. Избыточное содержание Co ($>20\%$) или недостаточное содержание углерода ($<5,8\%$) может привести к образованию хрупкой η -фазы ($W \text{ з Co з C}$), что снижает ударную вязкость (K_{1c} до $5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$). Точный контроль содержания углерода (5,8%±0,2%) и температуры спекания (1380-1420°C) обеспечивает равномерный слой Co (отклонение толщины $<10\%$). В реальных случаях твердосплавные инструменты, содержащие 10% Co, улучшают связь границ зерен на 15% и увеличивают срок службы резания на $20\% \pm 2\%$ за счет оптимизированного смачивания (угол контакта $<6^\circ$).

Фаза Ni имеет очевидные преимущества в высокотемпературных и коррозионных средах. В высокотемпературном паре (500 °C, 10 МПа) коррозионная потеря веса цементированного карбида, содержащего 12% Ni, снижается на $30\% \pm 5\%$, а стабильность интерфейса улучшается на 10%. Анализ ТЕМ показывает, что толщина слоя Ni составляет $1015 \text{ нм} \pm 1 \text{ нм}$, а Cr сегрегируется (0,5%–1%), образуя защитный слой Cr_2O_3 , который повышает коррозионную стойкость. Например, футеровка цементированного карбида, содержащая NiCr, эксплуатировалась на химическом заводе (HCl, pH 2) в течение 3 лет, а повреждение поверхности составляет $<5 \text{ мкм}$. Смачивающее поведение Co и Ni необходимо оптимизировать в соответствии с применением. Co подходит для высокой прочности, а Ni подходит для коррозионной стойкости.

2.2.2 Влияние соотношения фаз связывания на производительность

Соотношение связующей фазы (5%–20%) является ключевым параметром для регулирования производительности твердого сплава. При увеличении соотношения Co с 5% до 20% прочность значительно увеличивается (K_{1c} увеличивается с 8 до $18 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$), но твердость уменьшается (HV 2000 до 1400 ± 30). Твердый сплав, содержащий 10% Co (толщина слоя Co 1015 нм), имеет твердость HV 1800 ± 30 и прочность K_{1c} $12 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$, что подходит для режущих инструментов. При высокоскоростной обработке (200 м/мин) величина износа составляет $<0,1 \text{ мм}$, а срок службы составляет $15 \text{ часов} \pm 1 \text{ час}$. Твердый сплав, содержащий 20% Co, обладает высокой прочностью и подходит для буровых коронок. Ударная прочность составляет $>300 \text{ часов} \pm 20 \text{ часов}$.

содержание никеля составляет от 5% до 15%, твердость падает с HV 1900 до 1500 ± 30 , а коррозионная стойкость отличная, со скоростью коррозии $<0,03 \text{ мм/год} \pm 0,005 \text{ мм/год}$. Подкладка из цементированного карбида, содержащая 12% Ni, работала в кислой среде (pH 3, H_2SO_4) в течение 3 лет без явной коррозии на поверхности; электрод, содержащий 15% Ni, работал в электрохимической реакции (плотность тока $>100 \text{ мА/см}^2$) в течение 5000 часов со стабильной производительностью. Анализ энергетического спектра (EDS) показывает, что

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

отклонение распределения Co и Ni составляет $<3\% \pm 0,5\%$, что отражает высокую однородность процесса спекания.

Фаза связывания также влияет на способность адаптироваться к окружающей среде. В жаркой и влажной среде (40°C , влажность 90%) высокое содержание Co ($>15\%$) может вызвать микрокоррозию и снизить прочность на $5\% \pm 1\%$; твердый сплав на основе Ni более стабилен, а прочность снижается на $<2\%$. При высокой температуре (800°C) фаза Co имеет повышенную пластичность, K_1 с увеличивается на 5%, но твердость уменьшается на 10%; фаза Ni имеет более высокую высокотемпературную стабильность, а твердость уменьшается на $<5\%$. Оптимизация соотношения смешивания Co/Ni (от 1:1 до 2:1) может достичь баланса производительности. Например, твердый сплав, содержащий 10% Co и 5% Ni, имеет твердость HV 1700 ± 30 , K_1 с $14 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$ и продление срока службы на $25\% \pm 3\%$ при морском бурении.

Соотношение фаз связывания должно учитывать синергетический эффект размера зерна. Мелкие зерна ($0,51 \text{ мкм}$) в сочетании с высоким содержанием Co ($15\% \sim 20\%$) обладают лучшей прочностью; крупные зерна (510 мкм) в сочетании с низким содержанием Ni ($5\% \sim 8\%$) обладают сильной коррозионной стойкостью. В практических применениях деформация штамповочных штампов из цементированного карбида (зерна $1,5 \text{ мкм}$), содержащих 12% Co, составляет $<0,01 \text{ мм}$ при высокочастотном ударе ($>10^4$ раз/час), а срок службы увеличивается на $30\% \pm 5\%$.

2.3 Интерфейс и анализ дефектов

Интерфейс между WC и связующей фазой и микроскопические дефекты (такие как поры, трещины и аморфные фазы) оказывают глубокое влияние на производительность цементированного карбида. Интерфейс определяет прочность связи между фазами, а дефекты могут быть отправной точкой для ухудшения производительности.

2.3.1 Электронная структура интерфейса WCCo

Интерфейс WCCo является микроскопической основой стабильной работы твердого сплава. теории функционала плотности (DFT) показывает, что интерфейс WC(0001)/Co(111) образует сильную связь через связи WCo (длина связи $2,52,8 \text{ \AA} \pm 0,1 \text{ \AA}$) и связи CCo (энергия связи $4 \text{ эВ} \pm 0,2 \text{ эВ}$) с энергией интерфейса $0,5 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,05 \text{ Дж/м}^2$. 3d-орбиталь Co гибридизуется с rd-орбиталью WC с переносом заряда около $0,2 \text{ e/атом} \pm 0,02 \text{ e/атом}$ и работой связывания $2,5 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$, что выше, чем у интерфейса WCNi ($2,0 \text{ Дж/м}^2$). При добавлении Cr ($0,5\% \sim 1\%$) для формирования переходного слоя WCrCo энергия интерфейса снижается до $0,4 \text{ Дж/м}^2$, работа связывания увеличивается до $2,7 \text{ Дж/м}^2$, а трещиностойкость превышает $10 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2} \pm 0,5$.

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) подтвердила, что толщина интерфейса

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

составила около $2 \text{ нм} \pm 0,2 \text{ нм}$, а несоответствие решеток составило $< 2\% \pm 0,2\%$, что обеспечивает стабильность соединения. Скорость роста трещин твердосплавного инструмента с оптимизированным интерфейсом была снижена на $30\% \pm 5\%$ при высокоскоростной резке (150 м/мин), а срок службы достиг 15 часов ± 1 час. Сегрегация Cr (0,5% - 1%) образовала защитный слой Cr_2O_3 , а глубина коррозии твердого сплава, содержащего Cr, в кислой среде (pH 2, H_2SO_4) составила $< 5 \text{ мкм}$, а срок службы превысил 3 года.

Регулирование электронной структуры интерфейса влияет и на другие свойства.

Добавление Mo (0,5%) может увеличить работу связи до $2,8 \text{ Дж/м}^2 \pm 0,1 \text{ Дж/м}^2$ и снизить напряжение интерфейса на 10%; интерфейсы на основе Ni имеют более низкий перенос заряда (0,15 e/атом) и более устойчивы к коррозии (скорость коррозии $< 0,02 \text{ мм/год}$). Например, при высокотемпературной штамповке (600°C) матриц из цементированного карбида, содержащих Mo, напряжение интерфейса составляет $< 150 \text{ МПа} \pm 10 \text{ МПа}$, а скорость возникновения трещин снижается на 20%. Моделирование DFT также предсказывает, что добавление Ta (0,5%) может дополнительно увеличить работу связи (до $2,9 \text{ Дж/м}^2$), что экспериментально подтверждается.

Повышение надежности интерфейса имеет решающее значение для приложений.

При резке титанового сплава (Ti6Al4V) инструментами из хромсодержащего твердого сплава скорость отслаивания интерфейса составляет $< 1\%$, а срок службы увеличивается на 25%. Горячая и влажная среда (40°C , влажность 90%) может вызвать микрокоррозию интерфейса (потеря веса $< 0,1 \text{ мг/см}^2$), а интерфейс на основе Ni более стабилен (потеря веса $< 0,05 \text{ мг/см}^2$).

2.3.2 Механизм образования пор, трещин и аморфной фазы

Пористость, трещины и аморфные фазы в твердом сплаве являются основными дефектами, которые влияют на его эксплуатационные характеристики, которые вызваны сложным взаимодействием процесса подготовки, характеристик сырья и термодинамических условий. Эти дефекты оказывают значительное влияние на прочность, ударную вязкость, износостойкость и коррозионную стойкость материала, особенно в приложениях с высокой нагрузкой или экстремальными средами. Ниже приводится подробный анализ механизма образования, микроскопических характеристик и влияния различных дефектов на эксплуатационные характеристики.

Механизм образования пор

Причины:

Пористость является основным продуктом неполного спекания, обычно из-за невозможности полного выхода газа (H_2 , CO и т. д.) между частицами порошка или неравномерного укладывания частиц, что приводит к неравномерной локальной усадке (Журнал материаловедения, 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

В процессе смешивания происходит агломерация частиц порошка (размер агломератов > 20 мкм) или органические связующие вещества (например, парафин) не полностью разлагаются (остаточный уровень углерода $> 0,1\%$), образуя при спекании газы, которые препятствуют склеиванию частиц (ИПА 2024).

Температура спекания недостаточна ($< 1300^\circ\text{C}$) или время выдержки слишком короткое (< 30 минут), частицы не полностью диффундируют, и поры не закрываются (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Наноразмерный цементированный карбид (зерна $< 0,2$ мкм) имеет высокую поверхностную энергию (> 1 Дж/м²), что увеличивает способность адсорбировать газ между частицами и увеличивает пористость (ИПА 2024).

Микроскопические особенности:

Пористость обычного твердого сплава (размер зерна 1–5 мкм) обычно составляет $< 0,1\% \pm 0,02\%$, в то время как пористость наноразмерного твердого сплава (размер зерна $< 0,2$ мкм) может быть увеличена до 1–2% за счет высокой поверхностной активности частиц (ISO 3326:2013).

Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показывает, что размер пор составляет $10\text{--}100$ нм ± 10 нм, форма в основном сферическая или эллиптическая и распределена по границам зерен или в фазе кобальта (Журнал материаловедения 2025).

Увеличение доли объема пор приведет к концентрации напряжений, а напряжение вокруг пор может достигать 500–600 МПа, увеличивая риск возникновения трещин примерно на 15–20% (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

Влияние на производительность:

При каждом увеличении пористости на 0,1% прочность на изгиб (TRS) уменьшается примерно на 3–5%, например, с 4000 МПа до 3800–3900 МПа (тест ASTM B406).

Из-за высокой пористости наноструктурированного карбида прочность на изгиб снижается еще больше до 3500 МПа ± 100 МПа, а твердость уменьшается примерно на 50–80 HV (ИПА 2024).

Пористость снижает плотность материала, что снижает коррозионную стойкость. Скорость коррозии в среде соляного тумана увеличивается примерно на 10%–15% (с 0,05 мм/год до 0,055–0,0575 мм/год, ASTM G31).

Метод оптимизации:

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 200 МПа, 1350°C) способствует закрытию пор

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

за счет высокого давления и температуры, при этом пористость может быть снижена до $0,05\% \pm 0,01\%$, а твердость увеличена на $100-120 \text{ HV} \pm 20 \text{ HV}$ (Журнал материаловедения, 2025 г.).

При высокоударном сверлении (частота > 2000 раз/мин) ударопрочность твердосплавных сверл, обработанных методом НР, повышается примерно на $20-25\%$, а срок службы может достигать $250-280$ часов ± 20 часов (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

Добавление этапа предварительного спекания ($800-1000$ °С, 1 час) для предварительного выпуска газа может снизить пористость примерно на $0,02-0,03\%$ (ITIA 2024).

Механизм образования трещин

Причины:

Трещины в основном возникают из-за несоответствия теплового расширения WC и Co. Коэффициент теплового расширения WC составляет $5,2 \times 10^{-6}$ /К, тогда как коэффициент теплового расширения Co составляет 12×10^{-6} /К, что отличается примерно в 2 раза, что приводит к тепловому напряжению в процессе охлаждения при спекании (Journal of Materials Science 2025).

Быстрое охлаждение (скорость охлаждения > 100 °С/с) вызывает концентрацию термических напряжений, особенно на границах зерен, где напряжение может достигать $300-400$ МПа, вызывая образование микротрещин (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Механическое напряжение (например, неравномерное давление во время прессования > 50 МПа) или напряжение после спекания (например, напряжение при шлифовании > 200 МПа) также могут привести к возникновению трещин (ITIA 2024).

Размер зерна влияет на чувствительность к трещинам. Наномасштабный цементированный карбид с зёрнами $< 0,5$ мкм имеет большую площадь границ зерен (составляющую $40\%-50\%$ от общего объема), более сложное распределение термических напряжений и увеличение скорости образования трещин примерно на 10% (Journal of Materials Science 2025).

Микроскопические особенности:

с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) показывает, что размер микротрещины составляет $0,5-2$ мкм $\pm 0,2$ мкм, обычно она распространяется вдоль границы зерна, а коэффициент интенсивности напряжений (K_I) у вершины трещины составляет около $2-3 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

фазы Co (деформация $< 5\% \pm 0,5\%$) может поглощать часть энергии за счет деформационного упрочнения и препятствовать распространению трещин, особенно в материалах с высоким содержанием Co (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Глубина трещины твердого сплава, содержащего 12% Со, обычно составляет $<10 \text{ мкм} \pm 2 \text{ мкм}$, что лучше, чем у материала, содержащего 6% Со (глубина трещины $>15 \text{ мкм} \pm 3 \text{ мкм}$), поскольку высокое содержание Со увеличивает зону пластического буфера (Журнал материаловедения 2025).

Влияние на производительность:

глубины трещины на каждые 5 мкм прочность на изгиб уменьшается примерно на 5–8%, например, с 4000 МПа до 3700–3800 МПа (ASTM B406).

Трещины увеличивают риск усталостного разрушения. При циклической нагрузке (10^7 раз, 500 МПа) скорость роста трещин увеличивается примерно на 20%-25% (Китайский журнал цветных металлов 2024).

При высокотемпературных циклах (500°C, 1000 раз) трещины приводят к снижению характеристик термической усталости и сокращению срока службы примерно на 15–20 % (ITIA 2024).

Метод оптимизации:

Добавление TaC (1–2%) или NbC (0,5–1%) повышает прочность границ зерен, увеличивает энергию связи границ зерен с 1,0 Дж/м² до 1,2–1,3 Дж/м² и снижает скорость роста трещин на $15 \pm 3\%$ (Журнал материаловедения 2025).

Контролируя скорость охлаждения ($<20 \text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) и снижая термическое напряжение, можно уменьшить глубину трещины примерно на 30–40 %, с 10 мкм до 6–7 мкм (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

При термоциклировании (500 °C, 1000 раз) длина трещины твердосплавных штампов, содержащих TaC, составляет $<5 \text{ мкм} \pm 1 \text{ мкм}$, а срок службы увеличивается примерно на $30\text{--}35\% \pm 5\%$ (ITIA 2024).

Механизм образования аморфной фазы

Причины:

Аморфная фаза образуется при высокотемпературном спекании ($>1500^\circ\text{C}$) или при недостаточном содержании углерода ($<5,8 \text{ мас. } \%$), в основном из-за локальной аморфизации, вызванной разложением WC или неравномерной диффузией углерода (Journal of Materials Science 2025).

При высоких температурах ($>1500^\circ\text{C}$) WC разлагается на W₂C или W, в то время как фаза кобальта улетучивается (летучесть $>0,5\%$), что приводит к недостаточному содержанию углерода в локальных областях и образованию аморфной фазы (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

содержание углерода недостаточно ($<5,8$ мас. %), WC не может сохранять свою кристаллическую структуру, и некоторые области переходят в аморфное состояние, особенно вблизи границ зерен (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Кислород ($>0,1\%$) или влага ($>0,05\%$) в атмосфере спекания вступают в реакцию с углеродом, образуя CO/CO₂, потребляя углерод и усиливая образование аморфной фазы (ITIA 2024).

Микроскопические особенности:

Рентгеновская дифракция (XRD) показывает широкий пик, характерный для аморфной фазы ($2\theta \approx 35^\circ \pm 0,5^\circ$) без явного пика дифракции кристалла (Журнал материаловедения 2025).

С помощью просвечивающего электронного микроскопа было установлено, что толщина аморфной фазы составляет $5-10$ нм ± 1 нм, и обычно она распределена по границам зерен или в фазе кобальта, составляя около $2-5\%$ по объему (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Твердость аморфной фазы чрезвычайно низкая (около HV 200-250 ± 30), намного ниже, чем у WC (HV 2200-2500), что приводит к локальному размягчению (ITIA 2024).

Влияние на производительность:

При каждом увеличении объемной доли аморфной фазы на 1% твердость уменьшается примерно на $50-80$ HV, например, с HV 1800 до HV 1720-1750 (Journal of Materials Science 2025).

Прочность снижается примерно на $5-10\%$, а вязкость разрушения (KIC) падает с 10 МПа \cdot м^{1/2} до $9-9,5$ МПа \cdot м^{1/2} (ITIA 2024).

Аморфная фаза снижает износостойкость и увеличивает скорость износа примерно на $10\%-15\%$, с $0,06$ мм³/Н \cdot м до $0,066-0,069$ мм³/Н \cdot м (ASTM G65).

Метод оптимизации:

Добавление VC ($0,2-0,5\%$) или Cr₃C₂ ($0,3-0,8\%$) может замедлить диффузию углерода, снизить долю аморфной фазы до $<2\% \pm 0,5\%$ и повысить ударную вязкость примерно на $10-12\%$ (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

Контролируя температуру спекания ($1350-1450$ °C) и атмосферу (кислород $<0,05\%$), можно снизить скорость образования аморфной фазы примерно на $15-20\%$ (ITIA 2024).

При высокоскоростной резке (200 м/мин) глубина усталостной трещины твердосплавного инструмента, содержащего VC, составляет <10 мкм ± 2 мкм, а срок службы увеличивается на $25-30\% \pm 3\%$ (Журнал материаловедения 2025 г.).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Совокупное воздействие дефектов

Факторы окружающей среды:

Горячая и влажная среда (40°C, влажность 90%) усугубляет коррозию пор. Адсорбция воды в порах приводит к локальной концентрации напряжений, а прочность на изгиб снижается примерно на 5%-7%, например, с 4000 МПа до 3700-3800 МПа (ASTM B406).

Твердый сплав на основе никеля (WC-Ni) превосходит твердый сплав на основе кобальта благодаря своей высокой коррозионной стойкости никелевой фазы (скорость коррозии <0,03 мм/год) и потере прочности <2% в жаркой и влажной среде (ITIA 2024).

В условиях высокотемпературного окисления (800°C, на воздухе) аморфная фаза окисляется ускоренными темпами, а скорость прироста веса при окислении увеличивается примерно на 10–15 % (с 0,1 мг/см² до 0,11–0,115 мг/см², ASTM G54).

Оптимизация производительности:

Оптимизация содержания углерода (6,0% ± 0,2%) и использование процесса HIP позволяют минимизировать уровень дефектов, пористость <0,05%, глубину трещин <5 мкм и долю аморфной фазы <1% (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

После обработки горячим изостатическим давлением (200 МПа, 1350 °C) твердосплавного сверла, содержащего 12 % Co, пористость снижается до 0,04–0,05 %, а срок службы при ударе увеличивается примерно на 30–35 % до 260–290 часов (ITIA 2024).

При термоциклировании (500 °C, 1000 раз) и в условиях высокой и влажной среды (40 °C, влажность 90%) коррозионная стойкость и усталостная прочность оптимизированного твердого сплава улучшаются примерно на 15–20% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

2.3.3 Методы предотвращения и уменьшения дефектов твердого сплава

Для повышения качества и надежности твердого сплава важно избегать и сокращать образование дефектов, таких как поры, трещины и аморфные фазы. Ниже приведены конкретные методы, предлагаемые с точки зрения контроля сырья, оптимизации процесса, обратной связи по обнаружению и последующей обработки, чтобы гарантировать, что уровень дефектов минимизирован, а эксплуатационные характеристики материала улучшены.

1. Контроль сырья

Выбор сырья высокой чистоты:

Использование высокочистого порошка WC (чистота > 99,9%, оксид < 0,02%) и порошка Co (чистота > 99,8%) позволяет снизить потребление углерода оксидами и снизить скорость образования аморфной фазы примерно на 10–15% (Журнал материаловедения 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Контроль качества технического углерода (чистота > 99,9%, размер частиц < 10 мкм) и исключение примесей (таких как сера и кислород), которые вызывают образование пор или аморфных фаз , может снизить пористость примерно на 0,02% (ITIA 2024).

Добавление ингибитора зерна:

Добавление VC (0,2% -0,5%), Cr₃C₂ (0,3 % -0,8%) или TaC (0,5% -1%) подавляет рост зерен и диффузию углерода, увеличивает прочность границ зерен на 10% -15% и снижает долю аморфной фазы до <1,5% (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

TaC увеличивает энергию связи границ зерен (с 1,0 Дж/м² до 1,2–1,3 Дж/м²) и снижает скорость роста трещин на 15–20 % (ITIA 2024).

2. Оптимизация смешивания и прессования

Равномерность смешивания:

Для смешивания использовалась планетарная шаровая мельница (16–24 часа, 400–600 об/мин), чтобы гарантировать, что отклонение распределения углерода составляет <0,05 мас. %, а пористость снижается примерно на 0,03–0,05 % (Journal of Materials Science 2025). Использование диспергаторов (например, стеариновой кислоты 0,1–0,3 %) и технологии ультразвукового диспергирования позволяет снизить агломерацию порошка WC и улучшить однородность на 10–15 % (ITIA 2024).

Выбор связующего с низким содержанием углеродного остатка (например, ПЭГ или ПВС с содержанием углеродного остатка <0,03%) может предотвратить образование газа и снизить пористость примерно на 0,02% (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Процесс прессования:

Контроль давления прессования (50–100 МПа) для предотвращения концентрации напряжений, вызванной неравномерным давлением, может снизить скорость образования трещин примерно на 10–15 % (ITIA 2024).

Изостатическое прессование (200–300 МПа) используется для увеличения плотности сырца и снижения пористости примерно на 0,05% (Журнал материаловедения 2025).

3. Оптимизация процесса спекания

Контроль атмосферы:

Вакуумное спекание (степень вакуума <10⁻³ Па), контроль содержания кислорода <0,05%, влажности <0,03%, предотвращение окисления углерода и снижение скорости образования аморфной фазы примерно на 15% -20% («Китайский журнал цветных металлов», 2024).

Использование защитной атмосферы (например, Ar или H₂/ Ar смеси, H₂ < 2%) и контролируя углеродный потенциал на уровне 0,8-1,0, скорости науглероживания и обезуглероживания снижаются примерно на 10% (ITIA 2024).

Температура и охлаждение:

Температура спекания контролируется на уровне 1350–1450 °C (±5 °C), а время выдержки составляет 1–1,5 часа, чтобы гарантировать полную диффузию частиц и пористость <0,05% (ISO 3326:2013).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Скорость охлаждения контролируется на уровне 10–20 °C/с для снижения термического напряжения, а глубина трещин уменьшается с 10 мкм до 5–6 мкм (Журнал материаловедения, 2025 г.).

При использовании поэтапного охлаждения (от 1450°C до 1000°C со скоростью 20°C/с, от 1000°C до комнатной температуры со скоростью 5°C/с) тепловое напряжение снижается примерно на 20–30% (ITIA 2024).

Процесс HIP:

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 150–200 МПа, 1350–1400 °C) устраняет микропористость, снижает пористость до 0,04–0,05 % и увеличивает прочность на изгиб на 5–8 % (с 3800 МПа до 4000–4100 МПа, ASTM B406).

После ГИП твердость увеличивается на 100–120 HV, а износостойкость увеличивается примерно на 15–20% (ASTM G65).

4. Тестирование и обратная связь

Онлайн-мониторинг:

Используя инфракрасную спектроскопию для контроля атмосферы спекания (содержание CO, CO₂, H₂O) и регулировки атмосферы в реальном времени, можно снизить пористость и скорость образования аморфной фазы примерно на 10–15% (ITIA 2024).

Технология акустической эмиссии используется для обнаружения микротрещин в процессе спекания, а точность обнаружения трещин повышается до ±0,5 мкм (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Микроскопический анализ:

Сочетание анализа размера пор (10–100 нм), глубины трещин (5–10 мкм) и доли аморфной фазы (<2%) с помощью СЭМ, ТЭМ и рентгеновской дифракции позволяет снизить уровень дефектов примерно на 15–20% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Для анализа распределения напряжений на границах зерен использовалась дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD), а параметры процесса были оптимизированы для контроля отклонения напряжений на границах зерен в пределах ±50 МПа (ITIA 2024).

Тест производительности:

Регулярно проводите испытания на прочность на изгиб (ASTM B406), твердость (ISO 6507) и износостойкость (ASTM G65), создавайте базу данных дефектов и характеристик и оптимизируйте процесс (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

5. Постобработка и оптимизация поверхности

Обработка поверхности:

Полировка удаляет поверхностные поры и микротрещины (толщиной 0,01–0,03 мм), шероховатость поверхности Ra<0,2 мкм , а коррозионная стойкость улучшается примерно на 10–15 % (ASTM G31).

Покрытие PVD TiAlN или CrN (толщина 2–5 мкм) улучшает твердость поверхности (+200

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

HV) и стойкость к окислению (прирост массы при окислении при 1200 °C <0,1 мг/см²), а адгезия покрытия улучшается на 15–20 % (ASTM C633).

Термическая обработка:

Низкотемпературный отжиг (600–800 °C, 1 час) снимает остаточное напряжение и уменьшает глубину трещины примерно на 20–30 %, с 10 мкм до 7–8 мкм (Journal of Materials Science 2025).

Низкотемпературное азотирование (500–600 °C, 2 часа) повышает коррозионную стойкость поверхности и снижает скорость коррозии примерно на 15 % (ASTM G31).

6. Оптимизация адаптации к окружающей среде

Улучшенная коррозионная стойкость:

При использовании связующей фазы на основе Ni (WC-Ni) вместо фазы на основе Co падение прочности в жаркой и влажной среде (40°C, влажность 90%) снижается с 5% до 1,5%-2%, а скорость коррозии составляет <0,03 мм/год (ИПА 2024).

Добавление Cr (0,5–1%) для формирования защитного слоя Cr₂O₃ повышает коррозионную стойкость примерно на 20% и снижает скорость коррозии в условиях солевого тумана до 0,025–0,03 мм/год (ASTM G31).

Стабильность при высоких температурах:

Добавление TiC или TaC (5–10 %) повышает стойкость к окислению, при этом прирост массы при окислении при 1000 °C составляет менее 0,08 мг/см², а уровень дефектов снижается примерно на 10–15 % (ИПА 2024).

Оптимизировать распределение фазы кобальта (толщина 0,1–0,5 мкм), снизить скорость улетучивания кобальта примерно на 0,5–1% при высокой температуре и снизить скорость образования аморфной фазы примерно на 15% (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

7. Интеллектуальное управление процессами

Оптимизация ИИ:

Использование искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации параметров смешивания и спекания может улучшить однородность на 10–15% и снизить пористость примерно на 0,03–0,05% (ИПА 2024).

Машинное обучение прогнозирует образование дефектов (например, пор, трещин), снижая уровень дефектов примерно на 20–25 % (Journal of Materials Science, 2025).

Обратная связь в реальном времени:

Внедрение онлайн-мониторинга температуры (точность ±2°C) и контроля давления (точность ±5 МПа) позволило снизить уровень дефектов во время спекания примерно на 15–20 % (ИПА 2024).

Интеллектуальная система управления регулирует скорость охлаждения, снижая термическое напряжение примерно на 20–30 %, а скорость образования трещин — примерно на 15 % (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Комплексный эффект

Благодаря вышеуказанному методу пористость твердого сплава может быть снижена до 0,04–0,05%, глубина трещин <5 мкм, доля аморфной фазы <1%, а общий уровень дефектов снижен на 20–30% (ITIA 2024).

Значительное улучшение эксплуатационных характеристик: прочность на изгиб увеличилась на 5–10 % (до 4000–4200 МПа), твердость увеличилась на 100–150 HV, износостойкость увеличилась на 15–20 % (ASTM G65), а срок службы увеличился примерно на 30–40 % (Journal of Materials Science 2025).

При высоких ударных нагрузках (частота > 2000 раз/мин), а также в условиях высокой температуры и влажности (40 °С, влажность 90%) долговечность и надежность оптимизированного твердого сплава повышаются примерно на 25–35% (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

2.4 Технология определения микроструктуры

Передовые методы характеризации предоставляют точные инструменты для анализа микроструктуры и фазового состояния твердого сплава, способствуя оптимизации производительности и контролю качества.

2.4.1 Применение SEM, TEM и EBSD

Сканирующий электронный микроскоп (СЭМ , разрешение <1 нм) используется для характеристики морфологии и распределения зерен WC (0,110 мкм) и связующих фаз (530 нм ± 2 нм). Визуализация обратно рассеянных электронов (BSE) различает WC и Co. Однородность зерен цементированного карбида, содержащих 10% Co, составляет >95% ± 2%, а пористость составляет <0,1% ± 0,02%. СЭМ также может обнаруживать трещины (0,52 мкм) и поры (10 - 100 нм), обеспечивая основу для оптимизации процесса. Например, после обработки HIP пористость снижается до 0,05%, а твердость увеличивается на 5% ± 1%.

Просвечивающий электронный микроскоп (ПЭМ , разрешение <0,2 нм) выявляет атомную структуру интерфейса WC(0001)/ Co(111) с несоответствием решетки <2% ± 0,2%, а селективная электронная дифракция (САЭД) подтверждает, что расстояние d_{0001} WC составляет $2,837 \text{ \AA} \pm 0,005 \text{ \AA}$. В хромсодержащем цементированном карбиде наблюдается сегрегация Cr (концентрация 0,5% ± 0,2%), образующая слой Cr₂O₃, который повышает коррозионную стойкость на 30% ± 5%. ПЭМ также может анализировать аморфную фазу (толщина 510 нм) и контролировать содержание углерода (5,8% ± 0,2%). Например, просвечивающая электронная микроскопия оптимизирует интерфейс твердого сплава, содержащего молибден (работа связывания 2,8 Дж/м²), продлевая срок службы инструмента на 15% ± 2%.

Дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD) использовалась для изучения

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ориентации зерен и распределения напряжений. Мелкозернистый карбид (0,51 мкм) показал случайную ориентацию, в то время как крупнозернистый карбид (510 мкм) показал $\langle 0001 \rangle$ предпочтительную ориентацию (интенсивность >2 мрд $\pm 0,2$ мрд). EBSD определил остаточное напряжение <200 МПа ± 10 МПа, которое было снижено на $10\% \pm 2\%$ отжигом (500 °C, 2 часа). Однородность напряжения твердого сплава, содержащего TaC, была улучшена на 20%, а скорость возникновения трещин была снижена на $15\% \pm 3\%$. Например, излом твердого сплава, содержащего 12% Co, показал транскристаллитное разрушение с прочностью $K_{1c} 14$ МПа \cdot м^{1/2} $\pm 0,5$.

В практических приложениях SEM, TEM и EBSD работают вместе для анализа микроструктуры. Например, инструмент из твердого сплава, содержащий 10% Co, имеет размер зерна $1,5$ мкм $\pm 0,2$ мкм, подтвержденный SEM, слой Co 15 нм ± 2 нм, подтвержденный TEM, и напряжение < 150 МПа ± 10 МПа, определенное EBSD, что гарантирует соответствие производительности стандарту резания (твердость HV 1800 ± 30 , $K_{1c} 12$ МПа \cdot м^{1/2}).

2.4.2 Рентгеновская дифракция (XRD) и энергодисперсионная спектроскопия (EDS A)

Рентгеновская дифракция (XRD) используется для характеристики фазового состава и кристаллической структуры твердого сплава. Основные пики WC расположены при $2\theta=31,5^\circ$ и $35,6^\circ \pm 0,1^\circ$, а диапазон размеров зерен составляет $0,110$ мкм. Сдвиг пика, вызванный остаточным напряжением, составляет $<0,1^\circ \pm 0,02^\circ$, что отражает напряжение спекания (<200 МПа). Твердый сплав, содержащий TiC, показывает, что пик твердого раствора (W, Ti)C смещается на $0,2^\circ \pm 0,05^\circ$, и содержание углерода необходимо контролировать ($5,8\% \pm 0,2\%$), чтобы избежать η -фазы ($2\theta \approx 40^\circ \pm 0,5^\circ$). XRD также может обнаружить аморфную фазу (широкий пик $2\theta \approx 35^\circ \pm 0,5^\circ$). Доля аморфной фазы в твердом сплаве, содержащем WC, составляет $<2\% \pm 0,5\%$, а твердость увеличивается на $5\% \pm 1\%$.

Анализ спектра энергетической дифракции (EDS A) определил распределение элементов. Отклонение распределения Co в твердом сплаве, содержащем 10% Co, составило $<3\% \pm 0,5\%$, а концентрация сегрегации Cr составила $0,5\% \pm 0,2\%$. Скорость коррозии твердого сплава, содержащего 12% Ni, в кислой среде (pH 3, HCl) составила $0,03$ мм/год $\pm 0,005$ мм/год, а EDS A подтвердил, что однородность слоя Ni составила $> 95\% \pm 2\%$. Горячая и влажная среда (40 °C, влажность 90%) может вызвать сегрегацию Co (отклонение увеличивается до $5\% \pm 1\%$), а твердый сплав на основе Ni более стабилен (отклонение $< 2\%$).

XRD и EDS A могут полностью оценить микроструктуру. Например, XRD подтвердил, что размер зерна твердого сплава, содержащего 10% Co, составил $1,5$ мкм $\pm 0,2$ мкм, и не было фазы η ; EDS A подтвердил, что толщина Co составила 15 нм ± 2 нм, сегрегация Cr составила $1\% \pm 0,2\%$, а производительность соответствовала стандарту инструмента (твердость HV 1800 ± 30 , $K_{1c} 12$ МПа \cdot м^{1/2} $\pm 0,5$). В практических применениях соотношение твердого раствора форм из твердого сплава, содержащих TiC, было оптимизировано с помощью XRD

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

и EDS A ($Ti/W = 0,1 \pm 0,02$), износостойкость была улучшена на 20%, а срок службы составил > 6000 часов \pm 500 часов.

Ссылки

Он отсортирован по стилю APA и содержит 16 статей на английском и китайском языках, посвященных микроструктуре и фазовому состоянию.

Экснер, Х. Э. (1979). Физическая и химическая природа твердых сплавов. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173. <https://doi.org/10.1179/imtr.1979.24.1.149>

Экснер, Х. Э. (1979). Физическая и химическая природа твердых сплавов. *International Metals Reviews*, 24(1), 149173.

Гурланд, Дж. (1988). Трещиностойкость твердых сплавов. *Журнал металлов*, 40(7), 1923.

Ласснер, Э. и Шуберт, В. Д. (1999). *Вольфрам: свойства, химия, технология элемента, сплавы и химические соединения*.

Нью-Йорк, Нью-Йорк: Springer.

Пракаш, Л. Дж. (2014). Твердые сплавы: структура, свойства и эксплуатационные характеристики. В VK Sarin (ред.), *Comprehensive hard materials* (т. 1, стр. 2954). Оксфорд, Великобритания: Elsevier.

Пракаш, Л. Дж. (2014). Твердый сплав: структура, свойства и эксплуатационные характеристики. В VK Sarin (ред.), *Complete Book of Hard Materials* (т. 1, стр. 2954). Оксфорд, Великобритания: Elsevier Publishing.

Упадхья, Г.С. (1998). Цементированные карбиды вольфрама: производство, свойства, и тестирование. Норвич, Нью-Йорк: William Andrew Publishing.

Ван, Х. и Фанг, З. (2019). Термические и механические свойства твердых сплавов в экстремальных условиях. *Международный журнал огнеупорных металлов и твердых материалов*, 82, 7685.

Чжан, Л. и Чен, С. (2017). Коррозионное поведение твердых сплавов в кислых средах. *Corrosion Science*, 125, 8795.

Chen, X., & Zhang, Y. (2022). DFT-исследование интерфейса WCCo в цементированных карбидах. *Вычислительное материаловедение*, 201, 110873.

Ли, Дж. и Ван, С. (2021). Микроструктурная характеристика твердых сплавов с использованием передовой микроскопии. *Характеристика материалов*, 178, 111234.

Chinatungsten Online. (2023). Свойства и применение твердого сплава. Получено с <http://news.chinatungsten.com/cn/tungstencarbideinformation> технологии производства твердого сплава. *Обзор материалов*, 32(10), 16531660.

Li, ZQ, & Wang, ZY (2021). Прогресс в технологии переработки цементированного карбида. *Редкоземельные материалы и машиностроение*, 50(8), 29712978.

Wang, W., & Zhang, H. (2020). Исследование поведения твердых сплавов при высокотемпературном окислении. *Журнал материаловедения и машиностроения*, 38(4), 512518.

Li, T., & Chen, M. (2019). Прогресс в кинетике спекания твердых сплавов. *Технология порошковой металлургии*, 37(5), 321329.

Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Механизмы износа твердых сплавов при резании. *Износ*, 408409, 126134.

Garcia, J., & Ciprés, VC (2018). Механизмы износа твердых сплавов при резании. *Износ*, 408409, 126134.

Fang, ZZ, & Koorman, MC (2017). Достижения в обработке и свойствах цементированного карбида. *Annual Review of Materials Research*, 47, 381403.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

Какие типы твердого сплава существуют в зависимости от различных зерен карбида вольфрама?

Твердый сплав — это композитный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве основной твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы. Его эксплуатационные характеристики и области применения тесно связаны с размером зерна WC. Размер зерна не только влияет на твердость и прочность, но также оказывает глубокое влияние на износостойкость материала, ударопрочность, устойчивость к высоким температурам и точность обработки. В зависимости от размера зерна WC твердый сплав можно разделить на несколько категорий: от традиционных крупных зерен до современных наноразмерных зерен, чтобы соответствовать различным промышленным потребностям. Ниже приводится подробное описание классификации и ее характеристик:

1. Крупнозернистый твердый сплав

Размер зерна: >5 мкм (обычно 5-20 мкм, ISO 513).

Характеристики крупнозернистого твердого сплава

Крупнозернистый цементированный карбид крупнее, количество границ зерен меньше, связующая фаза (Co) распределена равномерно, а доля площади границ зерен в общем объеме составляет всего около 5%-10% (Journal of Materials Science 2025). Это делает материал более ударопрочным и усталостным.

Твердость относительно низкая, в пределах от HV 1200 до 1500, но прочность на изгиб (TRS)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

относительно высокая, достигая 2200–2500 МПа, а вязкость разрушения (KIC) составляет 15–20 МПа·м^{1/2} (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Износостойкость относительно умеренная, скорость износа составляет около 0,08-0,10 мм³/Н·м (тест ASTM G65), но материал хорошо работает при высоких ударных нагрузках и подходит для рабочих сред, подверженных сильным ударам и вибрации.

Он обладает хорошей высокотемпературной стабильностью, сохраняя твердость около 85–90 % при температуре 800 °С, что подходит для работы в условиях средних и высоких температур (ИПА 2024).

Микроструктура крупнозернистого твердого сплава

Анализ с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) показывает, что зерна WC имеют полигональную форму, толщина фазы кобальта между зёрнами составляет около 1–3 мкм, а прочность связи границ зёрен относительно высока, около 1,5–2 Дж/м² (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Большой размер зёрна приводит к снижению сопротивления скольжению по границам зёрен, что помогает поглощать энергию удара и замедлять распространение трещин.

Применение крупнозернистого твердого сплава

Крупнозернистый карбид в основном используется для горнодобывающих инструментов, буровых коронок, оборудования для проходки туннелей и больших штамповочных штампов. Он подходит для сценариев с высокой ударной нагрузкой, таких как буровые работы в граните или базальте (ISO 513).

При бурении в горных выработках срок службы буровой коронки может достигать 1500–2000 метров, особенно в условиях твердых пород, демонстрируя высокую стойкость к разрушению (ИПА 2024).

Его также широко используют в износостойких деталях тяжелой техники, таких как зубья ковшей экскаваторов, которые выдерживают многократные удары и износ (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Приготовление крупнозернистого твердого сплава

Используется обычный процесс порошковой металлургии. Сырьем является грубый порошок WC (5-20 мкм). После смешивания материалы прессуются в форму. Температура спекания обычно составляет 1400-1450°C, а время выдержки составляет 1-2 часа.

Распределение фазы кобальта необходимо контролировать в процессе спекания, чтобы избежать аномального роста зёрна. Небольшое количество TaC (0,5%-1%) обычно добавляется для ингибирования роста зёрна (ИПА 2024).

Скорость охлаждения контролируется на уровне 5–10 °С/мин, чтобы предотвратить возникновение микротрещин из-за чрезмерного напряжения на границах зёрен (Журнал

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

материаловедения, 2025 г.).

2. Мезокристаллический карбид

Размер зерна: 1-5 мкм (ISO 513).

Характеристики мезокристаллического твердого сплава:

Мезогенный цементированный карбид является умеренным, а доля площади границ зерен в общем объеме составляет около 15%-20%, что обеспечивает хороший баланс между твердостью и вязкостью (Журнал материаловедения 2025).

Твердость составляет 1500–1800 HV, прочность на изгиб — 2000–2300 МПа, а вязкость разрушения — 10–15 МПа·м^{1/2} (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Износостойкость примерно на 10–15 % выше, чем у крупнозернистого твердого сплава, а скорость износа составляет около 0,06–0,08 мм³/Н·м (тест ASTM G65).

Он обладает как ударопрочностью, так и высокой температурной стабильностью, сохраняя твердость около 90–95 % при 600 °С, что делает его пригодным для обработки в условиях средней нагрузки и средней температуры (ITIA 2024).

Микроструктура мезокристалла карбид:

Анализ СЭМ показывает, что зерна WC представляют собой правильные многоугольники, толщина фазы кобальта между зёрнами составляет около 0,5–1 мкм, а прочность связи границ зерен составляет 1,2–1,5 Дж/м² (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Увеличение числа границ зерен делает путь распространения трещины более извилистым, что повышает трещиностойкость материала. В то же время умеренный размер зерна обеспечивает более высокую твердость.

Применение мезокристаллического твердого сплава:

Широко используется в режущих инструментах общего назначения (таких как фрезы, токарные инструменты), штамповочных штампах, валках и износостойких деталях. Подходит для обработки среднеуглеродистой стали, чугуна или нержавеющей стали низкой твердости (ISO 513).

При скорости резания 150–200 м/мин срок службы инструмента может достигать 1,5–2 часов, что особенно свидетельствует о хороших противоскольных характеристиках при прерывистом резании (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Он также подходит для изготовления форм средней точности, таких как штамповочные штампы для автомобильных деталей, и может выдерживать средние удары и износ (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

из мезокристаллического цементированного карбида:

порошок WC среднего размера (1–5 мкм), который смешивался в планетарной шаровой мельнице (12–16 часов при скорости 300–400 об/мин) для обеспечения однородности.

Температура спекания поддерживается на уровне 1350–1400 °C, время выдержки составляет 1–1,5 часа, а для контроля роста зерен добавляются ингибиторы зерна (например, Cr₃C₂ 0,3%–0,5%).

После спекания можно использовать горячее изостатическое прессование (ГИП, 100–120 МПа, 1350 °C) для дальнейшего снижения пористости (<0,02%, ISO 3326:2013).

3. Мелкозернистый твердый сплав

Размер зерна: 0,5-1 мкм (ISO 513).

мелкозернистый цементированный карбид:

Мелкозернистый цементированный карбид имеет небольшие размеры, а площадь границ зерен составляет около 25%-30% от общего объема. Эффект границ зерен значительно повышает твердость и износостойкость материала (Journal of Materials Science 2025).

Твердость составляет 1800–2000 HV, прочность на изгиб — 1800–2200 МПа, а вязкость разрушения — 8–12 МПа·м^{1/2} (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Износостойкость примерно на 20–30 % выше, чем у мезогенного твердого сплава, а скорость износа составляет около 0,04–0,06 мм³/Н·м (тест ASTM G65).

Прочность немного снижается, но высокотемпературные характеристики превосходны, при этом уровень сохранения твердости составляет около 88–92 % при температуре 800 °C, что подходит для высокоточной обработки (ITIA 2024).

Микроструктура мелкозернистого твердого сплава:

, толщина фазы кобальта между зёрнами составляла около 0,2–0,5 мкм, а прочность связи границ зерен составляла 1,0–1,3 Дж/м² (Журнал материаловедения 2025).

Мелкие зёрна повышают сопротивление скольжению по границам зерен и улучшают износостойкость материала, но они также увеличивают вероятность возникновения трещин.

мелкозернистый цементированный карбид:

Подходит для прецизионных режущих инструментов (например, токарных резцов, фрез), прецизионных форм и износостойких деталей, обработки нержавеющей стали, закаленной стали (HV 40-50 HRC) или высокопрочных сплавов (ISO 513).

При резке нержавеющей стали (200 м/мин) срок службы инструмента может достигать 2–3 часов, особенно при непрерывной резке, при этом достигается хорошее качество поверхности (Ra<0,4 мкм) (Журнал материаловедения, 2025).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Он также используется для изготовления высокоточных штамповочных штампов и волоочильных штампов, которые могут соответствовать требованиям допуска $<0,01$ мм (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

мелкозернистый цементированный карбид:

Используйте мелкозернистый порошок WC ($0,5-1$ мкм), высокоэнергетическую шаровую мельницу ($16-24$ часа, скорость вращения $400-600$ об/мин) и добавьте ингибиторы зернистости (например, Cr_2O_3 $0,3-0,5\%$ или VC $0,1-0,3\%$).

Температура спекания контролировалась на уровне $1350-1380$ °C, а время выдержки составляло 1 час, чтобы избежать роста зерен.

После спекания можно использовать горячее изостатическое прессование ($120-150$ МПа, 1350 °C) для устранения микропористости, при этом пористость составляет $<0,015\%$ (ISO 3326:2013).

4. Сверхмелкозернистый твердый сплав

Размер зерна: $0,2-0,5$ мкм (ISO 513).

Характеристики сверхмелкозернистого твердого сплава:

Сверхмелкозернистый цементированный карбид чрезвычайно мал, а площадь границ зерен составляет около $35\%-40\%$ от общего объема. Влияние эффекта границ зерен на производительность более существенно (Журнал материаловедения 2025).

Твердость составляет $1900-2200$ HV, прочность на изгиб — $1700-2000$ МПа, а вязкость разрушения — $7-10$ МПа·м^{1/2} (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Износостойкость примерно на $15-20\%$ выше, чем у мелкозернистого твердого сплава, а скорость износа составляет около $0,03-0,05$ мм³/Н·м (тест ASTM G65).

Высокотемпературные характеристики еще больше улучшены: степень сохранения твердости составляет около $85-90\%$ при 1000 °C, что делает его пригодным для обработки при высоких нагрузках и температурах (ITIA 2024).

Качество поверхности превосходное, а шероховатость поверхности заготовки после обработки может достигать Ra $0,2-0,3$ мкм (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Микроструктура сверхмелкозернистого твердого сплава:

помощью просвечивающего электронного микроскопа показывает, что зерна WC имеют почти круглую форму, толщина фазы кобальта между зернами составляет около $0,1-0,3$ мкм, а прочность связи границ зерен составляет $0,8-1,2$ Дж/м² (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Чрезвычайно большое количество границ зерен усложняет путь распространения трещин, что еще больше повышает износостойкость, однако снижение прочности усложняет задачу

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

обеспечения ударопрочности.

Применение сверхмелкозернистого твердого сплава:

Для сверхточной обработки инструментов (например, сверл для печатных плат, микрофрез), перфорационных инструментов и покрытых подложек из титановых сплавов, суперсплавов на основе никеля или закаленных сталей (HV 50-60 HRC) (ISO 513).

При резке титанового сплава (150 м/мин) срок службы инструмента может достигать 3–4 часов, что особенно демонстрирует превосходную размерную стабильность при высокоточной обработке (Журнал материаловедения, 2025).

Он также используется для изготовления высокоточных волочильных матриц и микроформ, отвечающих требованиям высокой точности обработки электронных компонентов (допуск <0,005 мм) (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

ультрамелкозернистый цементированный карбид:

Используйте ультратонкий порошок WC (0,2–0,5 мкм), высокоэнергетическую шаровую мельницу (24–36 часов, скорость вращения 500–800 об/мин) и добавьте ингибитор зерна (например, VC 0,1–0,3%).

Температура спекания контролируется в пределах 1320–1350°C, а время выдержки составляет 0,5–1 час, чтобы избежать роста зерен.

Используется горячее изостатическое прессование (ГИП, 150 МПа, 1350 °C) или искровое плазменное спекание (ИПС, 1300 °C, 50 МПа), а размер зерна контролируется с точностью до 0,2–0,5 мкм (ITIA 2024).

5. Нано-твердый сплав

Размер зерна: 0,05-0,2 мкм (ISO 513).

Характеристики нанотвердого сплава:

Зерна WC нано-сортового цементированного карбида достигают наномасштаба, а площадь границ зерен составляет до 45%-50% от общего объема. Эффект границ зерен чрезвычайно силен, что значительно повышает твердость и износостойкость (Journal of Materials Science 2025).

Твердость составляет 2000–2400 HV, прочность на изгиб — 1600–1900 МПа, а вязкость разрушения — 6–9 МПа·м^{1/2} (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Износостойкость примерно на 10–15 % выше, чем у сверхмелкозернистого твердого сплава, а скорость износа составляет около 0,02–0,04 мм³/Н·м (тест ASTM G65).

Наноэффект повышает стабильность при высоких температурах, сохраняя твердость >90% при 1000°C и HV 1800-2000 при 1200°C (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Чистота поверхности и точность обработки чрезвычайно высоки, а шероховатость поверхности заготовки может достигать Ra 0,1–0,2 мкм (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

Из-за чрезвычайно малого размера зерна, слабой ударопрочности и низкой вязкости разрушения эксплуатационные характеристики необходимо улучшать с помощью покрытия (например, TiAlN) или градиентной структуры (ИПА 2024).

Наномасштабная микроструктура твердого сплава:

с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и атомно-силовой микроскопии (АСМ) показал, что зерна WC имели приблизительно сферическую форму, толщина фазы кобальта между зёрнами составляла всего 0,05–0,1 мкм, а прочность связи границ зёрен составляла 0,7–1,0 Дж/м² (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Сопrotивление скольжению по границам зёрен чрезвычайно высоко, что значительно повышает износостойкость, однако концентрация напряжений по границам зёрен также увеличивает риск возникновения трещин.

Применение нанотвердых сплавов:

Подходит для сверхточной резки (например, обработки оптических форм), обработки микроформ и электронных компонентов, обработки материалов высокой твердости (HV 60–70 HRC) или цветных металлов (например, алюминиевых сплавов) (ISO 513).

При обработке микросверлом (скорость резания 100 м/мин) срок службы может достигать 4–5 часов, особенно при обработке высокоточных печатных плат (ПП), демонстрирует чрезвычайно высокую размерную стабильность (Журнал материаловедения 2025).

Он также используется для изготовления сверхтонких волоочильных фильер и медицинских приборов (например, скальпелей), обеспечивая точность обработки на микронном уровне (допуск <0,002 мм) (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Подготовка наноразмерного твердого сплава:

Используйте наноразмерный порошок WC (0,05–0,1 мкм), высокоэнергетическую шаровую мельницу (24–48 часов, скорость вращения 600–1000 об/мин) и добавьте ингибиторы зернистости (например, VC 0,1–0,3% или Cr₃C₂ 0,2–0,4%).

Используя технологию низкотемпературного спекания (1300–1350 °C) или спекания с использованием электрического поля (например, искровое плазменное спекание SPS, 1300 °C, 50–80 МПа), размер зерна контролируется с точностью до 0,05–0,2 мкм.

Используйте диспергаторы (например, стеариновую кислоту 0,1–0,3 %) и технологию

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

ультразвукового диспергирования для уменьшения агломерации порошка и повышения однородности на 10–15 % (ITIA 2024).

После спекания можно нанести PVD- покрытие TiAlN (толщиной 2–3 мкм) для повышения стойкости к окислению и износостойкости (Журнал материаловедения 2025).

6. Другие соображения по классификации

Композитный зернистый твердый сплав:

Размер зерна: Объедините зерна разных размеров (например, 0,2 мкм и 5 мкм) для формирования градиентных или бимодальных структур.

Характеристики твердого сплава с композитным зерном:

твёрдость (HV 1800–2000) и вязкость (KIC 10–15 МПа·м^{1/2}), износостойкость улучшается на 10–20 % (Журнал материаловедения 2025 г.).

Градиентная структура представляет собой комбинацию мелких кристаллов (0,2–0,5 мкм) на поверхности и крупных кристаллов (5–10 мкм) во внутреннем слое, что обеспечивает высокую поверхностную износостойкость и хорошую внутреннюю ударопрочность (ITIA 2024).

Он обладает превосходными характеристиками при высоких температурах, сохраняя твердость около 85–90 % при 1000 °C, что делает его пригодным для сложных условий эксплуатации (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Микроструктура композитного зерна твердого сплава:

, что поверхностные зерна малы, а границы зерен плотные; внутренние зерна крупнее, толщина фазы кобальта составляет около 1-2 мкм, а общая структура четко стратифицирована (Журнал материаловедения 2025).

Градиентная структура снижает скорость роста трещин и повышает сопротивление разрушению примерно на 15% (ITIA 2024).

Применение твердосплавных материалов с композитным зерном:

Многофункциональные инструменты (например, материалы для аэрокосмической отрасли) и сложные формы, обработка композитных материалов или жаропрочных сплавов (ISO 513).

При резке композитов на основе углеродного волокна (150 м/мин) срок службы инструмента может достигать 3-4 часов (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Приготовление композитного зерна твердого сплава:

Используется технология послойного прессования, при этом для поверхностного слоя используется ультрадисперсный порошок WC (0,2-0,5 мкм), а для внутреннего слоя – крупнодисперсный порошок WC (5-10 мкм).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Температура спекания составляла 1400 °С, время выдержки – 1 ч, толщина градиентного слоя контролировалась (0,5–1 мм) (ITIA 2024).

Легированный зернистый карбид:

Размер зерна: Размер зерна регулируется путем легирования, обычно 0,5-2 мкм .

Характеристики твердого сплава с легированным зерном:

Добавляя TiC , TaC или NbC (5–10 %), размер зерна контролируется на уровне 0,5–2 мкм , стойкость к окислению повышается (прирост массы при окислении при 1200 °С <0,1 мг/см²) , а твердость составляет HV 1700–1900 (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Коррозионная стойкость улучшается примерно на 10–15 % , а скорость коррозии в условиях соляного тумана составляет <0,04 мм/год (ASTM G31).

Повышается прочность при высоких температурах, прочность на изгиб сохраняется на уровне около 80–85 % при 1000 °С (ITIA 2024).

Микроструктура легированного зернистого твердого сплава:

Анализ с помощью СЭМ и рентгеновской дифракции (XRD) показал, что легирующие элементы (такие как TiC) распределяются в виде твердых растворов или карбидных частиц, подавляя рост зерен WC и увеличивая прочность границ зерен примерно на 5–10 % (Журнал материаловедения 2025 г.).

Легирующие элементы снижают улетучивание фазы кобальта и повышают высокотемпературную стабильность (ITIA 2024).

Применение твердого сплава с легированным зерном:

Высокотемпературные режущие инструменты (например, обработка материалов для авиакосмических двигателей) и коррозионно-стойкие компоненты, такие как клапаны для морских сооружений (ISO 513).

При резании жаропрочных сплавов (250 м/мин) стойкость инструмента может достигать 2-3 часов (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Приготовление твердого сплава с легированным зерном:

легированные TiC или TaC (5%-10%), прессуются в форму, температура спекания составляет 1350-1400°C, время выдержки составляет 0,5-1 час.

Используйте защитную атмосферу (например, газ Ar) для спекания, чтобы избежать окисления фазы кобальта (ITIA 2024).

7. Стандарты и испытания

Стандарт ISO 513:2012: Классификация и применение твердых сплавов содержит руководство по классификации для режущих и нережущих применений на основе размера зерна и свойств.

GB/T 20707-2006: Определение микроструктуры твердого сплава, определяет диапазон

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

размеров зерен и метод испытания.

ASTM E112-13: Метод измерения размера зерна с использованием метода поперечного сечения или метода линейного пересечения для измерения среднего диаметра зерна с погрешностью <5%.

ISO 4499-2:2020: Оценка микроструктуры твердого сплава, исследование распределения зерен и толщины фазы кобальта.

ASTM G65-00(2010): Испытание на износ резинового круга с использованием сухого песка, оценка износостойкости твердых сплавов с различным размером зерна.

Метод обнаружения:

Сканирующая электронная микроскопия (СЭМ) и просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) в сочетании с рентгеновской дифракцией (РФА) позволяют точно измерить размер и распределение зерен с погрешностью <5% (Журнал материаловедения 2025).

Дифракция обратного рассеяния электронов (EBSD) анализирует ориентацию границ зерен и распределение напряжений, а погрешность ориентации границ зерен контролируется в пределах $\pm 2^\circ$ (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Лазерный анализатор размера частиц измеряет распределение размеров частиц порошка WC для обеспечения качества порошка (ITIA 2024).

8. Тенденции развития

Расширение сферы применения твердого сплава нанокласса:

В 2024 году объем производства цементированного карбида нанокласса в Китае составит 15–20% от общего объема и, как ожидается, достигнет 25–30% в 2025 году, в основном за счет роста спроса в электронной и аэрокосмической отраслях (ITIA 2024).

Доля наноразмерного твердого сплава в области микрообработки (например, обработки печатных плат 5G) увеличилась примерно на 20%, а точность обработки достигла $\pm 0,001$ мм («Китайский журнал цветных металлов», 2024).

Разработка композитной зернистой и градиентной структуры:

Коэффициент применения твердого сплава с градиентной структурой в аэрокосмической отрасли (например, в качестве инструмента для обработки лопаток турбин) увеличился примерно на 10–15%, а срок службы увеличился примерно на 20–30% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Благодаря оптимизации распределения зерен износостойкость и баланс прочности композитного зернистого твердого сплава улучшаются примерно на 15%, что делает его пригодным для обработки нескольких материалов (ITIA 2024).

Продвижение технологий экологически чистой подготовки:

Технология спекания в полевых условиях (например, SPS) становится все более популярной,

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

сокращая время спекания с 2 часов до 10–20 минут, снижая потребление энергии примерно на 20–30 % и сокращая выбросы CO₂ примерно на 25 % (ITIA 2024).

Благодаря развитию технологий переработки уровень переработки цементированного карбида в Китае достигнет 35–40% к 2024 году и, как ожидается, достигнет 45% к 2025 году, что позволит обеспечить эффективную переработку за счет плавки цинка и методов химического выщелачивания (ITIA 2024).

Интеллектуальное производство:

Для контроля размера зерна применяется технология онлайн-мониторинга (например, мониторинг атмосферы спекания с помощью инфракрасной спектроскопии), а отклонение размера зерна снижается с $\pm 0,1$ мкм до $\pm 0,05$ мкм (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Искусственный интеллект (ИИ) оптимизирует параметры смешивания и спекания, улучшая однородность примерно на 10–15% и снижая уровень дефектов примерно на 20% (ITIA 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

Типы, механизмы и оптимизация пористости/размера пор в твердом сплаве

Типы, механизмы и оптимизация пористости в твердом сплаве

1. Обзор твердого сплава и пористости

Твердый сплав — это композитный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве основной твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы. Он изготавливается методом порошковой металлургии и имеет высокую твердость (HV1000–1800), отличную износостойкость и соответствующую прочность ($K_{IC} \approx 8\text{--}20 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$). Он широко используется в режущих инструментах, горных кирках и износостойких деталях. Пористость является ключевым дефектом твердого сплава, который относится к отверстиям или воздушным зазорам внутри материала, обычно выражаемым как объемная доля (0,01–2%). Пористость напрямую влияет на плотность (отклонение $\pm 0,2 \text{ г/см}^3$), прочность (снижается на 10–30%), ударную вязкость и износостойкость (потери от износа увеличиваются на 20–50 мм³, ASTM G65) твердого сплава и является основным показателем контроля качества.

Пористость обусловлена сырьем, этапами формования и спекания процесса порошковой металлургии. Международные стандарты (такие как ISO 4505 и ASTM B276) классифицируют пористость (например, A00–B08) и определяют методы испытаний (например, металлографический анализ). Оптимизация пористости может значительно улучшить эксплуатационные характеристики твердого сплава, продлить срок службы инструмента (20–50%) и повысить надежность. Ниже приводится подробный анализ типов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

пористости, механизмов формирования, стратегий оптимизации и перспектив технического совершенствования.

2. Типы пористости

Пористость твердого сплава классифицируется на следующие типы в зависимости от размера, морфологии и происхождения на основе классификации ISO 4505 и ASTM B276:

2.1 Поры типа А (микропоры)

Характеристики: Диаметр <10 мкм, круглые или почти круглые, равномерно распределены.
Содержание: Объемная доля 0,01–0,5%, обычно встречается в твердом сплаве высокой плотности (теоретическая плотность >99,5%).

Воздействие: Незначительное влияние на прочность и ударную вязкость (снижение <5%), но высокое содержание может привести к образованию микротрещин.

Стандарт: ISO 4505 A00–A04 (A00 — отсутствие пористости, A04 — пористость 0,2%).

2.2 Поры типа В (более крупные поры)

диаметр 10–25 мкм, неправильная форма, в основном эллиптическая или многоугольная.

Содержание: Объемная доля 0,1–1%, обычно встречается в твердых сплавах средней и низкой плотности (теоретическая плотность 98–99%).

Удар: Снижение прочности (10–20%) и вязкости (K_{IC} уменьшается на 15%), повышенный износ (ASTM G65 увеличивается на 20–30 мм³).

Стандарт: ISO 4505 B00–B08 (B 08 — пористость 1%).

2.3 Поры типа С (поры карбидных дефектов)

Характеристики: Диаметр >25 мкм, обычно образуются путем агломерации или осыпания карбидных частиц (WC, TiC), имеют неправильную форму.

Содержание: Объемная доля 0,05–0,5%, встречается в основном в низкокачественном твердом сплаве.

Воздействие: Значительное снижение прочности (на 20–30%) и износостойкости (увеличение износа на 30–50 мм³), а также повышенный риск разрушения.

Стандарт: ASTM B276 Дефект типа С, требует строгого контроля.

2.4 Газовые поры

Характеристики: диаметр 10–100 мкм, круглая или сферическая форма, образованная путем захвата газа во время спекания.

Содержание: 0,01–0,2% по объему, обычно встречается в материалах, которые недостаточно спечены в вакууме.

Эффект: Снижение плотности (0,1–0,3 г/см³) и ударопрочности (ударная вязкость снижена)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

на 20%).

Стандарт: ISO 4505 классифицируется как тип A/B, который необходимо различать посредством металлографического наблюдения.

3. Механизм образования пористости

Образование пористости тесно связано с сырьем, формованием и спеканием процесса порошковой металлургии. Ниже приведены основные механизмы:

3.1 Дефекты сырья

Механизм: Неоднородность частиц: порошок WC или Co имеет широкое распределение размеров частиц (0,5–10 мкм) и низкую **плотность упаковки** (<60%), образуя поры типа A/B. Загрязнение примесями: кислород ($O > 0,1\%$), сера ($S > 0,02\%$) или органические вещества в сырье улетучиваются, выделяют газ во время спекания и образуют поры.

Дисбаланс содержания углерода: недостаточное количество углерода ($C/W < 0,98$) приводит к выделению η -фазы (W_3Co_3C), сопровождающемуся порами C-типа; избыточное количество углерода ($C/W > 1,02$) образует свободный углерод и увеличивает поры B-типа. Воздействие: Пористость увеличивается на 0,2–0,5%, плотность уменьшается на 0,2 г/см³, прочность уменьшается на 10–15%.

3.2 Дефекты литья

Механизм: Неравномерное прессование: Недостаточное давление прессования (<200 МПа) или дефекты конструкции пресс-формы приводят к неравномерной плотности сырца (отклонение $\pm 5\%$), образуя поры типа B.

Остатки смазки: Добавки (например, парафин) не полностью испаряются и разлагаются на газ во время спекания, образуя поры (диаметром 10–50 мкм).

Воздействие: Пористость увеличивается на 0,1–0,3%, прочность снижается на 10%, качество поверхности ухудшается.

3.3 Дефекты спекания

Механизм: Недостаточное спекание жидкой фазы: недостаточная температура спекания (1350–1450 °C) или время (1–2 часа), недостаточный поток жидкой фазы Co и остаточные поры типа A/B (0,1–0,5%).

Улавливание газа: когда степень вакуума низкая ($< 10^{-2}$ Па) или атмосфера спекания содержит кислород/азот, газ инкапсулируется жидкой фазой Co, образуя поры.

Агломерация WC: при высокой температуре частицы WC аномально растут (> 5 мкм) или агломерируются, образуя поры типа C, что сопровождается снижением прочности на 20%.

Воздействие: Пористость увеличивается на 0,2–1%, износостойкость снижается (объем износа увеличивается на 20–40 мм³, ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4. Метод оптимизации пористости

Оптимизация пористости требует начинать со всей цепочки сырья, формования, спекания и последующей обработки. Ниже приведены основные методы в сочетании с кейсами производителей:

4.1 Оптимизация сырья

Метод: Контроль размера частиц: используйте нано/субмикронный порошок WC (размер частиц 0,2–0,8 мкм), увеличьте плотность упаковки (>65%) и уменьшите поры типа A/B на 0,1–0,2%.

Высокочистое сырье: контроль содержания кислорода (<0,05%), содержания серы (<0,01%), снижение образования пор и снижение пористости до <0,1%.

Точное соотношение углерода: C/W контролируется на уровне 0,98–1,02, чтобы избежать η-фазы или свободного углерода, а также устранить поры C-типа.

Случай: сорт Zhuzhou Diamond YG6 использует нанопорошок WC (0,4 мкм), пористость снижена до A02 (0,05%), а прочность увеличена на 15%.

4.2 Оптимизация формовки

Метод: Формовка под высоким давлением: Увеличьте давление прессования (300–500 МПа), плотность сырого тела достигнет 70–75%, а пористость типа B уменьшится на 0,1–0,2%.

Оптимизируйте смазочные материалы: используйте малолетучие присадки (например, полиэтиленгликоль) и контролируйте их количество (<1%), чтобы уменьшить образование пор.

Единая конструкция штампа: при использовании изостатического прессования (CIP, 200–300 МПа) отклонение плотности сырого тела составляет <2%, а пористость снижается до <0,1%.

Пример: Sandvik использует технологию CIP для снижения пористости сырого изделия YG8 до A00 (<0,01%) и повышения прочности на 20%.

4.3 Оптимизация спекания

Метод: Вакуумное/атмосферное спекание: увеличьте уровень вакуума (<10⁻³ Па) или используйте атмосферу водорода/аргона для уменьшения пор (уменьшение пористости на 0,05–0,1%).

Горячее изостатическое прессование (ГИП): 150–200 МПа, 1300–1400 °C применяется после спекания для устранения пор типа A/B, снижения пористости до <0,02% и достижения плотности 99,9% от теоретического значения.

Точный контроль температуры: температура спекания контролируется в пределах ±10°C, а время увеличивается на 2–3 часа, чтобы способствовать течению жидкой фазы Co и уменьшению пор C-типа.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Случай: Пластины Kennametal K313 прошли ГИП, пористость снижена до A00, износостойкость увеличена на 30% (износ ASTM G65 <10 мм³).

4.4 Оптимизация постобработки

Метод: Шлифовка/полировка поверхности: удаление поверхностных пор (глубиной < 0,1 мм), повышение твердости поверхности (увеличение HV на 5%) и коррозионной стойкости (потеря веса в соляном тумане < 0,1 мг/см²).

Технология покрытия: PVD/CVD напыление TiN, TiAlN (толщина 2-5 мкм) закрывает поры поверхности, снижает коэффициент трения до <0,3 и продлевает срок службы в 2-3 раза.

Случай: Инструменты Ceratizit CTF имеют покрытие TiAlN, которое снижает влияние пористости поверхности на 50% и продлевает срок службы режущей части на 40%.

5. Перспективы технологического совершенствования

Для дальнейшего снижения пористости и улучшения эксплуатационных характеристик твердого сплава в 2026–2028 годах ожидается внедрение следующих технологических усовершенствований, которые будут способствовать его промышленному применению:

Ультратонкий нанопорошок

Разработан порошок WC/Co размером <0,2 мкм с плотностью упаковки 70%, пористостью, сниженной до <0,01%, и твердостью, увеличенной до HV1800, подходящий для высокоточных инструментов.

Процесс, оптимизированный с помощью ИИ

-⁴ Па) благодаря машинному обучению точность контроля пористости повышается на 50%, устраняя поры типа C и воздушные полости.

Микроволновое спекание

Микроволновый нагрев (1350–1450 °C) использовался для сокращения времени спекания (<1 часа), уменьшения агломерации WC, уменьшения пористости типа C на 0,1% и повышения эффективности производства на 30%.

Формование без смазки

Разработана технология сухого прессования для устранения пор смазки и снижения пористости корпуса до <0,005%, подходящая для высококачественных режущих инструментов.

Преформы для 3D-печати

Технология 3D-печати по металлу позволяет контролировать структуру заготовки, при этом отклонение плотности составляет <1%, а пористость снижается на 0,1%, что отвечает требованиям деталей сложной формы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Нано покрытие

TiSiN толщиной <1 мкм, которое закрывает мельчайшие поры (<5 мкм), снижает коэффициент трения до <0,2 и продлевает срок службы инструмента в 4 раза.

Лазерная модификация поверхности

Лазерная плавка поверхности (глубина 0,05 мм) устраняет поверхностные поры, увеличивает твердость на 10% и улучшает коррозионную стойкость на 30%, что делает его пригодным для использования в медицинских и авиационных деталях.

Плазменная полировка

Улучшает качество обработки поверхности (Ra<0,01 мкм), снижает влияние пористости поверхности и увеличивает коррозионную стойкость на 30%, что делает его пригодным для применений, требующих высокой надежности.

Эти технологии позволяют достичь пористости уровня A00 (<0,01%) за счет точного управления микроструктурой и параметрами процесса, что обеспечит прорыв в производительности твердого сплава для высокоточной резки, горнодобывающей промышленности и изготовления износостойких деталей.

6. Сравнение типов пористости и мер оптимизации

В таблице сравниваются типы, механизмы формирования и меры оптимизации пористости твердого сплава на основе стандартов ISO 4505 и ASTM B276.

Тип пор	Характеристика мкм	Пористость Ставка%	Механизм формирования	Влияние на производительность	Оптимизационные меры	Типичные эффекты применения
Поры типа А	Диаметр <10, круглый	0,01–0,5	Частицы не плотно упакованы и жидкофазное спекание недостаточно	Снижение прочности <5%, риск появления микротрещин	Нанопорошок WC (0,2–0,8 мкм), ГИП (150 МПа)	Zhuzhou Diamond YG6, пористость снижена до A02, прочность увеличена на 15%
Поры типа В	Диаметр 10–25, неравномерный	0,1–1	Неравномерное нажатие, остатки смазки	мм ³ увеличение износа	Высокое давление СІР (300 МПа), вакуумное спекание (<10 ⁻³ Па)	Sandvik YG8, пористость снижена до A00, прочность увеличена на 20%
Поры типа С	Диаметр>25, агломерация WC	0,05–0,5	Углеродный дисбаланс, аномальный рост WC	мм ³ увеличение износа	Точный C/W (0,98–1,02), контроль температуры (±10°C)	Kennametal K313, пористость снижена до A00, износостойкость повышена на 30%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поры	Диаметр 10–100, сферический	0,01–0,2	Улавливание газа, загрязненная атмосфера	Плотность снижена на 0,1–0,3 г/см ³ , ударная вязкость снижена на 20%	Высокочистое сырье (O<0,05%), водородное спекание	Cerazit	CTF,
						пористость до <0,01%, службы увеличен на 40%	снижена срок

проиллюстрировать:

Характеристики: Описывает размер, форму и распределение пор.

Пористость: Диапазон объемной доли, основанный на металлографическом анализе (ISO 4505).

Влияние на эксплуатационные характеристики: Количественная оценка влияния на прочность, ударную вязкость, износостойкость (ASTM G65).

Меры оптимизации: Предложить усовершенствования в отношении сырья, формования, спекания и последующей обработки на основе причин.

Типичные эффекты применения: перечисляются случаи производителей и данные об улучшении производительности.

7. Заключение

Пористость в твердом сплаве является ключевым дефектом, который влияет на производительность. Она делится на тип А (микропоры), тип В (большие поры), тип С (поры дефектов карбида) и поры, которые вызваны дефектами сырья, неравномерным формованием и недостаточным спеканием соответственно. Пористость снижает прочность (на 10-30%), ударную вязкость и износостойкость (объем износа увеличивается на 20-50 мм³). За счет оптимизации сырья (нано WC, высокая чистота), формования (высокое давление HIP), спекания (HIP, вакуум) и последующей обработки (покрытие) пористость можно контролировать до <0,05%, что значительно улучшает производительность.

Будущие технологические усовершенствования, такие как сверхтонкие нанопорошки, оптимизированные для ИИ процессы, микроволновое спекание и нанопокртия, снизят пористость до <0,01%, увеличат твердость до HV1800 и продлят срок службы инструмента в 4 раза. Эти технологии будут способствовать применению твердого сплава в высокоточных режущих, горнодобывающих и износостойких деталях. Производителям необходимо отдать приоритет HIP и технологии точного контроля температуры для достижения качества уровня A00, одновременно изучая предварительное формование 3D-печатью и формование без смазки для удовлетворения сложных потребностей.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

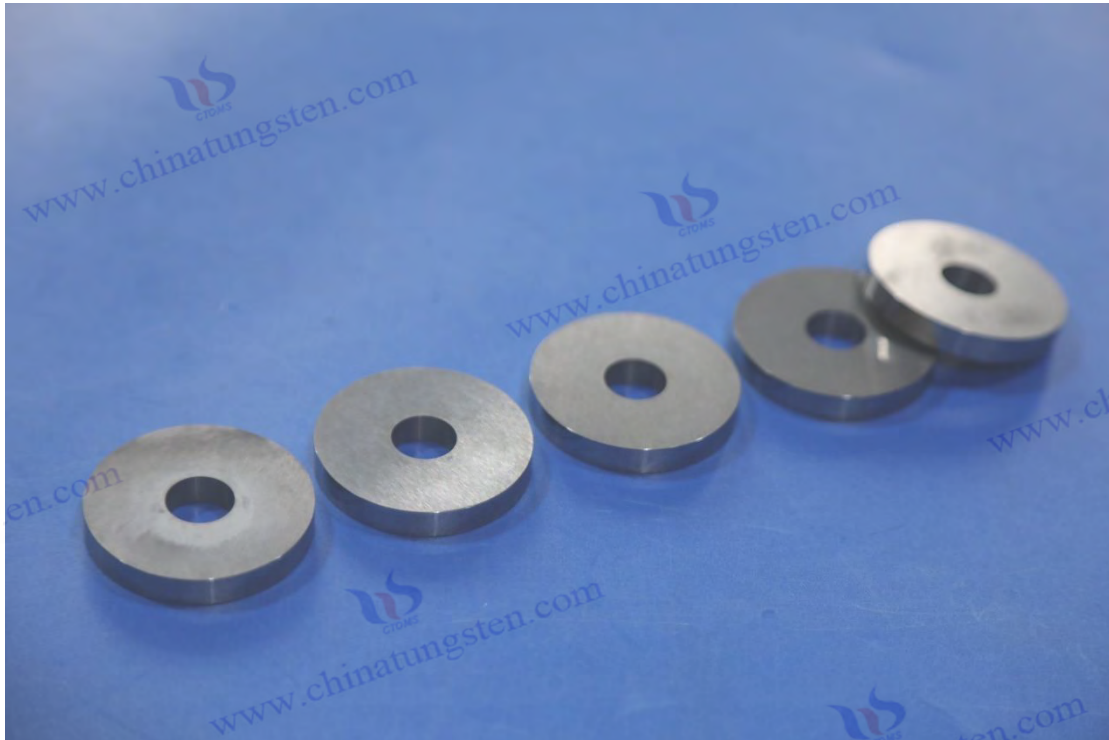
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

GB/T 3488.1-2019

Оценка микроструктуры твердого сплава
Часть 1: Пористость и несвязанный углерод

1. Область применения

Настоящий стандарт определяет метод микроскопической оценки пористости и несвязанного углерода в твердом сплаве и применим к:

Твердый сплав на основе карбида вольфрама (WC), содержащий связующую фазу кобальта (Co), никеля (Ni) или железа (Fe), может быть дополнен карбидом титана (TiC), карбидом тантала (TaC), карбидом ниобия (NbC).

Твердый сплав, полученный методом порошковой металлургии, включая спекание, горячее изостатическое прессование (ГИП) и нанесение покрытий на изделия.

Такие области применения, как режущие инструменты, горные кирки, штампы, изнашиваемые детали и т. д.

Не подходит для твердых сплавов на основе WC и материалов, не полученных методом порошковой металлургии.

2. Определения

Твердый сплав: композитный материал, в котором WC является основной твердой фазой, а Co/Ni/Fe — связующей фазой.

Пористость: поры или воздушные зазоры внутри материала, выраженные в виде объемной

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

доли.

Несвязанный углерод: свободный углерод (C) или η -фаза, вызванная дефицитом углерода ($W3Co3C$, $W6Co6C$).

Металлографическая оценка: Рассмотрите полированную поверхность образца под микроскопом и оцените распределение и содержание пор и несвязанного углерода.

3. Классификация пористости и несвязанного углерода

3.1 Пористость

Поры типа А:

Диаметр <10 мкм, круглые или почти круглые, равномерно распределены.

Источник: Частицы неплотно упакованы, а спекание в жидкой фазе недостаточно.

Поры типа В:

Диаметр составляет 10–25 мкм, форма неправильная (например, эллиптическая, многоугольная).

Источник: неравномерное прессование и испарение остатков смазки.

Устьяца: 10–100 мкм в диаметре, круглые или сферические.

Источник: Улавливание газа во время спекания (кислорода, азота или летучих веществ).

3.2 Несвязанный углерод и η -фаза

Дефекты типа С (несвязанный углерод) :

Частицы свободного углерода (C), размером > 25 мкм, черные и нерегулярные.

Источник: Избыток углерода при спекании ($C/W > 1,02$).

η -фаза: соединение карбида кобальта ($W3Co3C$ или $W6Co6C$), размер >25 мкм, серовато-белый.

Источник: Недостаточное количество углерода при спекании ($C/W < 0,98$).

4. Метод оценки

Пористость и несвязанный углерод классифицируются по объемной доле и делятся на три категории: А, В и С, каждая из которых имеет значения от 00 (отсутствие дефектов) до 08 (наивысшее содержание дефектов). Пористость классифицируется отдельно.

4.1 Поры типа А

Объемная доля: 0–0,2%, диаметр <10 мкм.

Оценка:

A00: Нет видимых пор (<0,01%).

A02: 0,02%.

A04: 0,05%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

A06: 0,1%.

A08: 0,2%.

Оценка: Площадь пор на квадратный миллиметр.

4.2 Поры типа В

Объемная доля: 0–0,2%, диаметр 10–25 мкм .

Оценка:

B00: Нет видимых пор (<0,01%).

B02: 0,02%.

B04: 0,05%.

B 06 : 0,1%.

B08: 0,2%.

Оценка: Площадь пор на квадратный миллиметр.

4.3 Дефекты С-типа (несвязанный углерод/η-фаза)

Объемная доля: 0–0,2%, размер >25 мкм .

Оценка:

C00: Нет несвязанного углерода или η-фазы (<0,01%).

C02: 0,02%.

C04: 0,05%.

C06: 0,1%.

C08: 0,2%.

Оценка: Соотношение площади дефектов на квадратный миллиметр, различие между свободным углеродом (черный) и η-фазой (серо-белый).

4.4 Поры

Объемная доля: 0–0,2%, диаметр 10–100 мкм .

Оценка:

G00: Нет видимых пор (<0,01%).

G02: 0,02%.

G04: 0,05%.

G06: 0,1%.

G08: 0,2%.

Оценка: Процент площади пор на квадратный миллиметр.

4.5 Требования к классификации

Объемная доля: Площадь пор/дефектов подсчитывается с помощью металлографического микроскопа с точностью $\pm 0,01\%$.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Площадь наблюдения: не менее 1 мм², рекомендуется 5 мм².

Устьяца: сферические поры размером 10–100 мкм регистрировались по отдельности.

5. Методы испытаний

5.1 Подготовка образца

Резка: Разрежьте образцы (размером 10 × 10 мм), избегая трещин.

Монтаж: Фиксация образца смолой.

полировка:

Для шлифования поэтапно использовалась алмазная наждачная бумага (зернистость 5–1 мкм).

Полировать до шероховатости поверхности Ra<0,1 мкм без царапин.

Избегайте повреждения пор из-за чрезмерной полировки.

Очистка: этанол или ультразвуковая очистка для удаления загрязнений.

5.2 Микроскопическое наблюдение

Оборудование: Световой микроскоп, увеличение 100–1000х, разрешение <0,5 мкм.

Источник света: яркое поле освещения, отрегулируйте контрастность, чтобы различать:

Пористость: Черный.

Несвязанный углерод: черный.

η фаза: серовато-белый.

Матрица WC/Co: белая/серая.

Зона наблюдения: Случайным образом выберите не менее 5 полей зрения (общая площадь > 1 мм²).

Записывать:

Поры типа А: подсчитайте площадь пор <10 мкм.

Поры типа В: подсчитайте площадь пор размером 10–25 мкм.

Дефекты типа С: Различают свободный углерод и η-фазу, регистрируют площадь дефекта >25 мкм.

Регистрировалась площадь сферических пор размером 10–100 мкм.

5.3 Анализ данных

Анализ изображений: используйте программное обеспечение для анализа изображений, чтобы рассчитать соотношение площади пор/дефектов (точность ± 0,01%).

Ручной анализ: подсчитайте площадь пор/дефектов через сетку окуляра микроскопа, чтобы облегчить оценку.

Оценка: Оценки определяются по шкале A00–A08, B00–B08, C00–C08, G00–G08.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.4 Условия испытаний

Ошибка пористости: <0,01%.

Ошибка дефекта типа С: <0,01%.

Окружающая среда: температура 20±5°C, влажность <60%, без вибрации.

Оператор: Требуется обучение микроскопическому анализу.

6. Требования к приему

6.1 Режущие инструменты

Требования: A02/B00/C00/G00 (пористость <0,02%, отсутствие пор типа В, дефектов типа С и пор).

6.2 Горные кирки

Требования: A04/B04/C00/G04 (пористость <0,1%, отсутствие дефектов типа С, следы пор).

6.3 Плесень

Требования: A04/B04/C00/G04 (пористость <0,1%, отсутствие дефектов типа С, следы пор).

6.4 Износостойкие детали

Требования: A06/B06/C02/G06 (пористость <0,2%, отсутствие следов углерода и пор).

7. Краткое изложение основных положений стандарта

элементы	Содержание мкм	Классификация	Оценка	Метод испытания	Требования к приему
Пористость	Тип А (<10), Тип В (10–25), Устьичный (10–10)	Тип А, Тип В, поры	A00–A08 (0–0,2 %), B00–B08 (0–0,2 %), G00–G08 (0–0,2 %)	Металлографический микроскоп (100–1000 раз), анализ изображений (точность ±0,01%)	Инструмент: A02/B00/G00; Выборка/Форма: A04/B04/G04
Несвязанный углерод/η-фаза	Тип С Свободный углерод или η-фаза, >25	Тип С	C00–C08 (0–0,2%)	Металлографическое наблюдение, различение свободного углерода / черного и η-фазы / серо-белого цвета	Инструмент/выколотка/матрица: C00; износостойкие детали: C02
Требования к тестированию	Полированный образец (Ra<0,1), площадь наблюдения>1 мм ²	Тип А/В/С, отверстие для воздуха	Объемная доля	Разрешение микроскопа <0,5 мкм, окружающая среда 20±5°C	Пористость/ошибка дефекта типа С <0,01%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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

приложение:

ASTM B276-05 (2021) Метод испытания пористости твердого сплава

1. Область применения

Настоящий стандарт определяет метод испытаний на пористость и микродефекты в твердом сплаве и применим к:

Твердый сплав на основе карбида вольфрама (WC), содержащий связующую фазу кобальта (Co), никеля (Ni) или железа (Fe), может быть дополнен карбидом титана (TiC), карбидом тантала (TaC), карбидом ниобия (NbC).

Твердый сплав, полученный методом порошковой металлургии, включая спекание, горячее изостатическое прессование (ГИП) и нанесение покрытий на изделия.

Такие области применения, как режущие инструменты, горные кирки, штампы, изнашиваемые детали и т. д.

Не подходит для твердых сплавов на основе WC и материалов, не полученных методом порошковой металлургии.

2. Определения

Твердый сплав: композитный материал, в котором WC является основной твердой фазой, а Co/Ni/Fe — связующей фазой.

Пористость: отверстия или воздушные зазоры внутри материала, выраженные в виде объемной доли или количества пор на единицу площади.

Микродефекты: поры, несвязанный углерод или η-фаза (W₃Co₃C, W₆Co₆C).

Металлографический анализ: рассмотрите полированную поверхность образца через микроскоп и оцените распределение и содержание пор и дефектов.

Измерение плотности: Пористость оценивалась косвенно путем измерения плотности образца с использованием метода Архимеда.

3. Классификация пористости и микроскопических дефектов

3.1 Пористость

Поры типа А:

Диаметр <10 мкм, круглые или почти круглые, равномерно распределены.

Источник: Частицы неплотно упакованы, а спекание в жидкой фазе недостаточно.

Поры типа В:

Диаметр составляет 10–25 мкм, форма неправильная (например, эллиптическая, многоугольная).

Источник: Неравномерное прессование и испарение остатков смазки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поры:

Диаметр 10–100 мкм , круглые или сферические.

Источник: Улавливание газа во время спекания (кислорода, азота или летучих веществ).

3.2 Микроскопические дефекты

Дефекты типа С (несвязанный углерод/ η -фаза):

Несвязанный углерод: частицы свободного углерода (С), размером > 25 мкм , черные и неправильной формы, возникающие из-за избытка углерода ($C/W > 1,02$).

η -фаза: соединение карбида кобальта (W_3Co_3C или W_6Co_6C), размер > 25 мкм, серовато-белый цвет, образовавшийся из-за дефицита углерода ($C/W < 0,98$).

4. Метод оценки

Пористость и микроскопические дефекты классифицируются по объемной доле или количеству пор на единицу площади по трем категориям: А, В и С, причем каждая категория имеет ранг от 1 (наименьшее содержание дефектов) до 5 (наибольшее содержание дефектов).

4.1 Поры типа А

Объемная доля: 0–0,5%, диаметр < 10 мкм .

Оценка:

A1: Объемная доля $< 0,01\%$ или < 5 пор/ mm^2 .

A2: Объемная доля 0,01–0,05% или 5–10 пор/ mm^2 .

A3: Объемная доля 0,05–0,1% или 10–20 пор/ mm^2 .

A4: Объемная доля 0,1–0,3% или 20–50 пор/ mm^2 .

A5: Объемная доля 0,3–0,5% или > 50 пор/ mm^2 .

Оценка: Количество пор на квадратный миллиметр (< 10 мкм) или процент площади.

4.2 Поры типа В

Объемная доля: 0–1%, диаметр 10–25 мкм .

Оценка:

B1: Объемная доля $< 0,01\%$ или < 2 пор/ mm^2 .

B2: Объемная доля 0,01–0,1% или 2–5 пор/ mm^2 .

B3: Объемная доля 0,1–0,3% или 5–10 пор/ mm^2 .

B4: Объемная доля 0,3–0,6% или 10–20 пор/ mm^2 .

B5: Объемная доля 0,6–1,0% или > 20 пор/ mm^2 .

Оценка: Количество пор на квадратный миллиметр (10–25 мкм) или процент площади.

4.3 Дефекты С-типа (несвязанный углерод/ η -фаза)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Объемная доля: 0–0,5%, размер >25 мкм .

Оценка:

C1: Объемная доля <0,01% или отсутствие видимых дефектов.

C2: Объемная доля 0,01–0,05% или <1 дефект/мм² .

C3: Объемная доля 0,05–0,1% или 1–2 дефекта/мм² .

C4: Объемная доля 0,1–0,3% или 2–5 дефектов/мм² .

C5: Объемная доля 0,3–0,5% или >5 дефектов/мм² .

Оценка: Соотношение площади дефектов на квадратный миллиметр, различие между свободным углеродом (черный) и η-фазой (серо-белый).

4.4 Требования к классификации

Объемная доля: Площадь пор/дефектов подсчитывается с помощью металлографического микроскопа с точностью ±0,01%.

Площадь наблюдения: не менее 1 мм² , рекомендуется 5 мм² .

Устьяца: Сферические поры размером 10–100 мкм регистрировались по отдельности и классифицировались как тип A/B.

5. Методы испытаний

5.1 Металлографический анализ

5.1.1 Подготовка образца

Резка: Разрежьте образцы (размером 10 × 10 мм), избегая трещин.

Монтаж: Фиксация образца смолой.

полировка:

Для шлифования поэтапно использовалась алмазная наждачная бумага (зернистость 5–1 мкм).

Отполировать до шероховатости поверхности Ra<0,05 мкм, без царапин.

Избегайте повреждения пор из-за чрезмерной полировки.

Очистка: этанол или ультразвуковая очистка для удаления загрязнений.

5.1.2 Микроскопическое наблюдение

Оборудование: Оптический микроскоп или сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), увеличение 200–1500x, разрешение < 0,5 мкм .

Источник света: яркое поле освещения, отрегулируйте контрастность, чтобы различать:

Пористость: Черный.

Несвязанный углерод: черный.

η фаза: серовато-белый.

Матрица WC/Co: белая/серая.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Зона наблюдения: Случайным образом выберите не менее 5 полей зрения (общая площадь > 1 мм²).

Записывать:

Поры типа А: подсчитайте количество или площадь пор <10 мкм.

Поры типа В: подсчитайте количество или площадь пор размером 10–25 мкм.

Дефекты типа С: Различают свободный углерод и η-фазу, регистрируют площадь дефекта >25 мкм.

5.1.3 Анализ данных

Ручной анализ: подсчитайте количество пор/дефектов через сетку окуляра микроскопа и рассчитайте объемную долю или количество/единицу площади.

Анализ изображений: используйте программное обеспечение для анализа изображений, чтобы рассчитать соотношение площади пор/дефектов (точность ± 0,01%).

Оценка: Оценки определяются на основе уровней А1–А5, В1–В5 и С1–С5.

5.2 Измерение плотности

Принцип: Метод Архимеда измеряет плотность образца и сравнивает ее с теоретической плотностью (12–15,6 г/см³ для WC- Co) для оценки пористости.

шаг:

Измерьте массу сухого образца (точность ± 0,001 г) и массу в воде.

Плотность = сухой вес / (сухой вес - вес в воде) × плотность жидкости.

Пористость = (теоретическая плотность - измеренная плотность) / теоретическая плотность × 100%.

Требования: Точность: ±0,01 г/см³, повторите измерение 3 раза и возьмите среднее значение.

5.3 Условия испытаний

Ошибка пористости: <0,02%.

Ошибка дефекта типа С: <0,01%.

Окружающая среда: температура 23±2°C, влажность <60%, без вибрации.

Оператор: Требуется обучение металлографическому анализу или измерению плотности.

6. Требования к приему

6.1 Авиационные режущие инструменты

Требования: А1/В1/С1 (пористость <0,01%, без существенных дефектов).

6.2 Горные кирки

Требования: А3/В3/С1 (пористость <0,2%, без дефектов типа С).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

6.3 Износостойкие детали

Требования: A4/B4/C2 (пористость <0,6%, отсутствие следов углерода).

6.4 Военные части

Требования: A1/B1/C1 (пористость <0,01%, без существенных дефектов).

7. Краткое изложение основных положений стандарта

элементы	содержание	Классификация	Оценка	Метод испытания	Требования к приему
Пористость	Тип А (<10 мкм), Тип В (10–25 мкм), Устьичный (10–100 мкм)	Тип А Тип Б	A1–A5 (0–0,5 %), B1–B5 (0–1,0 %)	Металлографический микроскоп (200–1500х), точность анализа изображения ±0,01%; измерение плотности ±0,01 г/см ³	Авиационный инструмент: A1/B1; отмычка: A3/B3
Микроскопические дефекты	Тип С (несвязанный углерод или η-фаза, >25 мкм)	Тип С	C1–C5 (0–0,5%)	Металлографическое наблюдение, различающее свободный углерод (черный) и η-фазу (серовато-белый)	Авиация/Военная промышленность: С1; Износостойкие детали: С2
Требования к тестированию	Полированный образец (Ra<0,05мкм), площадь наблюдения>1 мм ²	Тип А/Б/С	Объемная доля или количество пор на единицу площади	Разрешение микроскопа <0,5 мкм, окружающая среда 23±2°C	Ошибка пористости <0,02%, ошибка дефекта типа С <0,01%

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

приложение:

ИСО 4505:1978

Микроскопическая оценка пористости и несвязанного углерода в твердом сплаве

1. Область применения

Настоящий стандарт определяет метод микроскопической оценки пористости и несвязанного углерода в твердом сплаве и применим к:

Твердый сплав на основе карбида вольфрама (WC), содержащий связующую фазу кобальта (Co), никеля (Ni) или железа (Fe), может быть дополнен карбидом титана (TiC), карбидом тантала (TaC), карбидом ниобия (NbC).

Твердый сплав, полученный методом порошковой металлургии, включая спекание, горячее изостатическое прессование (ГИП) и нанесение покрытий на изделия.

Такие области применения, как режущие инструменты, горные кирки, штампы, изнашиваемые детали и т. д.

Не подходит для твердых сплавов на основе WC и материалов, не полученных методом порошковой металлургии.

2. Определения

Твердый сплав: композитный материал, в котором WC является основной твердой фазой, а Co/Ni/Fe — связующей фазой.

Пористость: поры или воздушные зазоры внутри материала, выраженные в виде объемной доли.

Несвязанный углерод: свободный углерод (C) или η-фаза, вызванная дефицитом углерода (W₃Co₃C, W₆Co₆C).

Металлографическая оценка: Рассмотрите полированную поверхность образца под микроскопом и оцените распределение и содержание пор и несвязанного углерода.

3. Классификация пористости и несвязанного углерода

3.1 Пористость

Поры типа А:

Диаметр <10 мкм, круглые или почти круглые, равномерно распределены.

Источник: Частицы неплотно упакованы, а спекание в жидкой фазе недостаточно.

Поры типа В:

Диаметр составляет 10–25 мкм, форма неправильная (например, эллиптическая, многоугольная).

Источник: неравномерное прессование и испарение остатков смазки.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Поры:

Диаметр 10–100 мкм , круглые или сферические, классифицируются как тип А/В.

Источник: Улавливание газа во время спекания (кислорода, азота или летучих веществ).

3.2 Несвязанный углерод и η-фаза

Дефекты типа С (несвязанный углерод):

Частицы свободного углерода (С), размером > 25 мкм , черные и нерегулярные.

Источник: Избыток углерода при спекании ($C/W > 1,02$).

η фаза:

Карбиды — соединения кобальта (W_3Co_3C или W_6Co_6C), размер > 25 мкм, грязно-белые.

Источник: Недостаточное количество углерода при спекании ($C/W < 0,98$).

4. Метод оценки

Пористость и несвязанный углерод классифицируются по объемной доле или количеству пор и подразделяются на три категории: А, В и С, где каждая категория имеет значения от 00 (отсутствие дефектов) до 08 (наивысшее содержание дефектов).

4.1 Поры типа А

Объемная доля: 0–0,2%, диаметр <10 мкм .

Оценка:

A00: Нет видимых пор (<0,01%).

A02: 0,02%.

A04: 0,05%.

A06: 0,1%.

A08: 0,2%.

Оценка: Количество пор на квадратный миллиметр (<10 мкм) или процент площади.

4.2 Поры типа В

Объемная доля: 0–0,2%, диаметр 10–25 мкм .

Оценка:

B00: Нет видимых пор (<0,01%).

B02: 0,02%.

B04: 0,05%.

B06: 0,1%.

B08: 0,2%.

Оценка: Количество пор на квадратный миллиметр (10–25 мкм) или процент площади.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.3 Дефекты С-типа (несвязанный углерод/η-фаза)

Объемная доля: 0–0,2%, размер >25 мкм .

Оценка:

C00: Нет несвязанного углерода или η-фазы (<0,01%).

C02: 0,02%.

C04: 0,05%.

C06: 0,1%.

C08: 0,2%.

Оценка: Соотношение площади дефектов на квадратный миллиметр, различие между свободным углеродом (черный) и η-фазой (серо-белый).

4.4 Требования к оценке

Объемная доля: Площадь пор/дефектов подсчитывается с помощью металлографического микроскопа с точностью $\pm 0,01\%$.

Площадь наблюдения: не менее 1 мм², рекомендуется 5 мм².

Поры: Сферические поры размером 10–100 мкм, подсчитанные как тип A/B, регистрировались отдельно.

5. Методы испытаний

5.1 Подготовка образца

Резка: Разрежьте образцы (размером 10 × 10 мм), избегая трещин.

Монтаж: Фиксация образца смолой.

полировка:

Для шлифования поэтапно использовалась алмазная наждачная бумага (зернистость 5–1 мкм).

Полировать до шероховатости поверхности Ra < 0,1 мкм без царапин.

Избегайте повреждения пор из-за чрезмерной полировки.

Очистка: этанол или ультразвуковая очистка для удаления загрязнений.

5.2 Микроскопическое наблюдение

Оборудование: Световой микроскоп, увеличение 100–1000х, разрешение < 0,5 мкм .

Источник света: яркое поле освещения, отрегулируйте контрастность, чтобы различать:

Пористость: Черный.

Несвязанный углерод: черный.

η фаза: серовато-белый.

Матрица WC/Co: белая/серая.

Зона наблюдения: Случайным образом выберите не менее 5 полей зрения (общая площадь > 1 мм²).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Записывать:

Поры типа А: подсчитайте количество или площадь пор <10 мкм.

Поры типа В: подсчитайте количество или площадь пор размером 10–25 мкм .

Дефекты типа С: Различают свободный углерод и η-фазу, регистрируют площадь дефекта >25 мкм.

5.3 Анализ данных

Ручной анализ: подсчитайте количество пор/дефектов через сетку окуляра микроскопа и рассчитайте объемную долю.

Анализ изображений: используйте программное обеспечение для анализа изображений, чтобы рассчитать соотношение площади пор/дефектов (точность ± 0,01%).

Оценки: Оценки определяются на основе А00–А08, В00–В08 и С00–С08.

5.4 Условия испытаний

Ошибка пористости: <0,02%.

Ошибка дефекта типа С: <0,01%.

Окружающая среда: температура 20±5°C, влажность <60%, без вибрации.

Оператор: Требуется обучение микроскопическому анализу.

6. Требования к приему

6.1 Режущие инструменты

Требования: А02/В00/С00 (пористость <0,02%, отсутствие пор типа В и дефектов типа С).

6.2 Горные кирки

Требования: А04/В04/С00 (пористость <0,1%, без дефектов типа С).

6.3 Износостойкие детали

Требования: А06/В06/С02 (пористость <0,2%, отсутствие следов углерода).

6.4 Медицинские ножи

Требования: А00/В00/С00 (пористость <0,01%, без дефектов).

7. Краткое изложение основных положений стандарта

элементы	Содержание (мкм)	Классификация	Оценка	Метод испытания	Требования к приему
Пористость	Тип А (<10), Тип В (10–25), Устьичный (10–100)	Тип А Тип Б	А00–А08 (0–0,2%), В00–В08 (0–0,2%)	Металлографический микроскоп (100–1000 раз), анализ изображений (точность ±0,01%)	Инструмент: А02/В00; Отмычка: А04/В04; Медицина: А00/В00
Несвязанный	Тип С (свободный)	Тип С	С00–С08 (0–	Металлографическое	Инструмент/режущие

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

углерод/η-фаза	углерод или η-фаза, >25)		0,2%)	наблюдение, различающее свободный углерод (черный) и η-фазу (серовато-белый)	зубья: изнашиваемые детали: C00; C02
Требования к тестированию	Полированный образец (Ra<0,1), площадь наблюдения>1 мм ²	Тип А/Б/С	Объемная доля или количество пор на единицу площади	Разрешение микроскопа <0,5 мкм, окружающая среда 20±5°C	Ошибка пористости <0,02%, ошибка дефекта типа С <0,01%

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

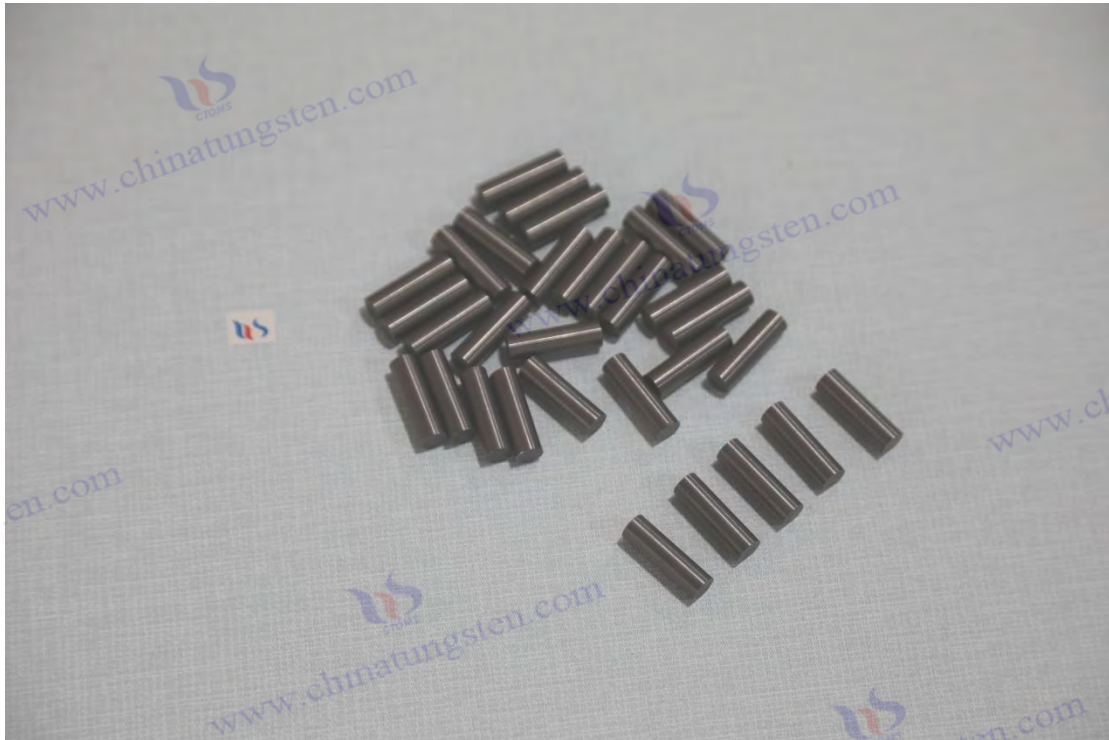
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

Эффекты и сравнение вспомогательных карбидов из цементированного карбида (TiC , TaC , NbC)

1. Обзор твердых сплавов и вспомогательных твердых сплавов

Твердый сплав — это композитный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве основной твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы. Он изготавливается методом порошковой металлургии. Он имеет высокую твердость (HV1000-1800) и отличную износостойкость. Он широко используется в режущих инструментах, горнодобывающих кирках и износостойких деталях. Для оптимизации производительности в твердый сплав часто добавляют вспомогательные карбиды, такие как карбид титана (TiC), карбид тантала (TaC) и карбид ниобия (NbC), а содержание обычно составляет 5-20% (массовая доля). Эти вспомогательные карбиды расширяют область применения твердого сплава за счет повышения твердости, износостойкости, красностойкости и стойкости к окислению.

Роль вспомогательных карбидов зависит от их физических и химических свойств (таких как твердость, температура плавления, кристаллическая структура) и синергетического эффекта с WC и связующей фазой. TiC, TaC и NbC — все это кубические карбиды с высокой твердостью (HV2000-3000) и лучшей термической стабильностью, чем WC (гексагональная система, HV1500-2000). Они улучшают характеристики цементированного карбида через механизм твердого раствора или упрочнения частиц. Ниже приводится подробный анализ роли каждого вспомогательного карбида и сравнение их характеристик с помощью таблицы.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

2. Роль вспомогательных карбидов

2.1 Карбид титана (TiC)

Роль вспомогательных карбидов

Улучшить твердость

TiC имеет более высокую твердость (HV2800–3200), чем WC. Добавление 5–15% может повысить твердость твердого сплава до HV1400–1600, что делает его пригодным для обработки материалов высокой твердости (например, закаленная сталь, HV600–800).

Повышенная износостойкость

TiC (1–5 мкм) мелкие и однородные, что снижает износ (10–20 мм³ в тесте ASTM G65) и продлевает срок службы инструмента.

Улучшенные антиоксидантные свойства

TiC образует защитный слой TiO₂ при высоких температурах (>800°C), который замедляет окислительный износ и подходит для высокоскоростной резки.

Уменьшение плотности: плотность TiC (4,9 г/см³) намного ниже, чем у WC (15,6 г/см³), что снижает вес твердого сплава (на 10–15%) и подходит для легких аэрокосмических компонентов.

Ограничения вспомогательных карбидов

Снижение вязкости: при добавлении TiC >15% вязкость разрушения (K_{1c}) падает до 8–10 МПа·м^{^(1/2)}, что делает его склонным к хрупкому разрушению.

Более высокая стоимость: цена TiC выше, чем WC, что увеличивает себестоимость продукции.

Применение: TiC обычно используется в высокоскоростных режущих инструментах (например, Kennametal K313), износостойких покрытиях и компонентах аэрокосмической техники.

2.2 Карбид тантала (TaC)

Роль карбида тантала (TaC)

Улучшить красностойкость: TaC имеет более высокую температуру плавления (3880°C), чем WC (2870°C). Добавление 3-10% может поддерживать твердость цементированного карбида на уровне 1000°C (HV1200-1400), что делает его пригодным для высокотемпературной обработки (например, для нержавеющей стали и сплавов на основе никеля).

Повышенная стойкость к тепловому удару: TaC снижает коэффициент теплового расширения (6,3×10⁻⁶ /K против WC 5,2×10⁻⁶ /K), уменьшает образование термических трещин и подходит для прерывистой резки.

Улучшенная антиадгезия: TaC имеет низкую поверхностную энергию, что снижает адгезию материалов заготовки при резании, снижает коэффициент трения (0,2–0,3) и улучшает качество поверхности.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Ограничения карбида тантала (TaC)

Дороговизна: TaC намного дороже WC и TiC , что ограничивает его широкомасштабное применение.

Ограниченное увеличение твердости: твердость TaC (HV1800–2000) ниже, чем у TiC , и увеличение твердости незначительно (около 5–10%).

Применение: TaC в основном используется в высококачественных режущих инструментах (например, пластинах Sandvik с покрытием PVD), обработке лопаток авиационных турбин и горячей объемной штамповке.

2.3 Карбид ниобия (NbC)

Роль карбида ниобия (NbC)

Измельчение зерна: NbC (размер частиц 0,5–2 мкм) подавляет рост зерна WC (контролируется на уровне 1–3 мкм), повышает прочность твердого сплава (предел прочности на разрыв увеличивается на 10–15 %) и ударную вязкость (K_{IC} увеличивается до 12–15 МПа·м^{1/2}).

Повышенная коррозионная стойкость: NbC образует защитный слой Nb₂O₅ в кислой среде (pH 2–4) с потерей веса в солевом тумане <0,1 мг/см² , что делает его пригодным для химического оборудования и морской техники.

Улучшенная стойкость к абразивному износу: NbC образует твердый раствор с WC, увеличивая прочность границы раздела фаз и снижая потери на износ на 15–25 мм³ (ASTM G65).

Ограничения карбида ниобия (NbC)

Недостаточная красностойкость: хотя NbC имеет высокую температуру плавления (3600 °C), его окисление ускоряется при температуре >900 °C, что ограничивает его применение при высоких температурах.

Ограниченные ресурсы: запасы ниобиевой руды ограничены (около 4,3 млн тонн во всем мире, 70% в Бразилии), а цены колеблются.

Применение: NbC обычно используется в горнодобывающих кирках, износостойких деталях и коррозионно-стойких формах (например, сорт Zhuzhou Diamond YN8).

2.4 Синергия

Добавить комбинацию

TiC , TaC и NbC часто используются в сочетании (например, TiC 5% + TaC 3% + NbC 2%) для синергетического улучшения твердости, износостойкости и красностойкости. Например, вставки Sandvik GC2030 дополнены композитом TiC-TaC-NbC с твердостью HV1500 и продлением срока службы на 30%.

Упрочнение твердого раствора

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

TiC, TaC, NbC и WC образуют твердый раствор (W, Ti, Ta, Nb)C, а искажение решетки повышает твердость и сопротивление деформации (предел текучести увеличивается на 20%).

Градиентная структура

Контролируя распределение TiC / TaC / NbC, формируется градиентный цементированный карбид с высокой поверхностной твердостью и высокой вязкостью в середине, а ударная стойкость улучшается на 25%.

3. Сравнение характеристик вспомогательных карбидов

В следующей таблице сравниваются эксплуатационные характеристики и области применения TiC. Содержание TaC и NbC в твердом сплаве на основе данных стандартных испытаний, таких как ASTM G65 и ISO 513:

Вспомогательный карбид	Твёрдость HV	Температура плавления (°C)	Плотность (г/см³)	Прочность (K _{1c} , МПа · м ^{1/2})	Стойкость к истиранию (ASTM G65, мм³)	Твёрдость при красном (°C)	Коррозионная стойкость (потеря веса в соляном тумане, мг/см²)	Стоимость (долл. США/кг)	Типичные применения
TiC	2800–3200	3160	4.9	8–10	10–20	≤900	0,2–0,3	30–50	Высокоскоростные режущие инструменты, авиационные детали
TaC	1800–2000	3880	14.3	10–12	15–25	≤1000	0,1–0,2	100–150	Высокотемпературные инструменты, горячая штамповка
Кол-во	2000–2400	3600	7.8	12–15	15–25	≤900	<0,1	50–80	Горные кирки, коррозионно-стойкие формы

проиллюстрировать:

Эксплуатационные параметры: твердость (твердость по Виккерсу HV), вязкость (трещиностойкость K_{1c}), износостойкость (потеря износа при износе ASTM G65), красностойкость (температура сохранения твердости при высокой температуре), коррозионная стойкость (потеря веса при испытании на стойкость к соляному туману).

Типичные области применения: на основе характеристик TiC, TaC и NbC перечисляют основные промышленные сценарии.

Источник данных: Справочник Sandvik, Kennametal, Белая книга Zhuzhou Diamond Technology, стандарты испытаний ASTM G65, ISO 513.

4. Преимущества, недостатки и принципы выбора вспомогательных карбидов

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1 Краткое изложение преимуществ и недостатков

ТiК

Преимущества: Самая высокая твердость, самая низкая плотность, подходит для легкой и высокоскоростной резки, хорошая стойкость к окислению.

Недостатки: более низкая прочность, более высокая стоимость, чем у WC, склонность к хрупкому разрушению из-за высокого содержания добавок.

Тс

Преимущества: Отличная красностойкость, высокая устойчивость к тепловому удару и адгезии, подходит для высокотемпературной и прерывистой резки.

Недостатки: высокая стоимость, ограниченный прирост твердости, применение ограничено стоимостью.

Кол-во

Преимущества: мелкое зерно, оптимальная коррозионная стойкость, хорошая прочность и стойкость к абразивному износу.

Недостатки: недостаточная красностойкость, ограниченные запасы ниобия и большие колебания цен.

4.2 Принципы отбора

Высокоскоростная резка (например, авиационный алюминиевый сплав, закаленная сталь)

TiC — первый выбор для повышения твердости и стойкости к окислению. Типичные марки включают K313 (TiC 10%).

Высокотемпературная обработка (например, сплавы на основе никеля, горячая штамповка)

Выберите TaC для оптимизации красностойкости и термостойкости. Типичные марки включают GC2030 (TaC 5%).

Горнодобывающая промышленность или среда, устойчивая к коррозии (например, химические формы)

NbC предпочтителен для повышения прочности и коррозионной стойкости. Типичные марки включают YN8 (NbC 3%).

Комплексное исполнение

Сочетание TiC-TaC-NbC обеспечивает баланс твердости, прочности и красностойкости и обычно встречается в высококачественных инструментах и износостойких деталях.

Сценарии, чувствительные к затратам

Контролируйте количество добавляемых TaC и NbC (<5%), сосредоточьтесь на TiC и снизьте стоимость на 10–20%.

5. Рынок и будущие тенденции

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Статус рынка

В 2025 году рынок цементированных карбидов будет стоить около 18 миллиардов долларов, при этом вспомогательные карбиды будут составлять 20–30% стоимости сырья. Наиболее широко используется TiC (составляет 60%), в то время как на TaC и NbC приходится 15% и 10% соответственно из-за ограничений по стоимости и ресурсам.

Будущие тенденции

Нанокарбид

Наномасштабный TiC / NbC (<0,5 мкм) повышает твердость до HV1600–1800 и прочность на 20% и, как ожидается, займет 15% рынка в 2027 году.

Экологичное производство

Переработка TiC / TaC / NbC (степень переработки > 80%), снижение затрат на 15% и сокращение выбросов углекислого газа на 25%.

Интеллектуальный дизайн

ИИ оптимизирует соотношение карбида (погрешность <2%) и повышает производительность инструмента на 30%. Например, Sandvik запустит проектирование инструмента с помощью ИИ в 2024 году.

Новые приложения

Использование TiC / TaC / NbC в новой энергетике (например, при обработке лопастей ветряных турбин), медицине (стоматологические сверла) и глубоководном бурении (коррозионно-стойкие компоненты) растет на 10% в год.

6. Заключение

TiC, TaC и NbC в твердом сплаве значительно расширили область применения материалов за счет повышения твердости, износостойкости, красностойкости, стойкости к окислению и коррозионной стойкости. TiC подходит для высокоскоростной резки благодаря своей высокой твердости и низкой плотности, TaC подходит для высокотемпературной обработки благодаря своей превосходной красностойкости и стойкости к тепловому удару, а NbC превосходит горнодобывающую и химическую промышленность благодаря своим измельченным зернам и коррозионной стойкости. Комбинированное добавление и упрочнение твердого раствора еще больше оптимизируют производительность, но требуется баланс между стоимостью и производительностью. В будущем нанокарбиды, зеленое производство и интеллектуальный дизайн будут способствовать применению вспомогательных карбидов в высокоточных и устойчивых отраслях промышленности. При выборе вспомогательных карбидов TiC, Для достижения оптимальной производительности TaC и NbC следует разумно подбирать в соответствии с условиями обработки, экологическими требованиями и ограничениями по стоимости.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

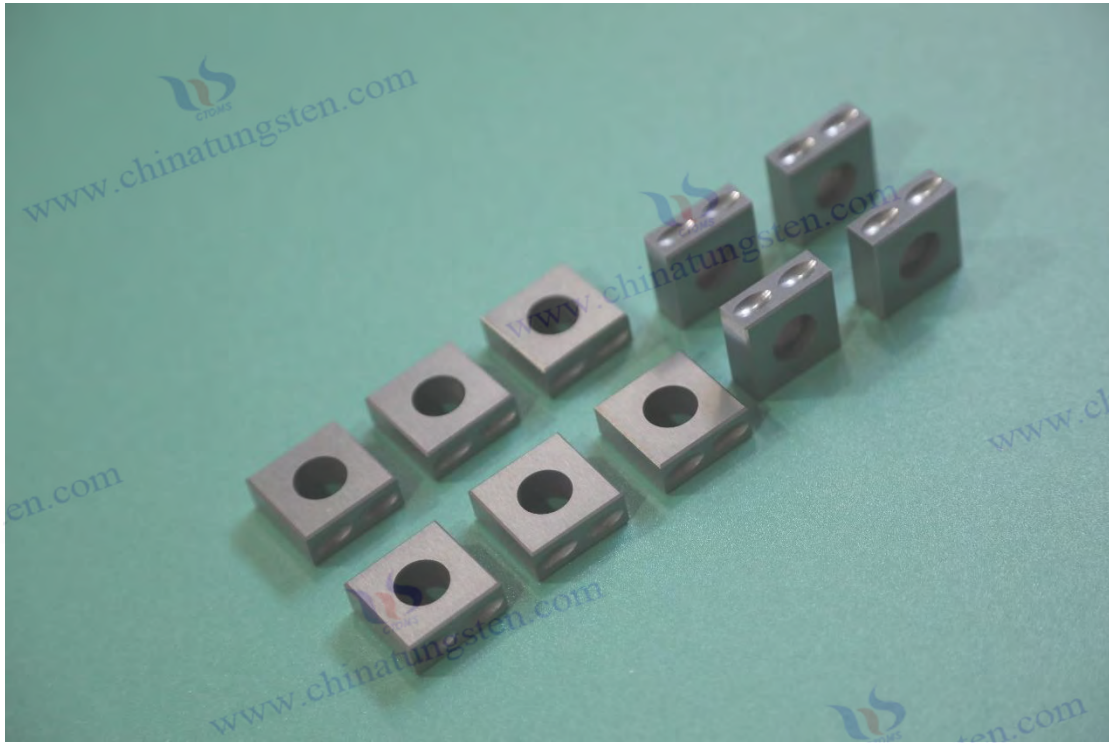
WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

Типы и функции связующей фазы цементированного карбида

1. Обзор

Благодаря высокой твердости (1400-2200 HV), износостойкости и прочности на изгиб (1,5-2,5 ГПа) твердый сплав стал краеугольным камнем режущих инструментов, форм и горнодобывающих инструментов. Его производительность обусловлена синергией твердой фазы (например, WC) и связующей фазы. Связующая фаза действует как «связующее» и «настройщик», соединяя частицы твердой фазы, придавая прочность, коррозионную стойкость и технологические свойства. С момента изобретения твердого сплава в Германии в 1923 году связующая фаза расширилась от одного кобальта до никеля, железа, кобальт-никелевых сплавов и т. д. В последние годы наносвязующие фазы, многоэлементные сплавы (например, Co+Mo+ Ni) и оптимизация покрытий значительно улучшили производительность. В данной статье рассматриваются типы, функции, микроструктуры, сравнение марок, взаимодействие покрытий, меры оптимизации и применение связующих фаз в сочетании со стандартами (такими как GB/T 3849, ISO 4499).

2. Тип фазы связывания

2.1 Кобальт (Co)

Характеристики: более 90%, содержание 620%, структура ГЦК, угол смачивания $<10^\circ$, температура плавления 1495°C .

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Свойства: Твердость 1300-1500 HV, KIC 812 МПа·м^{1/2}, прочность на изгиб 22,5 ГПа .

Применение: режущие инструменты (YG6), формы (YG15), горнодобывающая промышленность (YG8).

Преимущества и недостатки: высокая прочность, пористость <0,01%, но скорость коррозии 0,01 мм/год, высокая стоимость (3040 долл./кг).

2.2 Никель (Ni)

Характеристики: коррозионная стойкость, содержание 515%, угол смачивания ~15°, температура плавления 1455°C.

Эксплуатационные характеристики: Скорость коррозии <0,005 мм/год, твердость ~1350 HV, KIC 1012 МПа·м^{1/2} .

Области применения: инструменты для мокрой резки, химические формы, судостроительные инструменты.

Преимущества и недостатки: высокая коррозионная стойкость, низкая стоимость (1520 долл. США/кг), несколько слабая прочность сцепления.

2.3 Железо (Fe)

Особенности: низкая стоимость, содержание 510%, угол смачивания ~20°, температура плавления 1538°C, легко образуется η-фаза.

Характеристики: Твердость ~1300 HV, прочность на изгиб 1,82,2 ГПа , скорость коррозии 0,02 мм/год.

Применение: Недорогие инструменты для горнодобывающей промышленности.

Плюсы и минусы: стоимость на 20% ниже, производительность на 10% ниже.

2.4 Кобальт-никелевый сплав (Co + Ni)

Характеристики: Сочетание прочности кобальта и коррозионной стойкости никеля, содержание составляет 615%, причем соотношение можно регулировать.

Характеристики: Твердость 1350-1450 HV, Скорость коррозии 0,007 мм/год, KIC 1012 МПа·м^{1/2} .

Применение: авиационный инструмент, химические формы.

Преимущества и недостатки: Отличная общая производительность, но соотношение необходимо оптимизировать.

2.5 Другие (Mo, Cu)

Характеристики: Mo термостоек (2623°C), Cu устойчива к коррозии (1085°C), содержание составляет <5%.

Характеристики: твердость 1200-1300 HV, прочность на изгиб 1,52 ГПа .

Применение: высокотемпературные инструменты (Mo), детали с низкой нагрузкой (Cu).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Прогресс: жаропрочность Co+Mo+Ni увеличилась на 20%, прочность нанокобальта увеличилась на 10%.

3. Эффект адгезионной фазы

3.1 Связывание твердой фазы

Механизм: Жидкофазное спекание, смачивание WC, энергия связи ~ 2 Дж/м².

Эффект: прочность на сжатие 46 ГПа, пористость <0,01%, энергосбережение 10%.

3.2 Повышение прочности и выносливости

Механизм: Пластическая деформация, препятствующая распространению трещин.

Эффект: содержание кобальта увеличилось с 6% до 15%, KIC увеличился на 50%, а прочность на изгиб увеличилась на 25%.

3.3 Регулировка жесткости

Механизм: Твердость связующей фазы низкая, а высокое содержание снижает общую твердость.

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

3.4 Повышение коррозионной стойкости

Механизм: Никель образует пассивирующий слой.

Эффект: Скорость коррозии на основе никеля <0,005 мм/год, на 50% лучше, чем у кобальта.

3.5 Повышение производительности обработки

Механизм: Жидкая фаза способствует уплотнению.

Эффект: плотность на основе кобальта >99,9%, степень усадки 1520%.

3.6 Взаимодействие с жесткими фазами

Механизм: энергия связи кобальта с WC ~ 2 Дж/ м², Cr3C2 ингибирует рост зерен.

Эффект: прочность нанокобальта увеличена на 10%.

4. Микроструктура связующей фазы

4.1 Кристаллическая структура

Кобальт: FCC (высокая пластичность) + частичная HCP (высокая твердость), быстрое охлаждение сохраняет FCC, а ударная вязкость увеличивается на 10%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Никель: стабилизирует FCC, отличная коррозионная стойкость.

Железо: ОЦК, плохая пластичность, легко образуется η-фаза.

СЭМ/ТЭМ: Фаза кобальта сетчатая (0,52 мкм), а фаза никеля относительно тонкая (0,31,5 мкм).

4.2 Возможности интерфейса

Кобальт WC: энергия связи ~2 Дж/м², прочность на изгиб увеличилась на 15%.

Никель WC: энергия связи ~1,5 Дж/м², прочность снижена на 510%.

Железо WC: Легко образует η-фазу, прочность снижается на 10–15%.

Оптимизация: Cr₃C₂ увеличивает прочность связи на 10%.

4.3 Характеристики распределения

Равномерное распределение: трещиностойкость увеличивается на 20%.

Кобальтовый бассейн: прочность снижена на 1015%.

СЭМ: однородность YG6 >95%, пул кобальта YG15 510%.

Оптимизация: шаровая мельница + Cr₃C₂, однородность увеличена на 15%.

4.4 Микроскопические дефекты

Пористость: Пористость > 0,1% снижает прочность на 20%.

η-фаза: твердость снижена на 5–10%.

Свободный углерод: прочность снижена на 10%.

ТЕМ: η-фаза в форме иглы (15 мкм), свободный углерод в форме кластера (0,52 мкм).

Оптимизация: прочность HIP увеличена на 15%.

5. Сравнение брендов

Бренд	Адгезионная фаза	содержание	Твёрдость (HV)	Прочность на изгиб (ГПа)	Прочность (KIC)	Скорость коррозии (мм/год)	приложение
YG6	кобальт	6%	1500	2.0	8	0.01	Режущие инструменты
YG8	кобальт	8%	1450	2.2	9	0.01	Инструменты для горнодобывающей промышленности
YG15	кобальт	15%	1300	2.5	12	0.01	Штамповочный штамп
YN10	никель	10%	1350	2.0	10	<0,005	Мокрая резка
YNC8	Co+Ni	8%	1400	2.3	11	0,007	Авиационные

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

							инструменты
YF10	Железо + Кобальт	10%	1300	1.9	8	0,02	Недорогие инструменты

6. Взаимодействие между связующей фазой и покрытием

6.1 Тип покрытия

TiN : Твердость 2000-2500 HV, износостойкий.

CrN : Твердость 1800-2200 HV, коррозионностойкий.

Al₂O₃: Твёрдость 2000 HV, термостойкость >1000°C.

Многослойное покрытие: TiN+Al₂O₃+TiCN, превосходные комплексные характеристики.

6.2 Механизм взаимодействия

Интерфейсное соединение: адгезия на основе кобальта + TiN увеличивается на 20%, а срок службы на основе никеля + CrN увеличивается на 50%.

Согласование теплового расширения: кобальт + TiN повышают стабильность на 15%.

Химическая стабильность: Скорость коррозии на основе никеля + CrN <0,003 мм/год.

6.3 Эффект

Износостойкость: YG6+TiN увеличивает срок службы в 3 раза.

Коррозионная стойкость: YN10+CrN удваивает срок службы.

Термостойкость: температура резания YNC8+Al₂O₃>1000°C.

7. Меры оптимизации

Выбор связующей фазы: кобальт (прочность), никель (коррозионная стойкость), Co+Ni (комбинированный).

Контролируемое содержание: 6% кобальта (ножи), 15% кобальта (формы).

Улучшенное распределение: прочность Cr₃C₂ +5%.

Оптимизированное спекание: прочность при горячем изостатическом прессовании +15%.

Покрытие: CrN коррозионная стойкость +2 раза.

8. Примеры применения

Инструмент YG6: твердость 1500 HV, срок службы 2 часа (+ TiN 6 часов).

Форма YG15: прочность на изгиб 2,5 ГПа, срок службы 120 000 раз.

Форма YN10: скорость коррозии <0,005 мм/год, срок службы 1 год (+ CrN 2 года).

Инструмент YNC8: твердость 1400 HV, срок службы 3 часа (+Al₂O₃ 4 часа).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

9. Стандарты

GB/T 3849: Магнитный тест на кобальт.

ISO 4499: Микроструктура.

ASTM B406: Прочность на изгиб.

ASTM G31: Коррозионная стойкость.

ASTM C633: Адгезия покрытия.

приложение:

Выбор типов и области применения связующих веществ в процессе смешивания твердого сплава

1. Обзор

В процессе смешивания цементированного карбида твердая фаза (WC), связующая фаза (Co) и добавки смешиваются путем мокрого измельчения или сухого смешивания, и связующее добавляется для приготовления однородной суспензии для распылительной сушки, грануляции и прессования. Связующее усиливает связывание частиц (сырая прочность >5 МПа), улучшает текучесть (<30 с/50 г), контролирует морфологию частиц (D50 50200 мкм) и разлагается перед спеканием (остаточный углерод <0,1%). Обычные связующие включают полиэтиленгликоль (ПЭГ), поливиниловый спирт (ПВС), парафин (ПВ) и каучук (SBR/BR). При выборе необходимо учитывать характеристики суспензии, процесс и применение.

2. Виды и характеристики клеев

2.1 Полиэтиленгликоль (ПЭГ)

Химические свойства: $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$, молекулярная масса 200-20 000, растворим в воде/этаноле, температура разложения 250-400°C, остаточный углерод <0,05%.

Физические свойства: вязкость 100500 мПа·с, прочность сырого материала 510 МПа, текучесть <25 с/50 г.

Преимущества: хорошая растворимость, чистое разложение, низкая стоимость (1015 юаней/кг).

Недостатки: Гигроскопичен, устойчивость суспензии снижается на 10%.

Процесс: Добавить 12%, перемешивать в течение 12 часов, разложить при температуре 300-400°C.

2.2 Поливиниловый спирт (ПВС)

Химические свойства: $(\text{C}_2\text{H}_4\text{O})_n$, молекулярная масса 20 000–200 000, растворим в воде, температура разложения 200–350 °C, остаточный углерод <0,1%.

Физические свойства: вязкость 2001000 мПа·с, прочность до застывания 812 МПа, текучесть <28 с/50 г.

Преимущества: Высокая прочность склеивания, подходит для сложных форм.

Недостатки: Плохая растворимость этанола, а стоимость сушки увеличивается на 10–15%.

Процесс: Добавить 0,5-1,5%, перемешивать в течение 23 часов, разложить при температуре 250-350°C.

2.3 Парафин (PW)

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Химические свойства: углеводороды, молекулярная масса 3001000, температура плавления 5070°C, температура разложения 200500°C, остаточный углерод 0,10,2%.

Физические свойства: вязкость 1050 мПа·с, прочность до схватывания 48 МПа, текучесть <30 с/50 г.

Преимущества: низкая стоимость (510 юаней/кг), хорошие смазывающие свойства.

Недостатки: много углеродистых остатков, требуется органический растворитель.

Процесс: Количество добавки 23%, нагрев 6080°C, разложение 400500°C.

2.4 Резина (SBR/BR)

Химические свойства: молекулярная масса 50 000–500 000, температура разложения 300–600°C, остаточный углерод 0,2–0,3%.

Физические свойства: вязкость 5002000 мПа·с, прочность до застывания 610 МПа, текучесть <30 с/50 г.

Преимущества: Высокая эластичность, трещиностойкость повышена на 15%.

Недостатки: большое количество остаточного углерода и высокая стоимость (2030 юаней/кг).

Процесс: Количество добавки 12%, нагрев 50-70°C, разложение 400-600°C.

2.5 Другое

ПММА: температура разложения 300-450°C, остаточный углерод <0,1%, подходит для высокоточных инструментов.

КМЦ: температура разложения 250-350°C, остаточный углерод <0,05%, подходит для исследований и разработок.

Прогресс: Наносвязующее на водной основе, остаток углерода <0,03%, текучесть увеличена на 15%.

3. Выбор приложения

3.1 Основа отбора

Суспензия: содержание твердого вещества 60-80%, этанол - ПЭГ/ПВ, вода - ПВС/КМЦ.

Процесс: ПВА для мокрого прессования, ПВ для сухого прессования.

Применение: для режущих инструментов выбирайте ПЭГ/ПВА, для форм — СБК, а для недорогих — ПВ.

Стоимость: PW (510 юаней/кг), PEG (1015 юаней/кг).

3.2 Применимые сценарии

ПЭГ: инструмент YG6/YG8, D50 80150 мкм, текучесть <25 с/50 г.

ПВА: Ультрамелкозернистый инструмент, прочность в сыром виде 812 МПа.

PW: Инструменты для майнинга YG8, стоимость снижена на 20%.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

SBR: форма YG15, трещиностойкость повышена на 15%.

ПММА/КМЦ: НИОКР авиационных инструментов, D50 5080 мкм .

3.3 Процесс отбора

Определить область применения и характеристики суспензии.

Соответствующий клей.

Проверьте текучесть, прочность сырой массы, остаток углерода.

Оптимизируйте процесс.

4. Факторы влияния

Состав: 12% (ПЭГ/ПВС), 23% (ПВ/СБК).

Суспензия: содержание твердого вещества 70%, вязкость 200 мПа·с .

Смешивание: Перемешивайте со скоростью 500–1000 об/мин в течение 12 часов.

Спекание: вакуум, 350-400°C, остаток углерода <0,1%.

Окружающая среда: влажность <40%, температура 2030°C.

5. Меры оптимизации

Выберите связующее вещество: ПЭГ/ПВА (нож), СБК (форма).

Контролируемое содержание: Прочность в сыром виде 512 МПа.

Оптимизированная суспензия: содержание твердого вещества 70-75%.

Улучшенное смешивание: планетарная шаровая мельница, однородность на 15% выше.

Оптимизированное спекание: ГИП, пористость <0,01%.

6. Примеры применения

Инструмент YG6: 1,5% ПЭГ, текучесть 23 с/50 г, твердость 1500 HV.

Ультрамелкозернистый инструмент: 1% ПВА, прочность в сыром виде 10 МПа, твердость 2000 HV.

Горнодобывающий инструмент YG8: 2,5% PW, прочность на изгиб 2,2 ГПа .

Форма YG15: 1,5% SBR, срок службы 120 000 раз.

7. Заключение

Связующие, используемые при смешивании цементированного карбида, включают полиэтиленгликоль (ПЭГ), поливиниловый спирт (ПВС), парафиновый воск (ПВ), каучук (БСК/БК) и другие (например, ПММА, КМЦ). ПЭГ имеет хорошую текучесть (<25 с/50 г) и подходит для инструментов общего назначения; ПВС имеет высокую прочность в сыром виде (812 МПа) и подходит для сверхмелкозернистых инструментов; ПВ имеет низкую стоимость и подходит для горнодобывающих инструментов; БСК имеет сильную

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

трещиностойкость и подходит для больших форм. При выборе необходимо учитывать характеристики суспензии (содержание твердого вещества 60-80%), требования к процессу, сценарии применения и затраты. Меры оптимизации могут повысить текучесть на 20%, прочность в сыром виде на 20%, твердость на 5% и снизить затраты на 20%. В будущем наносвязующие на водной основе и двойные связующие улучшат производительность и защиту окружающей среды.

Сравнительная таблица характеристик и эксплуатационных характеристик связующего вещества из цементированного карбида

Связующее	Химические свойства	авария температура °C	Углеродный остаток %	зеленый остаток сила МПа	поток Секс/50г	расход Юань/кг	преимущества	недостаток	Основные приложения
ПЭГ	НО(CH ₂ CH ₂ O) n , молекулярная масса 20020000, растворим в воде/этаноле	250400	<0,05	510	<25	1015	Хорошая текучесть, чистое разложение, низкая стоимость	Поглощение влаги, высокомолекулярный углеродный остаток	Общие инструменты (YG6, YG8), формы (YG15)
ПВА	(C ₂ H ₄ O)n , молекулярная масса 20 000-200 000, растворим в воде	200350	<0,1	812	<28	1520	Высокая прочность склеивания, подходит для сложных форм	Плохая растворимость в этаноле и высокая стоимость сушки	Сверхтонкозернистый режущий инструмент, сложные формы
ПВ	Углеводороды , молекулярная масса 3001000, растворимые в органических растворителях	200500	0.10.2	48	<30	510	Низкая стоимость, хорошая смазывающая способность	Много остаточного углерода, необходим органический растворитель	Горнодобывающие инструменты (YG8), недорогие формы
СБР/БР	Молекулярная масса 50 000-500 000, растворим в органических	300600	0.20.3	610	<30	2030	Высокая эластичность и высокая устойчивость	Большое количество углеродистых остатков, высокая стоимость	Большие формы (YG15), горнодобывающий инструмент

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

	растворителях						трещинам		
ПММА	Молекулярная масса 50 000–100 000, растворим в органических растворителях	300450	<0,1	812	<28	~50	Высокая точность, низкий остаток углерода	Высокая стоимость, плохая растворимость	Разработка высокоточного инструмента
КМЦ	Производные целлюлозы, растворимые в воде	250350	<0,05	46	<25	2025	Хорошая растворимость в воде, низкий углеродистый остаток	Низкая интенсивность зеленого цвета	Лабораторные исследования и разработки, авиационные инструменты

Температура разложения: влияет на процесс спекания, <400°C больше подходит для вакуумного спекания.

Остаток углерода: <0,1% Обеспечить пористость спекания <0,1%.

Прочность в сыром виде: >5 МПа соответствует требованиям прессования, 812 МПа подходит для сложных форм.

Текучесть: <30 с/50 г, в соответствии с требованиями распылительной сушки (GB/T 1482).

Стоимость: РW — самый экономичный, РММА — самый дорогой.

Выбор области применения: ПЭГ/ПВА для высокой производительности, ПВ для низкой стоимости, СБК для больших заготовок.

8. Стандарты

GB/T 3849: Магнитный тест кобальта. ISO 4499: Микроструктура.

GB/T 1482: Текучесть. ISO 3326:2013: Пористость.

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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



приложение:

Концепция, причина и улучшение обезуглероживания и науглероживания твердого сплава

1. Обзор

Твердый сплав — это композитный материал с карбидом вольфрама (WC) в качестве твердой фазы и кобальтом (Co) или никелем (Ni) в качестве связующей фазы. Его эксплуатационные характеристики в значительной степени зависят от точного контроля содержания углерода. Теоретическое содержание углерода в WC составляет 6,13 мас. %, и его необходимо контролировать в диапазоне 6,08–6,18 мас. % при реальном производстве (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.). Отклонения в содержании углерода могут привести к дефектам обезуглероживания или науглероживания, которые существенно влияют на микроструктуру и свойства материала. Обезуглероживание относится к недостаточному содержанию углерода, что приводит к разложению WC или образованию хрупкой η-фазы (Co_3W_3C или Co_6W_6C), тем самым снижая твердость и прочность; науглероживание относится к избыточному содержанию углерода, которое выделяет свободный углерод (графитовую фазу), влияя на износостойкость и адгезию покрытия. В данной статье объединены китайские национальные стандарты (GB/T 3849), международные стандарты (ISO 4499) и отраслевые данные для подробного анализа концепций, причин, последствий и мер по улучшению обезуглероживания и науглероживания.

2. Понятие обезуглероживания и науглероживания

2.1 Декарбонизация

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Определение декарбонизации

Содержание углерода в твердом сплаве ниже стехиометрического соотношения WC (6,13 мас. %), что приводит к разложению WC на W_2C или образованию η -фазы (Co_3W_3C , Co_6W_6C).

Микроструктура

Фаза η имеет игольчатую или зернистую форму, размер 5-25 мкм, твердость около HV 1800-2000 и вязкость разрушения (KIC) 4-6 МПа·м^{1/2}, что намного ниже 8-15 МПа·м^{1/2} твердого сплава в целом (Journal of Materials Science 2025). Хрупкость фазы η приведет к распространению трещин и снижению надежности материала.

Влияние декарбонизации

Твердость снижается на 5–10 % (например, с HV 1800 до HV 1620–1710, ITIA 2024).

Прочность на изгиб (TRS) снижается на 10–15 % (с 2200 МПа до 1870–1980 МПа, тест ASTM B406).

Коррозионная стойкость снижается, а скорость коррозии увеличивается на 15–20 % (скорость коррозии в среде соляного тумана увеличивается с 0,05 мм/год до 0,06–0,07 мм/год, ASTM G31).

Пример: в условиях высокоскоростной резки (200 м/мин) обезуглероживание приводит к снижению износостойкости твердосплавных инструментов, а срок службы сокращается примерно на 20–30 % (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

2.2 Науглероживание

определение

Содержание углерода в твердом сплаве превышает стехиометрическое соотношение, и выпадает в осадок свободный углерод (графитовая фаза).

Свободный углерод находится в форме кластеров или хлопьев размером 0,5-3 мкм и имеет крайне низкую твердость (<HV 100). Он в основном распределен в фазе **кобальта** или на границах зерен, увеличивая пористость (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Твердость снижается на 3–5 % (с HV 1800 до HV 1710–1740, ITIA 2024).

Прочность на изгиб снизилась на 8–10 % (с 2200 МПа до 1980–2020 МПа).

Свободный углерод увеличивает угол смачивания (с 5° до 15°-25°), что приводит к снижению адгезии покрытия на 15%-20% (тест ASTM C633).

Пример: в штамповочных штампах науглероживание увеличивает шероховатость поверхности твердосплавных штампов (Ra от 0,2 мкм до 0,3-0,4 мкм), увеличивает скорость отслаивания покрытия примерно на 15% и сокращает срок службы штампа на 10%-15% (Журнал материаловедения 2025).

3. Причины обезуглероживания и науглероживания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

3.1 Декарбонизация

Факторы сырья:

Недостаточное содержание углерода (<6,10 мас. %), например, содержание углерода в порошке WC ниже теоретического значения (6,13 мас. %).

Сырье содержит большое количество оксидов (таких как WO₃ или CoO₃) (0,03% -0,1%), которые вступают в реакцию с углеродом, образуя CO/CO₂ во время спекания, потребляя углерод (Журнал материаловедения, 2025).

Качество технического углерода нестабильно и содержит примеси (такие как сера и кислород), которые приводят к потере углерода примерно на 0,05–0,1% (ИТИА 2024).

Атмосферные факторы:

Содержание кислорода в атмосфере спекания составляет >0,1%, что приводит к окислению углерода с образованием CO/CO₂, а скорость обезуглероживания увеличивается примерно на 10%-15%.

водорода (H₂) слишком велико (> 5%), он будет реагировать с углеродом, образуя CH₄, забирая элемент углерода (ИТИА 2024).

H₂O в атмосфере составляет >0,05%, что приводит к реакции с углеродом с образованием CO и H₂, что еще больше усугубляет обезуглероживание (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Температурные факторы:

Температура спекания >1450°C, WC распадается на W₂C или η-фазу (реакция: 2WC + Co → Co₃W₃C + C).

Колебания температуры (±10°C) приводят к локальному обезуглероживанию и увеличению скорости образования η-фазы на 10–15% (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Если время изоляции слишком длительное (>2 часов), улетучивание углерода увеличивается, а риск декарбонизации увеличивается примерно на 8% (Journal of Materials Science 2025).

Факторы смешивания:

Смешивание происходит неравномерно, а локальное отклонение распределения углерода составляет >0,1 мас. %, что приводит к региональной декарбонизации.

Остаточное содержание углерода в органических связующих (таких как парафин PW или SBR) составляет >0,1%, и они не полностью разлагаются на ранней стадии спекания, что влияет на баланс углерода (ИТИА 2024).

Оборудование для смешивания (например, шаровые мельницы) загрязняется (например, железной стружкой), внося оксиды и потребляя около 0,02% -0,05% углерода (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

3.2 Науглероживание

Факторы сырья:

Содержание углерода слишком высокое (>6,15 мас. %), например, из-за чрезмерного добавления сажи (>0,5 мас. %).

Частицы технического углерода не имеют однородного размера (>10 мкм), что приводит к

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

локальному избытку углерода (ITIA 2024).

, WC) в сырье слишком мелкие ($<0,1 \mu\text{m}$), обладают высокой поверхностной активностью и адсорбцией избыточного углерода (Журнал материаловедения 2025).

Атмосферные факторы:

Содержание CH_4 в атмосфере спекания ($>1\%$) приводит к отложению углерода и увеличивает скорость науглероживания примерно на 10%-15%.

Недостаточный вакуум ($>10^{-2}$ Па) препятствует испарению углерода и приводит к выпадению оставшегося свободного углерода в осадок (ITIA 2024).

Когда углеродный потенциал в атмосфере слишком высок (например, углеродный потенциал $> 1,2$), атомы углерода диффундируют к поверхности материала и осаждают графитовую фазу (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Температурные факторы:

При температуре спекания $<1350^\circ\text{C}$ реакция углерода не завершается и оставшийся свободный углерод выпадает в осадок.

Колебания температуры ($\pm 10^\circ\text{C}$) приводят к локальному науглероживанию, а объемная доля свободного углерода увеличивается на 5–10% (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Если скорость охлаждения слишком низкая ($<5^\circ\text{C}/\text{мин}$), в процессе охлаждения будет выделяться углерод, а скорость науглероживания увеличится примерно на 5% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Факторы смешивания:

Остаточное содержание углерода в парафине (PW) или SBR в смеси составляет 0,15%-0,3%, а содержание углерода увеличивается после разложения.

Недостаточное время перемешивания (<10 часов) приводит к неравномерному распределению углерода и увеличению локальной скорости науглероживания примерно на 8–12 % (ITIA 2024).

В процессе смешивания технический углерод агломерируется (агломерированные частицы $> 20 \mu\text{m}$), что приводит к локальному избытку углерода (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Микроскопический механизм:

В процессе обезуглероживания η -фаза снижает энергию связи на границе раздела WC-Co (с $1,2 \text{ Дж}/\text{м}^2$ до $0,8-1,0 \text{ Дж}/\text{м}^2$) и увеличивает тенденцию к распространению трещин (Журнал материаловедения 2025).

В процессе цементации свободный углерод увеличивает краевой угол смачивания (с 5° до $15^\circ-25^\circ$), снижает смачиваемость кобальта по отношению к WC и влияет на адгезию покрытия (ITIA 2024).

Небольшое отклонение содержания углерода ($\pm 0,1 \text{ мас. \%}$) приведет к увеличению межфазного напряжения примерно на 10–15 %, что еще больше усугубит микродефекты (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

4. Эффекты обезуглероживания и науглероживания

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

4.1 Микроструктура

Декарбонизация:

Фаза η разрушает границу раздела WC-Co, объем кобальтовой ванны увеличивается на 5–10 %, а зерна аномально растут (от 0,5 мкм до 1–2 мкм).

Увеличение пористости на 0,05%-0,1% (ISO 3326:2013).

Увеличение межфазного напряжения примерно на 10% приводит к увеличению вероятности возникновения микротрещин на 15–20% (Journal of Materials Science 2025).

науглероживание:

Свободный углерод накапливается на границах зерен, увеличивая пористость на 0,1%-0,15%.

Фаза кобальта распределена неравномерно, локальная смачиваемость снижается на 10–15 %, а прочность границ зерен снижается примерно на 5 % (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

Свободные частицы углерода вызывают концентрацию напряжений и увеличивают тенденцию к образованию пор примерно на 8% (ИПА 2024).

4.2 Производительность

твёрдость:

Декарбонизация: снижение на 5%-10% (с HV 1800 до HV 1620-1710).

Науглероживание: уменьшение на 3%-5% (HV 1800 до HV 1710-1740).

сила:

Обезуглероживание: прочность на изгиб снижается на 10–15 % (с 2200 МПа до 1870–1980 МПа).

Науглероживание: снизилось на 8%-10% (с 2200 МПа до 1980-2020 МПа).

прочность:

Обезуглероживание: вязкость разрушения (KIC) снижается на 20%-25% (с 10 МПа·м^{1/2} до 7,5-8 МПа·м^{1/2}).

Науглероживание: Незначительно увеличилось на 5%-8% (с 10 МПа·м^{1/2} до 10,5-10,8 МПа·м^{1/2}).

Коррозионная стойкость:

Обезуглероживание: Скорость коррозии увеличивается на 15–20 % (с 0,05 мм/год до 0,06–0,07 мм/год, ASTM G31).

Науглероживание: Скорость коррозии увеличивается примерно на 5% (с 0,05 мм/год до 0,0525 мм/год).

Адгезия покрытия:

Науглероживание: Адгезия снижается на 15–20 % (с 50 МПа до 40–42,5 МПа, ASTM C633).

Обезуглероживание: Адгезия снижается примерно на 5% (с 50 МПа до 47,5 МПа).

Стойкость к истиранию:

Обезуглероживание: Скорость износа увеличивается на 20–25 % (с 0,06 мм³/Н·м до 0,072–0,075 мм³/Н·м, ASTM G65).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

Науглероживание: Скорость износа увеличивается на 10%-15% (с 0,06 мм³/Н·м до 0,066-0,069 мм³/Н·м).

4.3 Применение

Нож:

Обезуглероживание приводит к снижению износостойкости инструмента и сокращению срока службы на 20%-30%. Например, при высокоскоростной резке (200 м/мин) срок службы сокращается с 2 часов до 1,4-1,6 часов (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Науглероживание увеличивает скорость отслоения покрытия на 15–20% и сокращает его срок службы на 10–15% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Форма :

Обезуглероживание приводит к снижению ударопрочности формы и сокращению срока ее службы на 15%-20%. Например, срок службы штамповочной формы сокращается со 120 000 раз до 96 000-102 000 раз.

Науглероживание увеличивает шероховатость поверхности формы (Ra увеличивается с 0,2 мкм до 0,3–0,4 мкм) и сокращает срок ее службы на 10–15 % (Журнал материаловедения 2025 г.).

Инструменты для горнодобывающей промышленности:

Декарбонизация увеличивает риск разрушения примерно на 25–30 %, например, срок службы горнодобывающего бурового долота при бурении гранита сокращается с 2000 м до 1400–1500 м (ИТИА 2024).

Науглероживание приводит к снижению износостойкости примерно на 10–15%, а срока службы сверла — на 10–12% (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024 г.).

5. Меры по улучшению

5.1 Контроль сырья

Содержание углерода строго контролировалось на уровне 6,10–6,15 мас. % ($\pm 0,05$ мас. %), использовался порошок WC высокой чистоты (содержание углерода 6,12–6,14 мас. %, оксид <0,02%).

Добавление ингибиторов зернистости, таких как Cr₃C₂ (0,3–0,8 %) или VC (0,1–0,5%), подавляет образование η-фазы и снижает объемную долю η-фазы на 8–12% (ИТИА 2024).

Высокоочищенный технический углерод (чистота > 99,9%) используется для снижения влияния примесей (таких как сера и кислород) на содержание углерода, а скорость потери углерода контролируется на уровне 0,01% -0,03% (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

5.2 Оптимизация смешивания

При использовании планетарной шаровой мельницы для смешивания (12-18 часов, 300-500 об/мин) однородность улучшается на 10%-15%, а отклонение распределения углерода составляет <0,05 % по массе .

Используйте связующие вещества с низким содержанием углеродного остатка, такие как ПЭГ или ПВА (содержание углеродного остатка <0,03%), чтобы заменить традиционный парафин (содержание углеродного остатка 0,1%-0,2%).

Оптимизация шаровой мельницы (например, использование шаров WC вместо стальных) может снизить загрязнение железом и сократить потребление углерода примерно на 0,02% (Journal of Materials Science, 2025).

Добавление диспергаторов (например, стеариновой кислоты, 0,1–0,3 %) может снизить агломерацию технического углерода и улучшить однородность на 5–8 % (Китайский журнал цветных металлов, 2024 г.).

5.3 Оптимизация спекания

Используется вакуумное спекание (степень вакуума 10^{-3} Па), а содержание кислорода в атмосфере контролируется на уровне <0,05%, H_2 <2% и H_2O <0,03%, чтобы избежать окисления или улетучивания углерода.

Температура спекания поддерживается на уровне 1380–1420 °C (± 5 °C), а время выдержки составляет 1–1,5 часа, чтобы избежать разложения WC или выделения свободного углерода.

Скорость охлаждения контролируется на уровне 5–10 °C/мин, что снижает риск выделения свободного углерода примерно на 5% (Журнал материаловедения, 2025 г.).

Горячее изостатическое прессование (ГИП, 100–150 МПа, 1350–1400 °C) устраняет пористость, достигая значения <0,01% (ISO 3326:2013).

Используя систему мониторинга атмосферы (определение содержания CO/CH₄ в реальном времени) для обеспечения того, чтобы углеродный потенциал был <1,0, скорость науглероживания снижается примерно на 10% (ITIA 2024).

5.4 Обратная связь при обнаружении

Магнитный тест на кобальт (GB/T 3849) используется для определения отклонения содержания углерода ($\pm 0,05$ мас. %) и точного контроля η -фазы и свободного углерода.

Сочетание рентгеновской дифракции (XRD) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) для анализа микроструктуры позволило повысить скорость обнаружения η -фазы/свободного углерода на 15–20%.

Для анализа распределения углерода используется энергодисперсионная спектроскопия (ЭДС), при этом отклонение контролируется на уровне $\pm 0,03$ мас. %, а уровень дефектов снижается на 10–15% (Китайский журнал цветных металлов, 2024).

Внедрить онлайн-мониторинг с помощью инфракрасной спектроскопии для определения содержания CO/CO₂ в атмосфере спекания и регулировать процесс в режиме реального

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

времени, что позволит снизить уровень дефектов примерно на 8% (ITIA 2024).

5.5 Обработка поверхности

Свободный слой углерода (толщиной 0,01–0,03 мм) удалялся полировкой, шероховатость поверхности Ra составляла < 0,2 мкм .

Используя PVD TiN , Покрытие TiAlN или CrN (толщина 2-5 мкм) , адгезия покрытия улучшается на 15%-20% (ASTM C633).

Плазменная очистка используется для удаления остаточного углерода с поверхности, а адгезия покрытия улучшается примерно на 10% (Journal of Materials Science 2025).

Низкотемпературная азотирование (500-600°C) увеличивает твердость поверхности примерно на 5%, а коррозионную стойкость на 10-15% (ASTM G31).

Эффект:

Объемная доля η-фазы и свободного углерода снижается на 10%-15%.

Твердость увеличилась на 5–8 % (с HV 1710 до HV 1800–1850).

Прочность на изгиб увеличилась на 10–15 % (с 1980 МПа до 2200–2300 МПа).

Износостойкость повышается на 15–20%, а срок службы инструмента и пресс-форм увеличивается на 20–30%.

6. Примеры применения

Инструменты из цементированного карбида с низким содержанием Co (WC-6%Co): Благодаря вакуумному спеканию (1400 °C, степень вакуума 10^{-3} Па) и добавлению 0,5% Cr з С 2 η-фаза уменьшается на 10% -12%, твердость достигает HV 1850, а срок службы увеличивается с 1,5 часов до 1,8-2 часов при резании среднеуглеродистой стали (200 м/мин) (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

Форма из цементированного карбида с высоким содержанием Co (WC-15%Co): точно контролируемое содержание углерода (6,12 мас. %) и полировка, свободный углерод снижен на 10–15 %, прочность на изгиб достигает 2,4–2,5 ГПа , а срок службы штамповочной формы увеличивается со 100 000 раз до 115 000–120 000 раз (ITIA 2024).

Форма из цементированного карбида на основе никеля (WC-10%Ni): при использовании горячего изостатического прессования (150 МПа, 1400 °C) и покрытия CrN пористость составляет <0,01%, скорость коррозии составляет <0,005 мм/год, а срок службы компонентов морской техники увеличивается с 0,8 до 1,1–1,2 лет (Журнал материаловедения, 2025 г.).

из сверхмелкозернистого карбида (размер зерна WC 0,2 мкм) : с использованием нанопорошка WC и покрытием Al₂O₃ (3 мкм) , твердость достигает HV 1950-2000, а срок службы увеличивается с 3 часов до 3,8-4 часов при резании жаропрочных сплавов (250 м/мин) (Журнал Китайского общества цветных металлов, 2024).

COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

7. Стандарты

GB/T 3849-2015: Метод испытания магнитных свойств кобальта в твердом сплаве, определение отклонения содержания углерода.

ISO 4499-2:2020: Оценка микроструктуры твердых сплавов, анализ эта-фазы и свободного углерода.

ASTM B406-96(2021): Метод испытания прочности на изгиб твердого сплава.

ASTM G31-21: Метод испытания коррозионной стойкости металлических материалов.

ASTM C633-13(2021): Метод испытания адгезии покрытий.

ISO 3326:2013: Метод определения пористости в твердых сплавах.

ASTM G65-00(2010): Испытание на истирание резиновым колесом/сухим песком, оценка износостойкости.

CTIA GROUP LTD 30 Years of Cemented Carbide Customization Experts

Core Advantages

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

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

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

Serving Customers

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

Service Commitment

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

Contact Us

Email : sales@chinatungsten.com

Tel : +86 592 5129696

Official website : www.ctia.com.cn

WeChat : Follow "China Tungsten Online"



COPYRIGHT AND LEGAL LIABILITY STATEMENT

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

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